



## Evaluation of the Ability of Forage Sorghum Plant to Remove Cadmium with Biochar and Plant Growth-Promoting Bacteria

Fatemeh Delavarnia<sup>1</sup> | Faezeh Zaefarian<sup>2✉</sup> | Roghayeh Hasanpour<sup>3</sup> |  
Hematollah Pirdashti<sup>4</sup>

1. Department of Agronomy, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: [f.delavarnia@sanru.ac.ir](mailto:f.delavarnia@sanru.ac.ir)
2. Corresponding Author, Department of Agronomy, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: [fa.zaefarian@sanru.ac.ir](mailto:fa.zaefarian@sanru.ac.ir)
3. Department of Agronomy, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: [r.hasanpour@stu.sanru.ac.ir](mailto:r.hasanpour@stu.sanru.ac.ir)
4. Department of Agronomy, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: [h.pirdashti@sanru.ac.ir](mailto:h.pirdashti@sanru.ac.ir)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received: 27 June 2022

Received in revised form:

30 January 2022

Accepted: 23 February 2022

Published online:

17 December 2022

#### Keywords:

Dry weight,  
heavy metal,  
phytoremediation,  
tolerance index,  
translocation factor.

### ABSTRACT

In order to evaluate the ability of forage sorghum (*Sorghum bicolor* L.) to remediate the heavy metal cadmium with biochar and *Pseudomonas putida*, a factorial experiment has been conducted based on completely randomized design accomplished in greenhouse conditions with four replications at Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, in the summer of 2019. Results show that the presence of cadmium in the medium of sorghum reduce the dry weight of root and shoot. However, adding biochar and bacterial inoculation significantly increase the mentioned traits. Bioconcentration factor and bioaccumulation factor have increased from 25 to 100 mg of cadmium, when the highest shoot bioaccumulation factor (2.31) is observed at a concentration of 100 mg Cd per kg soil and in the simultaneous application of Biochar and *Pseudomonas putida*, which is a significant increase of 28.33% compared to the control. The lowest translocation factor of sorghum (1.000) is related to non-application of biochar, non-inoculation of *Pseudomonas putida* and without cadmium contamination, itself reduced by 20% compared to the control, while the highest translocation factor (1.94) is observed at a concentration of 25 mg of cadmium per kg of soil and treatment of non-application of biochar and non-inoculation of *Pseudomonas putida*. Plant tolerance index has decreased by increasing cadmium concentration, while the use of biochar and inoculation of *Pseudomonas putida* has increased this index when the highest tolerance index (1.22) is related to the treatment of combined use of biochar and bacteria with no cadmium, increased by 22% compared to non-application of biochar and non-inoculation bacteria. As the tolerance index of forage sorghum in all concentrations of cadmium is more than 0.60, this plant can be classified in the highly-tolerant group to the heavy metal cadmium stress and sorghum could be used for cadmium phytoremediation.

**Cite this article:** Delavarnia, F., Zaefarian, F., Hasanpour, R., & Pirdashti, H. (2022). Evaluation of the Ability of Forage Sorghum Plant to Remove Cadmium with Biochar and Plant Growth-Promoting Bacteria. *Journal of Crops Improvement*, 24 (4), 1035-1049. DOI: <http://doi.org/10.22059/jci.2022.326280.2573>



## ارزیابی توانایی گیاه سورگوم علوفه‌ای در حذف کادمیم از خاک به‌کمک بیوچار و باکتری‌های محرک رشد گیاه

فاطمه دلاورنیا<sup>۱</sup> | فائزه زعفریان<sup>۲</sup> | رقیه حسن‌پور<sup>۳</sup> | همت‌اله پیردشتی<sup>۴</sup>

۱. گروه زراعت، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: [f.delavarnia@sanru.ac.ir](mailto:f.delavarnia@sanru.ac.ir)

۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: [fa.zaefarian@sanru.ac.ir](mailto:fa.zaefarian@sanru.ac.ir)

۳. گروه زراعت، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: [r.hasanpour@stu.sanru.ac.ir](mailto:r.hasanpour@stu.sanru.ac.ir)

۴. گروه زراعت، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: [h.pirdashti@sanru.ac.ir](mailto:h.pirdashti@sanru.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶

به‌منظور ارزیابی توانایی گیاه سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* L.) در حذف فلز سنگین کادمیم به کمک بیوچار (زغال زیستی) و باکتری *Sودوموناس پوتیدا* (*Pseudomonas putida*) آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در تابستان سال ۱۳۹۸ در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، در شرایط گلخانه انجام شد. نتایج نشان داد که حضور کادمیم در بستر کشت گیاه سورگوم موجب کاهش وزن خشک ریشه و شاخساره شد. اما افزودن بیوچار و تلقیح *سودوموناس پوتیدا* به‌طور معنی‌داری موجب افزایش صفات مذکور شد. فاکتور تجمع زیستی ریشه و شاخساره از غلظت ۲۵ تا ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک روند افزایشی داشت، به‌طوری‌که بیش‌ترین فاکتور تجمع زیستی شاخساره (۲/۳۱) در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و در تیمار کاربرد هم‌زمان بیوچار و *سودوموناس پوتیدا* مشاهده شد که نسبت به شاهد ۲۸/۳۳ درصد افزایش معنی‌داری داشته است. هم‌چنین، کمینه فاکتور انتقال گیاه سورگوم (۱/۰۰۰) مربوط به تیمار عدم مصرف بیوچار، عدم تلقیح *سودوموناس پوتیدا* و بدون آلودگی کادمیم بود که نسبت به شاهد ۲۰ درصد کاهش یافت؛ حال آن‌که بیشینه فاکتور انتقال (۱/۹۴) در غلظت ۲۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و تیمار عدم مصرف بیوچار و عدم تلقیح *سودوموناس پوتیدا* مشاهده شد. شاخص تحمل گیاه با افزایش غلظت کادمیم کاهش یافت، درحالی‌که استفاده از بیوچار و تلقیح باکتری *سودوموناس پوتیدا* موجب افزایش این شاخص شد، به‌طوری‌که بیش‌ترین شاخص تحمل (۱/۲۲) مربوط به تیمار کاربرد تلقیح بیوچار و باکتری بدون استفاده از کادمیم بود که نسبت به عدم مصرف بیوچار و عدم تلقیح باکتری ۲۲ درصد افزایش یافت. از آنجاکه شاخص تحمل گیاه سورگوم علوفه‌ای در همه غلظت‌های کادمیم بیش‌تر از ۰/۶۰ بود، لذا می‌توان این گیاه را در گروه تحمل بالا نسبت به تنش فلز سنگین کادمیم دسته‌بندی کرد و از سورگوم جهت گیاه‌پالایی کادمیم بهره‌جست.

### کلیدواژه‌ها:

شاخص تحمل،

فاکتور انتقال،

فلز سنگین،

گیاه‌پالایی،

وزن خشک.

**استناد:** دلاورنیا، ف.، زعفریان، ف.، حسن‌پور، ر. و پیردشتی، ه. (۱۴۰۱). ارزیابی توانایی گیاه سورگوم علوفه‌ای در حذف کادمیم از خاک به‌کمک بیوچار و

باکتری‌های محرک رشد گیاه. به‌زرعی کشاورزی، ۲۴ (۴)، ۱۰۴۹-۱۰۳۵. DOI: <http://doi.org/jci.2022.326280.2573>



