

## Evaluating the Effect of Organic Amendment and Growth-Promoting Bacteria in the Phytoremediation Process of Maize (*Zea mays* L.) under Cadmium Heavy Metal Stress

Fatemeh Delavarniai<sup>1</sup>, Faezeh Zaefarian<sup>2\*</sup>, Roghayeh Hasanpour<sup>3</sup>, Hematollah Pirdashti<sup>4</sup>

Received: January 10, 2021 Accepted: May 24, 2021

1-MSc Student of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

2-Assoc. Prof., of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

3-Graduated Ph.D Student of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

4-Prof., of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

\*Corresponding Author Email: fa\_zaefarian@yahoo.com

### Abstract

**Objective & Background:** This experiment was performed to evaluate the effect of organic amendment and growth-promoting bacteria on phytoremediation of maize under cadmium (Cd) stress.

**Materials & Methods:** This experiment was performed in the form of factorial in a completely randomized design with 4 replications. Experimental factors were: 1- biochar as a soil organic amendment at two levels (non-application and application (20 g.kg<sup>-1</sup> soil), 2- *Pseudomonas putida* at two levels (non-inoculation and inoculation of bacteria) and 3- heavy metal levels (0, 25, 50, 75 and 100 mg Cd. Kg<sup>-1</sup> soil).

**Results:** Cadmium in all concentrations had reduced the dry weight of roots and shoots, while biochar application and bacterial inoculation increased these traits; when the maximum shoot dry weight (9.43 g per plant) was observed by biochar application and inoculation of *Pseudomonas putida* and no cadmium contamination, which increased 45.30% compared to the control. The highest amount of available cadmium in soil, roots and shoots were 23.29, 33.90 and 36.25 mg/kg, respectively, which all three were obtained in the concentration of 100 mg Cd/kg soil. The lowest amount of bioconcentration factor (0.75) and bioaccumulation factor (1.03) were related to the synergistic treatment of biochar and *Pseudomonas putida* at the concentration of 25 mg Cd/kg soil, which decreased up to 17.90 and 10.62% compared to the control, respectively.

**Keyword:** Biochar, Cadmium, Maize, *Pseudomonas putida*, Synergy

## ارزیابی اثرگذاری اصلاح‌کننده آلی و باکتری محرک رشد در فرآیند گیاه‌پالایی گیاه ذرت (*Zea mays* L.) تحت تنش فلز سنگین کادمیم

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

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۰/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۳

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲-دانشیار گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۳-دانش‌آموخته دکتری زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۴-استاد گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

\*مسئول مکاتبه: Email: fa\_zaefarian@yahoo.com

### چکیده

اهداف: پژوهش حاضر به منظور ارزیابی اثرگذاری اصلاح‌کننده آلی و باکتری محرک رشد در گیاه‌پالایی گیاه ذرت تحت تنش کادمیم (Cd) انجام شد.

مواد و روش‌ها: این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار صورت گرفت. فاکتورهای آزمایشی عبارت بود از: ۱- بیوچار به عنوان اصلاح‌کننده آلی خاک در دو سطح (عدم مصرف و مصرف ۲۰ گرم به ازای هر کیلوگرم خاک)، ۲- باکتری *سودوموناس پوتیدا* در دو سطح عدم تلقیح و تلقیح باکتری و ۳- سطوح فلز سنگین (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک).

یافته‌ها: کادمیم در همه غلظت‌ها موجب کاهش وزن خشک ریشه و شاخساره شد؛ در حالی که مصرف بیوچار و تلقیح باکتری موجب افزایش این صفات گردید. بیشترین مقدار وزن خشک شاخساره (۹/۴۳ گرم در بوته)، با مصرف بیوچار و تلقیح *سودوموناس پوتیدا* و عدم آلودگی کادمیم به دست آمد که نسبت به شاهد خود ۴۵/۳۰ درصد افزایش نشان داد. بیشترین میزان کادمیم قابل استفاده در خاک، ریشه و شاخساره به ترتیب ۲۳/۲۹، ۳۳/۹۰ و ۳۶/۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که هر سه مربوط به غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک بودند. کمینه مقدار فاکتور تجمع زیستی ریشه (۰/۷۵) و فاکتور تجمع زیستی شاخساره (۱/۰۳) مربوط به تیمار هم‌افزایی بیوچار و باکتری *سودوموناس پوتیدا* در غلظت ۲۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک بود که به ترتیب ۱۷/۹۰ و ۱۰/۶۲ درصد نسبت به شاهد خود کاهش یافتند.