## ۱. مقدمه

آلودگی خاک و زمین توسط فلزات سنگین به دلیل اثرات نامطلوب اکولوژیکی بالقوه، به یک نگرانی جدی در محیط زیست تبدیل شده است (Mohammed Ali *et al.*, 2019). اگرچه ریزمغذی‌هایی مانند مولیبدن، روی، کروم، مس، آهن و نیکل برای موجودات زنده از جمله گیاهان ضروری هستند، اما می‌توانند در سطوح بالا اثرات مضر ایجاد کنند. فلزاتی مانند جیوه، آرسنیک، سرب و کادمیم، حتی در سطوح پایین نیز تأثیرات سمی جدی روی موجودات زنده دارند (Aricak *et al.*, 2020). کادمیم یک عنصر کمیاب غیرضروری است و هیچ نقش مشخصی در رشدونمو انسان، گیاهان و حیوانات ندارد. این عنصر در لیتوسفر (۰/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم)، در سنگ‌های رسوبی (۰/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) و در خاک (۰/۵۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) وجود دارد (Amjad Khan *et al.*, 2017). غلظت کادمیم در خاک‌های غیرآلوده معمولاً کمتر از ۰/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک است، اما بسته به مواد اصلی خاک می‌تواند تا ۱۶/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک برسد (Ma *et al.*, 2020). این عنصر به راحتی با استفاده از ناقل مواد مغذی ضروری یا آکوابورین‌ها وارد سلول‌های ریشه می‌شود، و با آن‌ها رقابت می‌کند (Piacentini *et al.*, 2020). جذب بیش‌تر کادمیم با جلوگیری از ردکنز ریشه باعث کاهش فتوسنتز می‌شود، بر فعالیت آنزیمی که در تثبیت CO<sub>2</sub> نقش دارد تأثیر می‌گذارد، در جذب مواد معدنی اختلال ایجاد می‌کند و باعث عدم تعادل مواد مغذی (مانند سدیم و پتاسیم) می‌شود و در نهایت منجر به بسته شدن روزه می‌شود (Ur Rahman *et al.*, 2020). علاوه بر این، تجمع کادمیم موجب تداخل در آنزیم‌های چرخه کالوین، متابولیسم کربوهیدرات‌ها و فتوسنتز می‌شود و همچنین متابولیسم آنتی‌اکسیدان را تغییر می‌دهد (Kapur & Singh, 2019). بنابراین، ایجاد یک برنامه اصلاح کم‌هزینه و سازگار با محیط زیست برای آلودگی‌زدایی فلزات سنگین از خاک بسیار مهم است (Alzahrani *et al.*, 2020).

گیاه‌پالایی به طور عمده شامل حذف فلزات سنگین از خاک و یا تثبیت آن‌ها در خاک است که با استفاده از گیاهان سبز اجرا می‌شود. این فرایندها به ترتیب استخراج گیاهی و تثبیت گیاهی نامیده می‌شوند (Hou *et al.*, 2020). گیاهان می‌توانند مواد آلی و مواد مغذی را جذب و تخریب کنند و همچنین فلزات سنگین را نیز جذب کنند. از این رو، می‌توان از آن‌ها در کنترل و بازیابی محیط‌های آلوده استفاده کرد (Herlina *et al.*, 2020). توانایی گیاهان در تجمع فلزات در بین گونه‌های گیاهی متفاوت است و با مورفولوژی و رشد آن‌ها مرتبط است (Schuck *et al.*, 2020). سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* L.) متعلق به خانواده پوآسه یا گرامینه (Poaceae) و زیرخانواده Panicoideae است. این گیاه با مسیر فتوسنتزی C<sub>4</sub> به طور عمده برای تولید دانه کشت می‌شود و به عنوان خوراک دام در چندین قاره جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Kaur & Kumar, 2020). آلاینده‌های خاک (معمولاً فلزات سنگین) توسط ریشه گیاهان جذب می‌شوند، به قسمت‌های قابل برداشت گیاهان منتقل می‌شوند و از طریق برداشت گیاهان از محیط خارج می‌شوند و سورگوم به دلیل توانایی جذب فلزات سنگین و تولید زیست‌توده بالا متناسب با این توصیف است (Tsuboi *et al.*, 2017). نکته مهم، چگونگی بهبود کارایی و بهینه‌سازی شرایط گیاه‌پالایی است. گزارش شده است که هم ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و هم فعالیت‌های میکروبی خاک تأثیر شدیدی در اثربخشی گیاه‌پالایی دارند (Han *et al.*, 2016).

بیوجار (زغال زیستی) از تبدیل حرارتی-شیمیایی یا تجزیه زیست‌توده گیاهی، حیوانی و کودهای دامی (که معمولاً به عنوان مواد اولیه نامیده می‌شوند) در اثر حرارت در دمای حدود ۲۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در یک محیط بدون اکسیژن یا اکسیژن حداقل به دست می‌آید (He *et al.*, 2019). افزودن بیوجار به خاک‌های آلوده منجر به بهبود ویژگی‌های خاک مانند حاصل خیزی خاک، نگهداری مواد مغذی، ظرفیت نگهداری آب و اکسیژن‌رسانی می‌شود و همچنین توسط جذب سطحی، رسوب و تجزیه و جداسازی آلاینده‌ها موجب اصلاح آلودگی می‌شود (Hussain *et al.*, 2018).

باکتری‌هایی که در ریشه گیاهان ساکن می‌شوند و با افزودن برخی از عوامل رشد و هورمون‌ها، رشد و عملکرد گیاه را بهبود می‌بخشند، باکتری‌های محرک رشد گیاه نامیده می‌شوند (Kumar *et al.*, 2020). این باکتری‌ها از طریق طیف وسیعی از فرایندها مانند محلول‌سازی فسفات، تثبیت زیستی نیتروژن، تولید سیدروفور، تولید هورمون‌های گیاهی، فعالیت ضد قارچی و ارتقای هم‌زیستی گیاه و میکروب، رشد گیاه را بهبود می‌بخشند (Helaly *et al.*, 2020). باکتری جنس سودوموناس یک تیره بزرگ و متنوع از گاما پروتئوباکتریاست. این باکتری‌ها شیوه‌های متنوعی از زندگی را در محیط‌های مختلفی از جمله خاک، آب، گیاهان و حیوانات از خود نشان می‌دهند (Hesse *et al.*, 2018). باکتری سودوموناس پوتیدا یک باکتری ساپروفیت ریزوسفر، حاضر در همه جاست که به گروه گسترده‌ای از گونه‌های سودوموناس فلورسنت تعلق دارد (Volke *et al.*, 2020). این باکتری‌ها معمولاً سازگاری گیاهان میزبان را با شرایط نامطلوب خاک در حالت تنش تسهیل می‌کنند و با افزایش رشد گیاه، تغییر در فراهمی زیستی فلزات سنگین، از بین بردن مسمومیت گیاهی در خاک و افزایش انتقال فلزات سنگین در گیاه کارایی گیاه‌پالایی را افزایش می‌دهند (Pidlisnyuk *et al.*, 2020). علاوه بر این، این باکتری‌ها به دلیل تولید ترکیبات تقویت‌کننده رشد گیاه، رشدونمو گیاهان را بسیار تحت تأثیر قرار می‌دهند. شایان ذکر است ترکیباتی نظیر ایندول-۳-استیک اسید، سیدروفورها و ۱-آمینوسیکلوپروپان-۱-کربوکسیلات دامیناز که مقاومت گیاه را در برابر تنش‌های مختلف زیستی و غیرزیستی بهبود می‌بخشند و با تولید بیوسورفکتانت و مواد پلیمری خارج سلولی موجب جلوگیری یا کاهش سمیت فلزات سنگین در گیاهان می‌شوند (Wu *et al.*, 2019).

با توجه به افزایش روزافزون آلاینده‌هایی مانند کادمیم و اثرات زیان‌بار آن‌ها در موجودات زنده و تداخل آن با مکانیسم‌های ضروری گیاه و همچنین به دلیل مشخص نبودن تأثیر اصلاح‌کننده‌های خاک و میکروارگانیسم‌ها در زمان تجمع این فلز در اندام‌های گیاهی اجرای روش صحیح برای مدیریت این آلاینده‌ها ضروری است. گیاه‌پالایی یکی از روش‌هایی است که به‌تازگی مورد توجه زیادی قرار گرفته است، بنابراین انتخاب گیاهان مناسب و راه‌کارهای تسریع این فرایند بسیار حائز اهمیت است. از این‌رو آزمایشی مبنی بر بررسی قابلیت گیاه‌پالایی گیاه سورگوم علوفه‌ای با مصرف بیوچار و تلقیح باکتری محرک رشد تحت تنش فلزات سنگین طراحی و اجرا شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

جهت بررسی توانایی کاهش آلودگی فلز سنگین کادمیم توسط سورگوم (*Sorghum bicolor* var. Speed feed) همراه با مصرف بیوچار و تلقیح باکتری سودوموناس پوتیدا، آزمایشی گلخانه‌ای در سال ۱۳۹۸ در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شد. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار صورت گرفت. تیمارهای آزمایشی عبارت بودند از ۱- بیوچار به‌عنوان اصلاح‌کننده آلی خاک در دو سطح (بدون مصرف (شاهد) و مصرف (۲۰ گرم به ازای هر کیلوگرم خاک)، ۲- باکتری سودوموناس پوتیدا در دو سطح (بدون تلقیح با باکتری (شاهد) و تلقیح با باکتری (۲۰ میلی‌لیتر))، ۳- سطوح فلز آلاینده (صفر (شاهد)، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک).

در مجموع ۸۰ گلدان پنج کیلوگرمی در نظر گرفته شد. در هر گلدان چهار کیلوگرم خاک ریخته شد که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول (۱) نشان داده شده است. خاک پس از هوا خشک شدن با مقدار موردنظر نیترات کادمیم (Merck KGaA) برای هر تیمار، مخلوط شد. بیوچار مصرفی (جدول ۲) حاصل از بقایای درختان جنگلی بود که از شرکت داخلی کربن اکتیو بشل تهیه شد. پس از اضافه کردن نیترات کادمیم به خاک، مقدار بیوچار تعیین شده به تیمارهای موردنظر اضافه شد.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

کادمیم (mg/kg)	پتاسیم (mg/kg)	فسفر (mg/kg)	نیترژن (%)	هدایت الکتریکی (dS/m)	اسیدیته	بافت خاک رسی
۰/۰۰۵	۲۶۶	۱۰	۰/۱۸	۱/۷۰	۷/۲۱	

جدول ۲. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوجار

دانه‌بندی (mm)	خاکستر (%)	اسیدیته	میزان رطوبت (%)	مساحت سطح (m <sup>2</sup> /g)	ظرفیت جذب متیلن بلو* (mg/g)	ظرفیت جذب ید* (mg/g)
۱	۴-۵	۸/۵	۳-۴	۹۵۰-۱۱۰۰	۱۵۰-۲۵۰	۹۵۰-۱۱۰۰

\* ظرفیت جذب ید و متیلن بلو شاخصی برای اندازه‌گیری میزان جذب مواد سمی توسط بیوجار است.

به منظور جذب کامل نیترات کادمیم و بیوجار در خاک به مدت ۲۰ روز آبیاری از طریق زیرگلدانی صورت گرفت. مایه تلقیح مورد استفاده در این آزمایش از مؤسسه تحقیقات خاک و آب کرج تهیه شد. تلقیح باکتری در زمان کاشت بذور (اول تیر) به صورت آغشته کردن بذر (چند ساعت قبل از کاشت) و افزودن به خاک (۲۰ میلی لیتر در هر تیمار) صورت گرفت. در طول دوره رشد مبارزه با علف‌های هرز به طور دستی صورت گرفت و ضرورتی به استفاده از علف‌کش‌های شیمیایی و مبارزه با آفات احساس نشد. تقریباً پس از دو ماه یعنی اوایل شهریورماه، برداشت قبل از شروع مرحله گلدهی (قبل از ظهور گل آذین) صورت گرفت. در این مرحله گیاهان هر گلدان کفبر شدند. پس از برداشت اندام هوایی، گلدان‌ها برای خارج کردن ریشه‌ها ابتدا آبیاری شدند. در نهایت ریشه‌ها از گلدان خارج و نمونه‌های اندام‌های هوایی و اندام‌های زیرزمینی گیاه به منظور اندازه‌گیری صفات مرتبط به گیاه‌پالایی به آزمایشگاه منتقل شدند. توانایی گیاهان در انباشت عنصر کادمیم با استفاده از روابط (۱) تا (۵) محاسبه شد.

$$\text{رابطه (۱) (Lux et al., 2004)} = 100 \times \frac{\text{وزن خشک شاخساره در خاک آلوده (g)}}{\text{وزن خشک شاخساره در خاک غیرآلوده (g)}} = \text{شاخص تحمل}$$

$$\text{رابطه (۲) (Zhang et al., 2002)} = \frac{\text{غلظت فلز کادمیم در شاخساره (mg/kg)}}{\text{غلظت فلز کادمیم در ریشه (mg/kg)}} = \text{فاکتور انتقال}$$

$$\text{رابطه (۳) (Ma et al., 2001)} = \frac{\text{غلظت فلز کادمیم در شاخساره (mg/kg)}}{\text{غلظت فلز کادمیم قابل جذب خاک (mg/kg)}} = \text{فاکتور تجمع زیستی شاخساره}$$

$$\text{رابطه (۴) (Cluis, 2004)} = \frac{\text{غلظت فلز کادمیم در ریشه (mg/kg)}}{\text{غلظت فلز کادمیم قابل جذب خاک (mg/kg)}} = \text{فاکتور تجمع زیستی ریشه}$$

$$\text{رابطه (۵) (Kos et al., 2003)}$$

$$\text{وزن خشک شاخساره (g/pot)} \times \text{غلظت فلز کادمیم در شاخساره (mg/g)} = \text{مقدار جذب در شاخساره (mg/pot)}$$

پس از پایان یافتن محاسبات آزمایشگاهی، تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS (v. 9) انجام شد. پس از معنی‌دار بودن اثرات متقابل سه‌گانه، برش‌دهی اثر متقابل صورت گرفت و از آزمون LSD در سطح پنج درصد جهت مقایسه میانگین استفاده شد.

### ۳. نتایج

#### ۳.۱. وزن خشک اندام‌های گیاهی

نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که اثر متقابل سه‌گانه بر وزن خشک اندام‌های گیاهی سورگوم در سطح یک درصد

معنی‌دار شد. با افزایش غلظت کادمیم از غلظت صفر تا ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک، مقدار وزن خشک ریشه و شاخساره کاهش معنی‌داری یافت (جدول ۴). سمیت کادمیم می‌تواند با تغییر صفات مورفولوژیک و کاهش شاخص میتوزی، بر رشدونمو گیاهان تأثیر منفی بگذارد و این تغییرات به‌نوبه خود می‌توانند منجر به کاهش قابل توجه عملکرد محصولات شوند (Catav et al., 2020). کادمیم می‌تواند بر جذب عناصر غذایی در گیاه اثر منفی داشته باشد. جذب و سوخت‌وساز عناصر غذایی ضروری مانند نیتروژن و فسفر در گیاهان تحت تنش مانند کمبود آب، شوری و سمیت فلزات سنگین کاهش می‌یابد و در نتیجه، وزن خشک گیاه نیز کاهش می‌یابد (Ghorbani et al., 2017).

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای آزمایشی بر وزن خشک اندام‌های گیاهی و شاخص تحمل سورگوم علوفه‌ای

منابع تغییر	درجه آزادی	وزن خشک ریشه	وزن خشک شاخساره	شاخص تحمل
کادمیم	۴	۹/۱۷۵**	۲۳/۵۷۳**	۰/۲۷۹**
بیوچار	۱	۴/۰۰۸**	۴/۲۷۱**	۰/۰۵۰**
سودوموناس پوتیدا	۱	۴/۷۷۶**	۱۶/۳۴۱**	۰/۱۹۳**
کادمیم × بیوچار	۴	۰/۰۱۱ns	۰/۱۰۵*	۰/۰۰۱*
کادمیم × سودوموناس پوتیدا	۴	۰/۰۰۴ns	۰/۲۵۰**	۰/۰۰۲**
بیوچار × سودوموناس پوتیدا	۱	۰/۰۰۳ns	۰/۰۰۵ns	۰/۰۰۰۶ns
کادمیم × بیوچار × سودوموناس پوتیدا	۴	۰/۱۳۰**	۰/۲۰۹**	۰/۰۰۲**
خطای آزمایش	۶۰	۰/۰۲۸	۰/۰۳۲	۰/۰۰۰۳
ضریب تغییرات (%)		۶/۰۷۷	۲/۰۱۴	۲/۰۱

ns، \*، \*\* و \*\*\* به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم معنی‌داری.