واژه‌های کلیدی: بیوچار، ذرت، *سودوموناس پوتیدا*، کادمیم، هم‌افزایی

### مقدمه

(آدیولوگلو سوینچ ۲۰۲۰). فلزات سنگین یک اصطلاح کلی

است که به طور گسترده برای گروه فلزات و شبه فلزاتی

استفاده می‌شود که تراکم اتمی بالاتر از چهار گرم در

آلودگی فلزات سنگین در خاک موضوعی است که در

سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است

سانتی‌متر مکعب دارند (هاوکس ۱۹۹۷). زباله‌های خانگی، آلاینده‌های صنعتی، آب‌های سطحی حاصل از بارندگی (کومار و همکاران ۲۰۱۹)، آفت‌کش‌ها، کودهای شیمیایی، زباله‌های شهری (حسنین و همکاران ۲۰۲۰)، معدن کاری، نوب، کاربردهای زمینی لجن فاضلاب و سایر فعالیت‌های انسانی منجر به آلودگی گسترده فلزات در خاک شده است (مدینسکا-ژوراسک و همکاران ۲۰۲۰). کادمیم (Cd) یک فلز سنگین سمی است که در خاک نسبتاً متحرک است و به یک مشکل جدی برای محیط زیست در سراسر جهان تبدیل شده است (وو و همکاران ۲۰۲۰). اگر کادمیم موجود در خاک کمتر از ۰/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم باشد، تنش قابل توجهی برای گیاهان ایجاد نمی‌کند؛ اما بسته به مواد اصلی خاک می‌تواند تا سه (خالوفا و همکاران ۲۰۱۹) الی ۱۶/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم برسد (ما و همکاران ۲۰۲۰) و این در حالیست که قرار گرفتن گیاه در معرض سطوح بالای کادمیم باعث تغییر در هومئوستازی عناصر اساسی می‌شود، موجب تخریب سیستم فتوسنتز می‌شود، تنش اکسیداتیو ایجاد می‌کند و رشد و نمو گیاه را مختل می‌سازد (لو و همکاران ۲۰۲۰). برای کنترل آلودگی فلزات سنگین، در سراسر دنیا تلاش بر این است تا برای رفع تهدیدهای بهداشتی و دستیابی به توسعه بوم‌شناختی پایدار، از فناوری‌هایی استفاده شود که مقرون به صرفه، کارآمد و امکان‌پذیر باشد (ژانگ و همکاران ۲۰۲۰). در میان فناوری‌های موجود برای اصلاح، گیاه‌پالایی یک فناوری سبز و نسبتاً ارزان قیمت است که از گیاهان برای از بین بردن خاک‌های آلوده به فلزات سمی استفاده می‌شود و بیش از یک دهه است که مورد توجه بسیاری قرار گرفته است (لی و همکاران ۲۰۲۰). گیاه‌پالایی یک فرآیند آلودگی‌زدایی است که در آن از گیاهان برای حذف آلاینده‌ها از محیط و یا تبدیل آلاینده‌ها به موادی که خطر کمتری برای موجودات زنده دارند استفاده می‌شود (برتان و همکاران ۲۰۲۰). گیاه‌پالایی از قابلیت جذب منحصر به فرد و انتخابی سیستم‌های ریشه گیاه همراه