جدول ۴. مقایسه میانگین برش‌دهی برهم‌کنش اثر تیمارهای آزمایشی بر وزن خشک اندام‌های گیاهی و شاخص تحمل سورگوم علوفه‌ای

کادمیم (mg.kg <sup>-1</sup> )	بیوچار	سودوموناس پوتیدا	وزن خشک ریشه (g plant <sup>-1</sup> )	وزن خشک شاخساره (g plant <sup>-1</sup> )	شاخص تحمل گیاه
صفر	عدم مصرف	عدم تلقیح	۳/۱۱b	۹/۱۹c	۱/۰۰c
	عدم مصرف	تلقیح	۳/۹۲a	۱۰/۸۲a	۱/۱۸a
	مصرف	عدم تلقیح	۳/۷۸a	۱۰/۲۱b	۱/۱۱b
	مصرف	تلقیح	۴/۰۳a	۱۱/۲۵a	۱/۲۲a
۲۵	عدم مصرف	عدم تلقیح	۲/۹۱c	۹/۱۱d	۰/۹۹d
	عدم مصرف	تلقیح	۳/۲۵b	۹/۹۳b	۱/۰۸b
	مصرف	عدم تلقیح	۳/۱۸b	۹/۴۵c	۱/۰۳c
	مصرف	تلقیح	۳/۸۱a	۱۰/۲۹a	۱/۱۲a
۵۰	عدم مصرف	عدم تلقیح	۲/۲۵c	۸/۵۲d	۰/۹۳d
	عدم مصرف	تلقیح	۲/۵۹b	۹/۲۱b	۱/۰۰b
	مصرف	عدم تلقیح	۲/۶۰b	۸/۸۹c	۰/۹۷c
	مصرف	تلقیح	۳/۲۴a	۹/۵۸a	۱/۰۴a
۷۵	عدم مصرف	عدم تلقیح	۱/۹۶c	۷/۰۵d	۰/۷۷d
	عدم مصرف	تلقیح	۲/۳۹b	۷/۸۴b	۰/۸۵b
	مصرف	عدم تلقیح	۲/۳۷b	۷/۴۰c	۰/۸۰c
	مصرف	تلقیح	۲/۸۲a	۸/۲۰a	۰/۸۹a
۱۰۰	عدم مصرف	عدم تلقیح	۱/۲۳c	۷/۱۸d	۰/۷۸d
	عدم مصرف	تلقیح	۱/۸۲b	۷/۷۰b	۰/۸۴b
	مصرف	عدم تلقیح	۱/۸۳b	۷/۳۳c	۰/۸۰c
	مصرف	تلقیح	۲/۲۳a	۸/۵۶a	۰/۹۳a

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

در این آزمایش در همه غلظت‌های کادمیم، کاربرد تلفیقی بیوچار و باکتری موجب افزایش معنی‌دار هر دو صفت وزن خشک ریشه و وزن خشک شاخساره شد (جدول ۴). در همین زمینه نتایج حاصل از پژوهشی حاکی از آن است که کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم در محیط کشت گیاه خردل سیاه (*Brassica nigra* L.) در مقایسه با شاهد موجب کاهش معنی‌دار وزن خشک ریشه و شاخساره شده است، در حالی که تلقیح باکتری‌هایی از جنس *آزوسپریلوم* و *سودوموناس* صفات مذکور را به طرز چشم‌گیری افزایش داده است (Barghi et al., 2020). اسید ایندول استیک مهم‌ترین نوع اکسین است که یکی از انواع مهم هورمون‌های محرک رشد به حساب می‌آید. باکتری‌های موجود در ریزوسفر توانایی بالایی در تولید این هورمون گیاهی دارند. ریشه‌های گیاهی حساس‌ترین قسمت گیاه در پاسخ به ترشح اکسین از طریق ریزجانداران است. بنابراین باکتری‌های دارای توانایی بالا در تولید این هورمون گیاهی موجب افزایش چشم‌گیر زیست‌توده این اندام گیاهی می‌شود و در نتیجه منجر به رشد بیش‌تر گیاه در شرایط تنش‌زا می‌شود (Soltani Toolarood et al., 2019).

در این آزمایش نتایج نشان می‌دهد کم‌ترین میزان وزن خشک شاخساره (۷/۰۵ گرم در بوته) مربوط به تیمار عدم مصرف بیوچار، عدم تلقیح باکتری و غلظت ۷۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک بوده است، در حالی که بیش‌ترین مقدار وزن خشک شاخساره گیاه سورگوم (۱۱/۲۵ گرم در بوته) مربوط به تیمار مصرف بیوچار، تلقیح باکتری و بدون حضور کادمیم است. بیش‌ترین وزن خشک ریشه ۴/۰۳ گرم در بوته می‌باشد که در تیمار هم‌افزایی بیوچار و باکتری و غیاب کادمیم مشاهده شد که ۲۹/۵۸ درصد نسبت به شاهد خود افزایش معنی‌داری داشته است (جدول ۴). استفاده از بیوچار در خاک به دلیل افزایش عناصر غذایی کم‌مصرف و پرمصرف مانند فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، سدیم، روی، آهن و نیتروژن، تامین ماده آلی خاک، بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک خاک و همچنین فراهمی آب در خاک می‌تواند موجب افزایش زیست‌توده شود (Valizadeh Ghale Beig et al., 2020).

### ۲.۳. شاخص تحمل

شاخص تحمل گیاه سورگوم با افزایش غلظت کادمیم کاهش یافت و کم‌ترین میزان شاخص تحمل (۰/۷۷) در غلظت ۷۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و عدم مصرف بیوچار و عدم تلقیح باکتری مشاهده شد (جدول ۴). نتایج مطالعه‌ای حاکی از آن است که شاخص تحمل گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) در حضور کادمیم کاهش می‌یابد (Nazarian et al., 2016). نتایج این آزمایش نشان می‌دهد در همه غلظت‌های کادمیم، مصرف بیوچار، تلقیح باکتری و همچنین کاربرد هم‌زمان بیوچار و *سودوموناس پوتیدا* سبب افزایش معنی‌دار شاخص تحمل شد. بیش‌ترین شاخص تحمل (۱/۲۲) در زمان بدون آلودگی کادمیم همراه با کاربرد تلفیقی بیوچار و باکتری بود که نسبت به عدم مصرف بیوچار و عدم تلقیح باکتری ۲۲ درصد افزایش معنی‌داری یافت (جدول ۴). هنگامی که تیمارها بر رشد گیاه تأثیری نداشته باشند، شاخص تحمل گیاه برابر با یک است. درجه تحمل گیاه نسبت به شرایط تنش به سه دسته تحمل بالا (بزرگ‌تر از ۰/۶۰)، تحمل متوسط (۰/۶۰ - ۰/۳۵) و حساس (کوچک‌تر از ۰/۳۵) تقسیم می‌شود (Lux et al., 2004). در این مطالعه شاخص تحمل گیاه سورگوم علوفه‌ای در همه غلظت‌های کادمیم بزرگ‌تر از ۰/۶۰ است، لذا می‌توان این گیاه را در گروه تحمل بالا نسبت به تنش فلز سنگین کادمیم دسته‌بندی کرد.

### ۳.۳. غلظت کادمیم قابل استفاده خاک، ریشه و شاخساره

تأثیر همه عوامل آزمایشی و اثر متقابل بین آن‌ها، بر غلظت کادمیم قابل استفاده در خاک، ریشه و شاخساره در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۵). با توجه به نتایج جدول (۶) مشاهده شد که با افزایش غلظت کادمیم از صفر تا ۱۰۰

میلی گرم کادمیم در کیلوگرم خاک، میزان کادمیم قابل استفاده در خاک، ریشه و شاخساره روند افزایشی داشته است. در حالی که در همه غلظت‌ها، کاربرد بیوچار موجب کاهش معنی‌دار میزان کادمیم در خاک، ریشه و شاخساره شد. در مقابل، تلقیح باکتری و هم‌چنین کاربرد تلفیقی بیوچار و سودوموناس پوتیدا موجب افزایش معنی‌دار کادمیم در خاک و هر دو بخش اندام‌های گیاهی سورگوم شد.