با قابلیت انتقال، تجمع زیستی و تجزیه آلاینده در کل اندام‌های گیاهی در فرآیند اصلاح برخوردار است (ابراهیم و همکاران ۲۰۲۰). لذا، گونه‌های گیاهی با رشد سریع قادر به تولید مقادیر زیادی زیست توده هوایی و زیرزمینی هستند؛ بنابراین پتانسیل خوبی برای استخراج، تخریب و تثبیت آلاینده‌ها دارند (لابرک و همکاران ۲۰۲۰). ذرت بعد از گندم و برنج از مهم‌ترین و گسترده‌ترین غلات در جهان است (اودی و همکاران ۲۰۲۰). ذرت در مناطق مختلف کره زمین و در محیط‌های متنوع کشت می‌شود، و دارای سیستم ریشه‌ای منشعب ریز و فراوان است. همچنین دارای تعداد زیادی تار کشنده است که نقش مهمی در جذب آب، مواد مغذی و آلاینده‌ها از خاک دارند (چیوتالو و همکاران ۲۰۲۰). علاوه‌براین، در مطالعه‌ای گزارش شده است، که ذرت به‌عنوان یک گیاه C4 درجه حساسیت متوسطی نسبت به تنش‌های فلزات سنگین نشان می‌دهد (صوفی و همکاران ۲۰۲۰). در این زمینه، جداسازی و استفاده از جمعیت میکروبی برای اصلاح یون‌های فلزات سنگین از محیط زیست نیز، توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است که در این بین باکتری‌های محرک رشد گیاه مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند (تیری و همکاران ۲۰۱۸). برخی از باکتری‌های محرک رشد گیاه، دارای توانایی فوق‌العاده‌ای در بهبود رشد گیاه از طریق سازوکارهای مختلف از جمله تولید سیدروفور، ایندول استیک اسید و انحلال فسفات می‌باشند. همچنین این باکتری‌ها برای کاهش آلاینده‌های خاک و معدنی کردن ترکیبات آلی مورد استفاده قرار می‌گیرند (نریمانی و همکاران ۲۰۱۷). باکتری جنس *سودوموناس* به‌طور گسترده به‌عنوان باکتری محرک رشد گیاه معرفی می‌شود که در بردارنده خصوصیاتی مانند پتانسیل تولید محرک رشد گیاه، هورمون‌های گیاهی، محلول‌سازی فسفات، سیانید هیدروژن، سیدروفور، آنتی بیوتیک‌ها، آنزیم‌های هیدرولیتیک و ترکیبات ضد میکروبی می‌باشد (سابرامانیوم و سوندارام ۲۰۲۰).

نظر گرفته شد. در هر گلدان چهار کیلوگرم خاک ریخته شد. خاک پس از هوا خشک شدن با مقدار مورد نظر نیترات کادمیم برای هر تیمار به صورت لایه‌ای با خاک مخلوط گردید. برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ نشان داده شده است.

بیوچار مصرفی حاصل از بقایای درختان جنگلی بود که از شرکت داخلی کربن اکتیو بشل تهیه شد. خواص فیزیکی و شیمیایی بیوچار در جدول ۲ نشان داده شده است. پس از اضافه نمودن نیترات کادمیم به خاک، مقدار بیوچار تعیین شده به تیمارهای مورد نظر اضافه گردید. به منظور جذب کامل نیترات کادمیم در خاک به مدت ۱۴ روز آبیاری از طریق زیرگلدانی صورت گرفت. مایه تلقیحی مایع شامل *سودوموناس پوتیدا* R-8 بود که از موسسه تحقیقات خاک و آب کرج تهیه و به صورت آغشته کردن (چند ساعت قبل از کاشت) با بذر تلقیح و به خاک افزوده شد. اندازه‌گیری ارتفاع بوته قبل از گلدهی و برداشت بوته صورت گرفت. برداشت قبل از شروع مرحله گلدهی 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 شدند و نمونه‌های اندام‌های هوایی و اندام‌های زیرزمینی گیاه به آزمایشگاه انتقال یافتند. پس از کف‌برکردن بوته‌ها، نمونه‌های ریشه و شاخساره جهت تعیین وزن خشک به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شد؛ سپس با استفاده از ترازوی دیجیتال وزن خشک نمونه‌ها در گلدان تعیین شد. اندازه‌گیری غلظت کادمیم در گیاه به روش هضم تر انجام شد (وودیزجونور و همکاران ۱۹۹۷). غلظت قابل جذب کادمیم در نمونه‌های خاک نیز با استفاده از روش لیندسی و نورول (۱۹۷۸) اندازه‌گیری شد. پس از اتمام محاسبات آزمایشگاهی، تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS (۷.۹) انجام و با توجه به معنی‌دار شدن اثرات متقابل سه‌گانه، برشی‌دهی اثر متقابل صورت گرفت. از آزمون LSD در سطح پنج درصد جهت مقایسه میانگین‌ها استفاده شد.

بیوچار ماده‌ای غنی از کربن است که از طریق تجزیه حرارتی زیست توده لیگنوسلولزی و مواد زائد بیولوژیکی جامد در شرایط بدون اکسیژن یا محدود به اکسیژن در دمای ۹۰۰-۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید، به این فرآیند پیرولیز گفته می‌شود (زوبری و همکاران ۲۰۲۰). بیوچار حاصل از باقیمانده‌های کشاورزی حاوی عناصر غذایی پرمصرف با ارزش (به ویژه نیتروژن، فسفر، کلسیم و غیره) و کم‌مصرف (مثل مس، روی و غیره) است که نقش مهمی در اصلاح خاک و تغذیه گیاه دارند (سان و همکاران ۲۰۲۰).

باتوجه به موارد ذکر شده و افزایش صنعتی شدن در نتیجه افزایش آلاینده‌ها، روشی کارآمد و مقرون به صرفه مانند گیاه‌پالایی برای کاهش یا حذف آلاینده‌ها ضروری است. همچنین استفاده از مکمل‌ها برای بهبود و تسریع این فرآیند توصیه می‌شود، بنابراین این پژوهش با هدف ارزیابی اثرگذاری اصلاح‌کننده آلی بیوچار و باکتری محرک رشد *سودوموناس پوتیدا* در فرآیند گیاه‌پالایی توسط گیاه ذرت، تحت تنش کادمیم برنامه‌ریزی و انجام شد.

## مواد و روش‌ها

جهت بررسی توانایی کاهش آلودگی عنصر سنگین کادمیم توسط گیاه ذرت رقم سینگل کراس ۵۰۰ همراه با مصرف بیوچار و تلقیح باکتری *سودوموناس پوتیدا* R-8 (*Pseudomonas putida* R-8) آزمایشی در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، در شرایط گلخانه انجام شد. این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار صورت گرفت. فاکتورهای آزمایشی عبارت بود از: ۱- بیوچار به عنوان اصلاح‌کننده آلی خاک در دو سطح بدون مصرف (شاهد) و مصرف ۲۰ گرم به ازای هر کیلوگرم خاک ۲- باکتری *سودوموناس پوتیدا* R-8 در دو سطح بدون تلقیح با باکتری (شاهد) و تلقیح با باکتری ۳- سطوح عنصر آلاینده در پنج سطح ۰ (شاهد)، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک از منبع نیترات کادمیم  $(Cd(NO_3)_2)$  در مجموع ۸۰ گلدان پنج کیلوگرمی در

با استفاده از روابط زیر توانایی گیاهان در انباشت

عنصر کادمیم محاسبه شد.

$$\text{غلظت فلز کادمیم در شاخساره در خاک غیرآلوده (g)} \times 100 = \frac{\text{وزن خشک شاخساره در خاک آلوده (g)}}{\text{وزن خشک شاخساره در خاک غیرآلوده (g)}} \times \text{شاخص تحمل (لوکس و همکاران ۲۰۰۴)}$$

$$\text{فاکتور انتقال} = \frac{\text{غلظت فلز کادمیم در شاخساره (mg/kg)}}{\text{غلظت فلز کادمیم در ریشه (mg/kg)}} \quad \text{(باکر و بروکز ۱۹۸۹ و ژانگ و همکاران ۲۰۰۲)}$$