جدول ۵. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای آزمایشی بر میزان غلظت کادمیم خاک، ریشه و شاخساره سورگوم علوفه‌ای

منابع تغییر	درجه آزادی	غلظت کادمیم قابل استفاده در خاک	غلظت کادمیم در ریشه	غلظت کادمیم در شاخساره
کادمیم	۴	۳۰۹/۵۱**	۳۹۴/۴۹**	۴۹۷/۸۳**
بیوچار	۱	۱/۲**	۱/۳۶**	۱/۲۳**
سودوموناس پوتیدا	۱	۲۱۱/۷۰**	۲۱۵/۲۳**	۲۵۹/۶۱**
کادمیم × بیوچار	۴	۰/۴۵**	۱/۳۳**	۰/۵۰**
کادمیم × سودوموناس پوتیدا	۴	۱۳/۳۳**	۱۵/۳۴**	۱۹/۰۴**
بیوچار × سودوموناس پوتیدا	۱	۵۳/۴۹**	۵۸/۸۹**	۶۰/۳۳**
کادمیم × بیوچار × سودوموناس پوتیدا	۴	۳/۸۰**	۵/۱۸**	۴/۱۱**
خطای آزمایش	۶۰	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۱
ضرب تغییرات (%)		۲/۴۳	۳/۹۷	۱/۴۳

\*\* و ns: به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد و عدم معنی‌داری.

جدول ۶. مقایسه میانگین برش‌دهی برهم‌کنش اثر تیمارهای آزمایشی بر میزان غلظت کادمیم خاک، ریشه و شاخساره سورگوم علوفه‌ای ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

کادمیم ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	بیوچار	سودوموناس پوتیدا	غلظت کادمیم قابل استفاده در خاک ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	غلظت کادمیم در ریشه ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	غلظت کادمیم در شاخساره ( $\text{mg kg}^{-1}$ )
صفر	عدم مصرف	عدم تلقیح	۰/۰۰۲c	۰/۰۰۲c	۰/۰۰۳c
	عدم مصرف	تلقیح	۰/۰۰۳b	۰/۰۰۳b	۰/۰۰۴b
	مصرف	عدم تلقیح	۰/۰۰۱d	۰/۰۰۱d	۰/۰۰۱d
	مصرف	تلقیح	۰/۰۰۵a	۰/۰۰۴a	۰/۰۰۵a
۲۵	عدم مصرف	عدم تلقیح	۵/۲۴۴c	۳/۳۵۶c	۶/۵۰۲c
	عدم مصرف	تلقیح	۷/۳۳۳b	۵/۲۲۵b	۹/۶۰۴b
	مصرف	عدم تلقیح	۳/۵۹۰d	۲/۱۵۸d	۳/۸۵۴d
	مصرف	تلقیح	۹/۲۵۰a	۷/۶۸۱a	۱۲/۹۳۷a
۵۰	عدم مصرف	عدم تلقیح	۶/۰۱۹c	۴/۱۱۳c	۷/۱۰۹c
	عدم مصرف	تلقیح	۸/۴۴۶b	۶/۵۵۴b	۱۲/۱۹۰b
	مصرف	عدم تلقیح	۴/۸۹۱d	۲/۲۱۵d	۴/۹۸۹d
	مصرف	تلقیح	۱۰/۵۹۱a	۹/۲۰۲a	۱۵/۶۹۷a
۷۵	عدم مصرف	عدم تلقیح	۸/۶۶۸c	۱۰/۲۲۰c	۱۶/۰۶۰c
	عدم مصرف	تلقیح	۱۰/۳۴۰b	۱۳/۵۲۰b	۱۹/۶۶۵b
	مصرف	عدم تلقیح	۶/۲۶۲d	۶/۶۴۶d	۱۰/۵۷۶d
	مصرف	تلقیح	۱۲/۵۵۷a	۱۷/۶۵۵a	۲۵/۰۹۲a
۱۰۰	عدم مصرف	عدم تلقیح	۱۰/۳۶۹c	۱۲/۷۲۰c	۱۸/۶۱۹c
	عدم مصرف	تلقیح	۱۲/۲۷۰b	۱۶/۴۰۹b	۲۵/۴۱۶b
	مصرف	عدم تلقیح	۸/۶۱۰d	۸/۹۲۰d	۱۳/۸۶۶d
	مصرف	تلقیح	۱۵/۳۹۵a	۲۴/۸۵۸a	۳۵/۶۰۶a

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند، براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.



کم‌ترین غلظت کادمیم قابل استفاده در خاک (۰/۰۰۱ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) در خاک عاری از کادمیم و مصرف بیوجار مشاهده شد. در حالی که، بیش‌ترین غلظت کادمیم قابل استفاده در خاک (۱۵/۳۹۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک) در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و با کاربرد تلفیقی بیوجار و باکتری مشاهده شد که نسبت به شاهد ۴۸/۴۷ درصد افزایش یافته است. درحالی‌که کم‌ترین غلظت کادمیم در ریشه و شاخساره (۰/۰۰۱ میلی‌گرم در کیلوگرم) در خاک غیرآوده و تیمار مصرف بیوجار مشاهده شد که نسبت به شاهد ۵۰ و ۶۶/۶۶ درصد به‌ترتیب کاهش داشته‌اند. بیش‌ترین غلظت کادمیم در ریشه و شاخساره (به‌ترتیب ۲۴/۸۵۸ و ۳۵/۶۰۶ میلی‌گرم در کیلوگرم) در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و تیمار هم‌افزایی بیوجار و سودوموناس پوتیدا مشاهده شد که نسبت به تیمار عدم مصرف بیوجار و عدم تلقیح باکتری به‌ترتیب ۹۵ و ۹۱/۲۳ درصد افزایش یافته‌اند (جدول ۶). کاهش قابل‌توجه غلظت فلزات سنگین در شاخساره گیاهان رشد یافته در خاک‌های اصلاح‌شده توسط بیوجار را می‌توان به بی‌حرکتی فلزات موجود و اثر رقیق‌سازی در نتیجه افزایش زیست‌توده گیاهان نسبت داد (Al-Wabel et al., 2015).

#### ۴.۳. فاکتور تجمع زیستی ریشه و شاخساره

در جدول (۷) مشاهده می‌شود همه اثرات عوامل آزمایشی به‌جز اثر ساده سودوموناس پوتیدا و اثر دوگانه بیوجار× سودوموناس پوتیدا بر فاکتور تجمع زیستی ریشه در سطح یک درصد معنی‌دار شده است. هم‌چنین تمام اثرات تیمارهای آزمایشی بر صفت فاکتور تجمع زیستی شاخساره در سطح یک درصد معنی‌دار شده‌اند. جدول (۸) نشان می‌دهد افزایش غلظت کادمیم موجب افزایش فاکتور تجمع زیستی شاخساره در گیاه سورگوم شد. فاکتور تجمع زیستی ریشه و شاخساره از غلظت ۲۵ تا ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک روند افزایشی داشت. در همه غلظت‌ها، فاکتور تجمع زیستی ریشه با مصرف بیوجار کاهش یافت. هم‌چنین، با کاربرد بیوجار فاکتور تجمع زیستی شاخساره نیز در همه غلظت‌ها به‌جز شاهد، کاهش یافت. کم‌ترین فاکتور تجمع زیستی ریشه (۰/۴۵) در غلظت ۵۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و در تیمار مصرف بیوجار و عدم تلقیح سودوموناس پوتیدا مشاهده شد. در مقابل، بیش‌ترین فاکتور تجمع زیستی ریشه (۱/۲۵) در خاک بدون آلودگی و در تیمار عدم مصرف بیوجار و عدم تلقیح سودوموناس پوتیدا مشاهده شد. کم‌ترین فاکتور تجمع زیستی شاخساره (۱/۰۰) در خاک بدون کادمیم و در تیمارهای مصرف بیوجار و تلقیح سودوموناس پوتیدا و کاربرد تلفیقی بیوجار و سودوموناس پوتیدا مشاهده شد. در حالی‌که، بیش‌ترین فاکتور تجمع زیستی شاخساره (۲/۳۱) در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و در تیمار کاربرد هم‌زمان بیوجار و سودوموناس پوتیدا مشاهده شد که نسبت به شاهد ۲۸/۳۳ درصد افزایش معنی‌داری داشته است.

جدول ۷. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای آزمایشی بر صفات مرتبط با قابلیت گیاه پالایی سورگوم علوفه‌ای

منابع تغییر	درجه آزادی	فاکتور تجمع زیستی ریشه	فاکتور تجمع زیستی شاخساره	فاکتور انتقال	جذب کادمیم در شاخساره
کادمیم	۴	۰/۷۴۴**	۰/۷۳۲**	۰/۰۴۳**	۰/۰۲۸۵**
بیوجار	۱	۰/۰۸۶**	۰/۱۷۸**	۰/۰۰۰۷ns	۰/۰۰۰۷**
سودوموناس پوتیدا	۱	۰/۰۲۵ns	۰/۰۰۸**	۰/۰۳۵ns	۰/۰۲۷۱**
کادمیم×بیوجار	۴	۰/۰۷۰**	۰/۱۳۶**	۰/۰۶۷**	۰/۰۰۰۱**
کادمیم×سودوموناس پوتیدا	۴	۰/۰۴۵**	۰/۰۴۲**	۰/۰۳۷**	۰/۰۰۱۹**
بیوجار×سودوموناس پوتیدا	۱	۰/۰۱۷ns	۰/۰۰۱۷**	۰/۰۰۴ns	۰/۰۰۵۴**
کادمیم×بیوجار×سودوموناس پوتیدا	۴	۰/۰۲۲**	۰/۰۲۹**	۰/۰۴۸**	۰/۰۰۰۴**
خطای آزمایش	۶۰	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۰۱
ضریب تغییرات (%)		۹/۵۶	۲/۲۱	۸/۴۶	۲/۱۹

\*\* و ns: به‌ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد و عدم معنی‌داری.

جدول ۸. مقایسه میانگین برش‌دهی برهم‌کنش اثر تیمارهای آزمایشی بر صفات مرتبط با قابلیت گیاه‌پالایی سورگوم علوفه‌ای

کادمیم (mg.kg <sup>-1</sup> )	بیوچار	سودوموناس پوتیدا	فاکتور تجمع زیستی ریشه	فاکتور تجمع زیستی شاخساره	فاکتور انتقال	جذب کادمیم در شاخساره (mg cd plant <sup>-1</sup> )
صفر	عدم مصرف	عدم تلقیح	۱/۲۵a	۱/۵۰a	۱/۲۵a	-/۰۰۰۰۰۲۷c
	عدم مصرف	تلقیح	۱/۱۷ab	۱/۳۳b	۱/۱۷a	-/۰۰۰۰۰۴۳b
	مصرف	عدم تلقیح	۱/۰۰ab	۱/۰۰c	۱/۰۰a	-/۰۰۰۰۰۱۰d
	مصرف	تلقیح	-/۰۹۰b	۱/۰۰c	۱/۱۲a	-/۰۰۰۰۰۵۶a
۲۵	عدم مصرف	عدم تلقیح	-/۰۶۴c	۱/۲۰c	۱/۹۴a	-/۰۵۹۲۴۳c
	عدم مصرف	تلقیح	-/۰۷۱b	۱/۳۱b	۱/۸۴ab	-/۰۹۵۳۵۳b
	مصرف	عدم تلقیح	-/۰۶۰d	۱/۰۷d	۱/۷۹bc	-/۰۲۶۴۰۵d
	مصرف	تلقیح	-/۰۸۳a	۱/۴۰a	۱/۶۸c	-/۱۳۳۱۶۸a
۵۰	عدم مصرف	عدم تلقیح	-/۰۶۸c	۱/۱۸b	۱/۷۳b	-/۰۶۰۵۸۰c
	عدم مصرف	تلقیح	-/۰۷۸b	۱/۴۴a	۱/۸۶b	-/۱۱۲۲۸۳b
	مصرف	عدم تلقیح	-/۰۴۵d	۱/۰۲c	۲/۲۷a	-/۰۴۴۳۵۴d
	مصرف	تلقیح	-/۰۸۷a	۱/۴۸a	۱/۷۰b	-/۱۵۰۳۵۹a
۷۵	عدم مصرف	عدم تلقیح	۱/۱۸c	۱/۸۵b	۱/۵۷a	-/۱۱۳۳۱۱c
	عدم مصرف	تلقیح	۱/۳۱b	۱/۹۰b	۱/۴۵b	-/۱۵۴۱۶۵b
	مصرف	عدم تلقیح	۱/۰۶d	۱/۶۹c	۱/۵۹a	-/۰۷۸۳۰۸d
	مصرف	تلقیح	۱/۴۱a	۲/۰۰a	۱/۴۲b	-/۲۰۵۷۱۲a
۱۰۰	عدم مصرف	عدم تلقیح	۱/۲۳b	۱/۸۰c	۱/۴۶a	-/۱۳۳۶۹۹c
	عدم مصرف	تلقیح	۱/۳۳b	۲/۰۷b	۱/۵۸a	-/۱۹۵۶۸۲b
	مصرف	عدم تلقیح	۱/۰۴c	۱/۶۱d	۱/۵۶a	-/۱۰۱۷۰۳d
	مصرف	تلقیح	۱/۶۱a	۲/۳۱a	۱/۴۳a	-/۳۰۴۹۶۴a

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند، براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

در آزمایشی مشاهده شد که افزایش سطح کادمیم و سرب موجب افزایش تجمع زیستی این دو عنصر در گیاه ذرت (*Zea mays* L.) شده است، در حالی که کاربرد بیوچار باگاس نیشکر در مقایسه با شاهد تجمع زیستی را به‌طور معنی‌داری کاهش داد (Biria et al., 2017). بیوچار دارای گروه‌های عاملی فراوانی مانند گروه‌های کربوکسیلاتی و هیدروکسیلی است و توان تعامل الکترواستاتیک، تبادل یونی و کمپلکس سطحی بالایی با فلزات سنگین دارد. بنابراین، بیوچار موجب تثبیت کادمیم و افزایش غلظت کادمیم غیرقابل جذب در خاک و در نهایت کاهش غلظت این عنصر در اندام هوایی و در نتیجه کاهش تجمع زیستی آن می‌شود (Khare et al., 2013).

در این آزمایش تلقیح باکتری در غلظت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک به‌ترتیب موجب افزایش ۹/۱۶، ۲۲/۰۳ و ۱۵ درصدی فاکتور تجمع زیستی شاخساره سورگوم شد. کاربرد تلفیقی بیوچار و سودوموناس پوتیدا در همه غلظت‌ها به‌جز شاهد موجب افزایش فاکتور تجمع زیستی ریشه و شاخساره شده است. بیش‌ترین مقدار فاکتور تجمع زیستی ریشه و شاخساره (به‌ترتیب ۱/۶۱ و ۲/۳۱) در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و تیمار مصرف هم‌زمان بیوچار و سودوموناس پوتیدا مشاهده شد که نسبت به تیمار عدم مصرف بیوچار و عدم تلقیح باکتری در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک به‌ترتیب ۲۰/۱۳ و ۱۹/۶۰ درصد کاهش یافته است. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد تلقیح باکتریایی می‌تواند به افزایش توانایی گیاه‌پالایی سورگوم کمک کند. فاکتور تجمع زیستی شاخساره در صورت استفاده از بیوچار در تمامی غلظت‌ها بالاتر از یک است، در صورتی که در غلظت‌های پایین کادمیم (۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، فاکتور تجمع زیستی ریشه پایین‌تر از یک است (جدول ۸). گیاهانی که مقادیر فاکتور انتقال و فاکتور تجمع زیستی آن‌ها بیش از یک است، توانایی استفاده در فرایند گیاه‌پالایی را دارند (Herlina et al., 2020).

همچنین با توجه به این که میزان فاکتور تجمع زیستی شاخساره در همه غلظت‌ها و مقدار فاکتور تجمع زیستی ریشه در غلظت‌های بالا، بیش‌تر از یک است می‌توان گفت که گیاه سورگوم برای گیاه‌پالایی می‌تواند مناسب باشد.