$$\text{فاکتور تجمع زیستی شاخساره} = \frac{\text{غلظت فلز کادمیم در شاخساره (mg/kg)}}{\text{غلظت فلز کادمیم قابل جذب خاک (mg/kg)}} \quad \text{(ما و همکاران ۲۰۰۱)}$$

$$\text{فاکتور تجمع زیستی ریشه} = \frac{\text{غلظت فلز کادمیم در ریشه (mg/kg)}}{\text{غلظت فلز کادمیم قابل جذب خاک (mg/kg)}} \quad \text{(ما و همکاران ۲۰۰۱ و کلیوس ۲۰۰۴)}$$

$$\text{وزن خشک شاخساره (g/pot)} \times \text{غلظت فلز کادمیم در شاخساره (mg/g)} = \text{مقدار جذب در شاخساره (mg/pot)} \quad \text{(کاس و همکاران ۲۰۰۳)}$$

جدول ۱- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Cd	K	P	N	EC	pH	بافت خاک
mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	%	dS.m <sup>-1</sup>		
۰/۰۰۵	۲۶۶	۱۰	۰/۱۸	۱/۷۲۳	۷/۲۱	رسی

جدول ۲- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوچار

دانه‌بندی	درصد خاکستر	pH	میزان رطوبت	ظرفیت جذب	مساحت سطح یا	*ظرفیت
mm	%		%	متیلن بلو (mg.g <sup>-1</sup> )	سطح ویژه (m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> )	جذب ید (mg.g <sup>-1</sup> )
۱	۴-۵	۸/۵	۳-۴	۱۵۰-۲۵۰	۹۵۰-۱۱۰۰	۹۵۰-۱۱۰۰

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

## نتایج و بحث

### وزن خشک ریشه و شاخساره

جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان می‌دهد در صفت وزن خشک ریشه، همه تیمارها به جز اثرات دوگانه کادمیم×بیوچار و کادمیم×سودوموناس پوتیدا، در سطح یک درصد معنی‌دار شدند. اما تمامی اثرات ساده، دوگانه و سه‌گانه مورد مطالعه بر وزن خشک شاخساره گیاه نرت معنی‌دار شد (جدول ۳). با افزایش غلظت کادمیم از صفر تا ۱۰۰ میلی‌گرم، وزن خشک ریشه و شاخساره کاهش یافتند (جدول ۴). شکری و همکاران (۲۰۱۶) گزارش دادند وزن خشک اندام هوایی گل جعفری زینتی (*Tagetes erecta*) در حضور کادمیم از ۱/۶۸ گرم در گلدان در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک رسید، که ۱۴

برابر کاهش داشت. وزن خشک ریشه نیز از ۰/۷۲ گرم در گلدان در سطح شاهد به ۰/۰۸ گرم در گلدان رسید که ۹ برابر کاهش یافت. در گزارش دیگری مشاهده شد که وزن خشک ریشه دو واریته نرت در غلظت‌های متفاوت کادمیم (۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰) به میزان قابل توجهی کم شد (دیاب و همکاران ۲۰۲۰). کاهش رشد و زیست توده گیاهان رشد یافته در تنش فلزات سنگین ممکن است به دلیل افزایش سطح پراکسیداسیون لیپید، H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و اختلال در محتوای مواد مغذی باشد (عباس و همکاران ۲۰۲۰).

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای آزمایشی بر برخی از صفات مورفولوژیک و شاخص تحمل گیاه نرت