### ۵.۳. فاکتور انتقال

فاکتور انتقال گیاه از تقسیم‌کردن میزان غلظت فلزات سنگین در شاخساره به میزان غلظت آن فلز در ریشه به‌دست می‌آید. فاکتور انتقال در حقیقت نمایان‌گر این است که فلز یا شبه‌فلز مورد نظر در کدام بخش از گیاه (ریشه یا شاخساره) تجمع بیش‌تری یافته است. معمولاً در گیاهانی که برای فرایند گیاه‌پالایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، غلظت عنصر در شاخساره گیاه در مقایسه با ریشه بیش‌تر است (Ostovar et al., 2012). نتایج جدول (۷) نشان می‌دهد اثر ساده کادمیم بر فاکتور انتقال در سطح یک درصد معنی‌دار شده است، درحالی‌که اثر ساده بیوجار و سودوموناس پوتیدا بر این صفت اثر معنی‌داری نداشتند. اثر متقابل کادمیم و بیوجار و اثر متقابل کادمیم و سودوموناس پوتیدا در سطح یک درصد معنی‌دار شدند. درحالی‌که، اثر متقابل بیوجار و سودوموناس پوتیدا اثر معنی‌داری نداشتند. فاکتور انتقال گیاه سورگوم تا غلظت ۵۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک روند افزایشی داشته و در ادامه کاهش یافت. فاکتور انتقال از نسبت غلظت فلز کادمیم در شاخساره بر غلظت فلز کادمیم در ریشه به‌دست می‌آید. کم‌ترین فاکتور انتقال گیاه سورگوم (۱/۰۰۰) مربوط به تیمار عدم مصرف بیوجار، عدم تلقیح سودوموناس پوتیدا و بدون آلودگی کادمیم بود که نسبت به شاهد ۲۰ درصد کاهش یافت. بیش‌ترین فاکتور انتقال (۱/۹۴) در غلظت ۲۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و تیمار عدم مصرف بیوجار و عدم تلقیح سودوموناس پوتیدا مشاهده شد (جدول ۸).

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 ویژگی یکی از ویژگی‌های گیاهان بیش‌اندوز محسوب می‌شود. بنابراین فاکتور انتقال بزرگ‌تر از یک عامل تعیین‌کننده‌ای برای دسته‌بندی گونه‌های گیاهی برای فرایند گیاه‌پالایی است (Antoniadis et al., 2017). در این آزمایش فاکتور انتقال گیاه سورگوم علوفه‌ای در تمام سطوح آلودگی بزرگ‌تر از یک بود، بنابراین می‌توان این گیاه را یک گیاه بیش‌اندوز و مناسب برای فناوری گیاه‌پالایی در نظر گرفت.

### ۶.۳. جذب کادمیم در شاخساره

میزان جذب هر فلز در شاخساره از حاصل ضرب 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 (Kos et al., 2003). نتایج این آزمایش نشان داد که تمامی اثرات ساده، دوگانه و سه‌گانه عوامل آزمایشی بر میزان جذب کادمیم در شاخساره اثر معنی‌داری در سطح یک درصد داشتند (جدول ۷). با توجه به جدول (۸)، شاخص جذب با بالارفتن غلظت کادمیم یک سیر صعودی را طی می‌کند. تلقیح باکتری و هم‌زیستی بیوجار و سودوموناس پوتیدا موجب افزایش میزان جذب در شاخساره گیاه سورگوم شد، درحالی‌که با کاربرد بیوجار در همه غلظت‌ها به‌جز شاهد میزان جذب کاهش یافت. به‌طوری‌که کم‌ترین میزان جذب کادمیم (۰/۰۰۰۱۰ میلی‌گرم در شاخساره) مربوط به تیمار مصرف بیوجار، عدم تلقیح سودوموناس پوتیدا و بدون آلودگی کادمیم بود که نسبت به شاهد خود ۹۶/۶۲ درصد کاهش یافت. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که برخی از باکتری‌های مفید و محرک رشد، با انجام مکانیسم‌هایی می‌توانند جذب فلزات را در گیاه افزایش دهند. جذب فلز ممکن است توسط باکتری‌ها از طریق تولید سیدروفور افزایش یابد که آهن را آزاد و تحرک

سایر فلزات سنگین را در خاک میسر می‌سازد. همچنین برخی از باکتری‌ها به‌واسطه تولید آنزیم ACC-دآمیناز که از تنش اتیلن جلوگیری می‌کند، اثرات فلزات سنگین را در بافت‌های گیاهی کاهش می‌دهند، بنابراین می‌توان گفت هم‌زیستی گیاه و باکتری می‌تواند کارایی گیاه‌پالایی را افزایش دهد (Motesharezadeh & Savaghebi, 2011).

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش مشخص شد تنش کادمیم موجب کاهش زیست‌توده می‌شود، اما افزودن بیوچار و تلقیح باکتریایی با افزایش زیست‌توده می‌تواند رشد گیاه در شرایط تنش را تسهیل کند. از آنجایی که کاربرد بیوچار، موجب کاهش غلظت کادمیم در خاک، ریشه و شاخساره و همچنین کاهش جذب کادمیم در شاخساره می‌شود، می‌توان از این اصلاح‌کننده آلی خاک به‌عنوان تثبیت گیاهی که یکی از اشکال گیاه‌پالایی است، استفاده نمود. حال آن‌که، تلقیح باکتریایی با افزایش زیست‌توده اندام‌های گیاهی، غلظت فلز کادمیم در خاک، ریشه و شاخساره، فاکتور تجمع زیستی ریشه و شاخساره و همچنین جذب کادمیم در شاخساره می‌تواند به‌عنوان یک عامل مهم در افزایش کارایی فناوری گیاه‌پالایی در نظر گرفته شود. گیاه سورگوم علوفه‌ای با دارابودن شاخص تحمل و فاکتور انتقال بالا می‌تواند یکی از گونه‌های گیاهی مؤثر در فرایند گیاه‌پالایی محسوب شود. علاوه‌براین، کاربرد تلفیقی بیوچار و *سودوموناس پوتیدا* با افزایش وزن خشک ریشه، وزن خشک شاخساره و شاخص تحمل موجب افزایش کارایی گیاه‌پالایی می‌شود. از آنجاکه شاخص تحمل گیاه سورگوم علوفه‌ای در همه غلظت‌های کادمیم بزرگ‌تر از ۰/۶۰ بود، لذا می‌توان این گیاه را در گروه تحمل بالا نسبت به تنش فلز سنگین کادمیم دسته‌بندی کرد و از سورگوم جهت گیاه‌پالایی کادمیم بهره جست. همچنین فاکتور انتقال بزرگ‌تر از یک در سورگوم علوفه‌ای نشان می‌دهد این گیاه را می‌توان به‌عنوان یک گیاه بیش‌اندوز و مناسب برای فناوری گیاه‌پالایی در نظر گرفت.

#### ۵. تشکر و قدردانی

از مسئولین آزمایشگاه مرکزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به‌سبب همکاری در انجام بخشی از این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

#### ۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

#### ۷. منابع مورد استفاده

- Al-Wabel, M. I., Usman, A. R. A., El-Naggar, A. H., Aly, A. A., Ibrahim, H. M., Elmaghraby, S., & Al-Omran, A. (2015). *Conocarpus* biochar as a soil amendment for reducing heavy metal availability and uptake by maize plants. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22, 503-511. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.003>
- Alzahrani, Y., Alharby, H. F., Hakeem, K. R., & Alsamadany, H. (2020). Modulating effect of EDTA and SDS on growth, biochemical parameters and antioxidant defense system of *Dahlia variabilis* grown under cadmium and lead-induced stress. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48(2), 906-923. <http://doi.org/10.15835/nbha48211909>
- Amjad Khan, M., Khan, S., Khan, A., & Alam, M. (2017). Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Science of the Total Environment*, 601-602, 1591-1605. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.030>