منابع تغییر	درجه آزادی	وزن خشک ریشه	وزن خشک شاخساره	ارتفاع بوته	شاخص تحمل
کادمیم	۴	۲/۷۵۶**	۲۸/۳۸۶**	۲۰۷۱،۲۷**	۰/۶۷۴**
بیوچار	۱	۰/۹۱۹**	۸/۵۰۹**	۲۴۳،۶۰**	۰/۲۰۱**
سودوموناس پوتیدا	۱	۰/۹۳۹**	۲۹/۴۳۲**	۳۷۰،۶۶**	۰/۶۹۸**
کادمیم×بیوچار	۴	۰/۰۰۵ns	۰/۱۹۵**	۲،۲۳ns	۰/۰۰۴**
کادمیم×سودوموناس پوتیدا	۴	۰/۰۰۱ns	۰/۹۰۵**	۶،۴۴ns	۰/۰۲۱**
بیوچار×سودوموناس پوتیدا	۱	۰/۰۲۰**	۰/۰۴۵*	۳،۶۹ns	۰/۰۰۱*
کادمیم×بیوچار×سودوموناس پوتیدا	۴	۰/۰۱۰**	۰/۰۴۸**	۵،۸۶ns	۰/۰۰۱**
خطای آزمایش	۶۰	۰/۰۰۲	۰/۰۱۰	۶،۴۴	۰/۰۰۰۲
ضریب تغییرات (%)		۲/۸۹	۱/۷۳	۳،۰۴	۱/۷۳

ns، \*\* و \* : به ترتیب معنی داری در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و عدم معنی داری می باشد.

مستقیم و غیرمستقیم زیست توده گیاهان تحت تنش فلزات سنگین را بهبود بخشند (کروی و همکاران ۲۰۱۳). کمترین مقدار وزن خشک شاخساره گیاه نرت یعنی ۳/۷۸ گرم در بوته در تیمار عدم مصرف بیوچار و عدم تلقیح باکتری در بیشترین غلظت کادمیم یعنی ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک مشاهده گردید (جدول ۴). در یک آزمایش روی سه گونه گیاهی شامل گیاه سبب (*Stipagrostis plumose*)، گیاه استبرق (*Calotropis procera*) و گیاه یونجه (*Medicago sativa*) که در مناطق آلوده به ترکیبات نفتی رشد یافتند مشاهده شد که با مصرف بیوچار وزن خشک ریشه و شاخساره افزایش یافت (جهانتاب و همکاران ۲۰۱۶). یکی از عوامل بهبوددهنده شرایط خاک به منظور رشد گیاهان افزودن انواع مواد آلی به محیط کشت است (جعفری و همکاران ۲۰۱۷). بیوچار باعث بهبود احتباس مواد مغذی، جذب آب، افزایش کربن آلی، عناصر پرمصرف (نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منگنز) و افزایش ریزمغذی‌ها در خاک شده، در نتیجه حاصل خیزی خاک را بهبود می بخشد و رشد رویشی را افزایش می دهد (عباس و همکاران، ۲۰۲۰). باکتری‌ها نیز می توانند از طریق تأمین منابع غذایی و انواع پروتئین‌های مورد نیاز گیاه، موجب بهبود

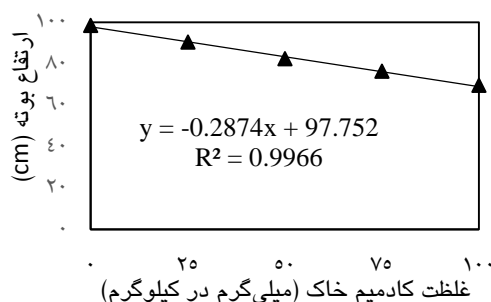
کاربرد جداگانه بیوچار و سودوموناس پوتیدا و همچنین هم‌افزایی بیوچار و سودوموناس پوتیدا در همه غلظت‌ها موجب افزایش وزن خشک ریشه و شاخساره شدند (جدول ۴). در همه غلظت‌ها کاربرد تلفیقی بیوچار و سودوموناس پوتیدا بیشترین تأثیر را بر وزن خشک شاخساره داشت؛ به طوری که بیشترین مقدار وزن خشک شاخساره ۹/۴۳ گرم در بوته، مربوط به تیمار مصرف بیوچار و تلقیح سودوموناس پوتیدا و عدم آلودگی کادمیم بود که نسبت به شاهد خود ۴۵/۳۰ درصد افزایش نشان داد. نتایج آزمایشی نشان دهنده آن است که کاربرد تلفیقی بیوچار و تلقیح باکتری سودوموناس فلورسنس (*Pseudomonas fluorescens*) توانسته است موجب افزایش زیست توده شاخساره و کل گیاه بید سفید (*Salix alba* L.) تحت تنش فلزات سنگینی نظیر مس، روی و کادمیم شود (مکرم کشتیبان و همکاران ۲۰۱۹). مطابق با مطالعات پیشین هم‌افزایی بیوچار و تلقیح باکتری‌های محرک رشد می‌توانند با افزایش محتوای کربن و نیتروژن، بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، تحریک جوامع میکروبی، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، جذب و حذف فلزات سنگین از خاک به‌طور