- Antoniadis, V., Levizou, E., Shaheen, S. M., Sik Ok, Y., 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.005>
- Aricak, B., Cetin, M., Erdem, R., Sevik, H., & Cometen, H. (2020). The usability of Scotch pine (*Pinus sylvestris*) as a biomonitor for traffic-originated heavy metal concentrations in Turkey. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(2), 1-7. <http://doi.org/10.15244/pjoes/109244>
- Barghi, A., Gholipoori, A., Ghavidel, A., & Sedghi, M. (2020). Changes in seed oil yield and its components of black mustard (*Brassica nigra* L.) as affected by rhizobacteria and growth regulators under cadmium stress conditions. *Journal of Crop Ecophysiology*, 13(4), 555-570. (In Persian)
- Biria, M., Moezzi, A. A., & AmeriKhah, H. (2017). Effect of sugarcane bagasse made biochar on maize plant growth, grown in lead and cadmium contaminated soil. *Journal of Water and Soil*, 31(2), 609-626. (In Persian)
- Catav, S. S., Genc, T. O., Oktay, M. K., & Kucukakyuz, K. (2020). Cadmium toxicity in wheat: Impacts on element contents, antioxidant enzyme activities, oxidative stress, and genotoxicity. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 104, 71-77. <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02745-4>
- Cluis, C. (2004). Junk-greedy greens: phytoremediation as a new option for soil decontamination. *Journal of Biotechnology*, 2, 60-67. Retrieved from <http://www.bioteach.ubc.ca>
- Ghorbani, M., Karimian, N. A., & Zarei, M. (2017). Influence of liquid organic fertilizer on growth, cadmium and macronutrients uptake of Spinach (*Spinacea oleracea* L.) in a cadmium polluted soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 42(3), 235-249. (In Persian)
- Han, T., Zhao, Z., Bartlam, M., & Wang, Y. (2016). Combination of biochar amendment and phytoremediation for hydrocarbon removal in petroleum-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 21219-21228. <http://doi.org/10.1007/s11356-016-7236-6>
- He, L., Zhong, H., Liu, G., Dai, Z., Brookes, P. C., & Xu, J. (2019). Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: Mechanisms, potential risks and applications in China. *Environmental Pollution*, 252, 846-855. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.151>
- Herlina, L., Widianarko, B., & Sunoko H. R. (2020). Phytoremediation potential of *Cordyline fruticosa* for lead contaminated soil. *Journal Pendidikan IPA Indonesia*, 9(1), 42-49. <http://journal.unnes.ac.id/index.php/jpii>
- Hesse, C., Schulz, F., Bull, C. T., Shaffer, B. T., Yan, Q., Shapiro, N., Hassan, K. A., Varghese, N., Elbourne, L. D. H., Paulsen, I. T., Kyrpides, N., Woyke, T., & Loper, J. E. (2018). Genome-based evolutionary history of *Pseudomonas* spp. *Environmental Microbiology*, 20(6), 2142-2159. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.14130>
- Hou, X., Teng, W., Hu, Y., Yang, Z., Li, C., Scullion, J., Guo, Q., & Zheng R. (2020). Potential phytoremediation of soil cadmium and zinc by diverse ornamental and energy grasses. *BioResources*, 15(1), 616-640. <http://doi.org/10.15376/biores.15.1.616-640>
- Hussain, F., Hussain, I., Ali Khan, A. H., Muhammad, Y. S., Iqbal, M., Soja, G., Reichenauer, T. G., Zeshan., & Yousaf, S. (2018). Combined application of biochar, compost, and bacterial consortia with Italian ryegrass enhanced phytoremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil. *Environmental and Experimental Botany*, 153, 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.012>
- Kapur, D., & Singh, K. J. (2019). Zinc alleviates cadmium induced heavy metal stress by stimulating antioxidative defense in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] crop. *Journal of Applied and Natural Science*, 11(2), 338-345. <http://doi.org/10.31018/jans.v11i2.2054>
- Kaur, A., & Kumar, P. (2020). Effect of biofertilizers on the plant height and leaf area in *Sorghum vulgare* grown under lead toxic soil. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(4), 1707-1712. Retrieved from <http://www.phytojournal.com>

- Khare, P., Dilshad, U., Rout, P. K., Yadav, V., & Jain, S. (2013). Plant refuses driven biochar: Application as metal adsorbent from acidic solutions. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, 3054-3063. <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.11.047>
- Kos, B., Grcman, H., & Lestan, D. (2003). Phytoextraction of lead, zinc and cadmium from soil by selected plants. *Plant and Soil Environmental*, 49, 548-553. <https://doi.org/10.17221/4192-PSE>
- Kumar, A., Kumar, R., Kumari, M., & Goldar, S. (2020). Enhancement of plant growth by using PGPR for a sustainable agriculture: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(2), 152-165. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.902.019>
- 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. *Plant Physiology*, 120, 537-545. <http://doi.org/10.1111/j.0031-9317.2004.0275.x>
- Ma, L. Q., Komar, K. M., Tu, C., Zhang, W., Cai, Y., & Kenelly, E. D. (2001). A fern that hyper accumulates arsenic. *Nature*, 409, 579-582. <https://doi.org/10.1038/35054664>
- Ma, Q. J., Sun, M. H., Lu, J., Hu, D. G., Kang, H., You, C. X., & Hao, Y. J. (2020). Phosphorylation of a malate transporter promotes malate excretion and reduces cadmium uptake in apple. *Journal of Experimental Botany*, 71(12), 3437-3449. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa121>
- Mohammed Ali, A. S., Ahmed, H. A. M., Emara, H. A. E., Janjua, M. N., & Alhafez, N. (2019). Estimation and bio-availability of toxic metals between soils and plants. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(1), 15-24. <http://doi.org/10.15244/pjoes/81690>
- Motesharezadeh, B., & Savaghebi, GH. (2011). Study of sunflower plant response to cadmium and lead toxicity by usage of PGPR in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil*, 25(5), 1069-1079. (In Persian)
- Nazarian, H., Amouzgar, D., & Sedghianzadeh, H. (2016). Effects of different concentrations of cadmium on growth and morphological changes in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Pakistan Journal of Botany*, 48(3), 945-952. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.11.1584>
- Piacentini, D., Ronzan, M., Fattorini, L., DellaRovere, F., Massimi, L., Altamura, M. M., & Falasca, G. (2020). Nitric oxide alleviates cadmium- but not arsenic-induced damages in rice roots. *Plant Physiology and Biochemistry*, 151, 729-742. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.004>
- Pidlisnyuk, V., Mamirova, A., Pranaw, K., Shapoval, P. Y., Trogl, J., & Nurzhanova, A. (2020). Potential role of plant growth-promoting bacteria in *Miscanthus x giganteus* phytotechnology applied to the trace elements contaminated soils. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 155, 105103-105113. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105103>
- Schuuck, M., & Greger, M. (2020). Plant traits related to the heavy metal removal capacities of wetland plants. *International Journal of Phytoremediation*, 22(4), 427-435. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1669529>
- Soltani Toolarood, A. S., Eivazi Nay, M., Ghavidel, A., Abbaszadeh Dehaji, P., & Goli Kalanpa, E. (2019). Isolation, screening and evaluation of plant growth stimulating traits of Cd and Pb resistant microorganisms. *Applied Soil Research*, 7(3), 111-123. (In Persian)
- Tsuboi, K., Shehzad, T., Yoneda, J., Uraguchi, S., Ito, Y., Shinsei, L., Morita, S., Rai, H., Nagasawa, N., Asari, K., Suzuki, H., Itoh, R., Saito, T., Suzuki, K., Takano, I., Takahashi, H., Sakurai, K., Watanabe, A., Akagi, H., Tokunaga, T., Itoh, M., Hattori, H., Fujiwara, T., Okuno, K., Tsutsumi, N., & Satoh-Nagasawa, N. (2017). Genetic analysis of cadmium accumulation in shoots of sorghum landraces. *Crop Science*, 57(1), 22-31. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.01.0069>
- Ur Rahman, S. H., Qi, X., Zhang, Z., Ashraf, M. N., Du, Z., Zhong, Y. L., Mehmood, F., Ur Rahman, S., & Shehzad, M. (2020). The effect of silicon foliar and root application on growth, physiology, and antioxidant enzyme activity of wheat plants under cadmium toxicity. *Applied Ecology and Environmental Research*, 18(2), 3349-3371. [http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1802\\_33493371](http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1802_33493371)
- 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). *Science and Technology of Greenhouse Culture*, 10(4), 21-35. (In Persian)

- Volke, D.C., Calero, P., & Nickel, P. I. (2020). *Pseudomonas putida*. *Trends in Microbiology*, 28(16), 512-513. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2020.02.015>
- Wu, J., Kamal, N., Hao, H., Qian, C., Liu, Z., Shao, Y., Zhong, X., & Xu, B. (2019). Endophytic *Bacillus megaterium* BM18-2 mutated for cadmium accumulation and improving plant growth in hybrid *Pennisetum*. *Biotechnology Reports*, 24, 374-382. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00374>
- Zhang, W. H., Cai, Y., Tu, C., & Ma, Q. L. (2002). Arsenic speciation and distribution in an arsenic hyperaccumulating plant. *Environmental Science*, 30, 167-177. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00165-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00165-1)