واحد کاهش یافت و میزان کاهش ارتفاع در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم نسبت به شاهد (عدم مصرف کادمیم) حدود ۲۹/۳۳ درصد بود (شکل ۱). در این راستا نتایج مشابهی در آزمایش شفیق و همکاران (۲۰۱۹) مشاهده شد. در آزمایش آن‌ها نیز مشاهده شد ارتفاع بوته گیاه ذرت (*Zea mays L.*) با کاربرد کادمیم کاهش یافت. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد افزودن بیوچار و سودوموناس پوتیدا به بستر کشت موجب بهبود ارتفاع بوته شده‌اند که به ترتیب ۴/۲۷ و ۵/۳۰ درصد افزایش داشته‌اند (شکل ۲ الف و ب). بهبود ارتفاع بوته با مصرف بیوچار ممکن است به دلیل کاهش جذب کادمیم در ریشه و شاخساره هنگام حضور بیوچار در خاک باشد (دینش و همکاران ۲۰۱۹).

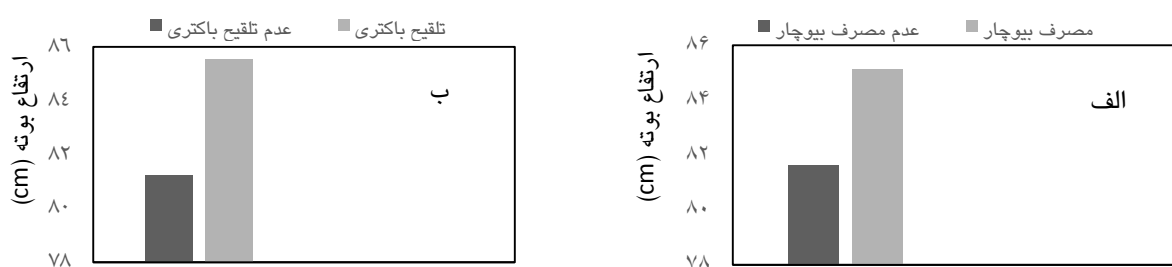
خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و زیستی خاک، افزایش تولید اسیدهای آمینه و آلی، کاهش اثرات تنش‌های محیطی خاک از طریق افزایش مقاومت گیاه و حفظ رطوبت بیشتر در اطراف ریشه شوند، در نتیجه رشد مورفولوژیکی گیاه را بهبود می‌بخشند (مکرم کشتیبان و همکاران ۲۰۱۹).

### ارتفاع بوته

اثرات ساده تیمارهای آزمایشی بر ارتفاع بوته در سطح پنج درصد معنی‌دار شده‌اند. اما باقی تیمارهای آزمایشی اثر معنی‌داری نداشتند (جدول ۳). براساس شکل ۱، ارتفاع بوته به صورت خطی با شیب  $-0.2874x + 97.752$  -



شکل ۱- روند تغییرات ارتفاع بوته گیاه ذرت در افزایش غلظت کادمیم خاک



شکل ۲- اثر ساده بیوچار (الف) و اثر ساده باکتری سودوموناس پوتیدا (ب) بر میزان ارتفاع بوته گیاه ذرت تحت شرایط تنش کادمیم

ذرت با افزایش غلظت کادمیم کاهش نشان داد؛ به طوری که کمترین شاخص تحمل (۰/۵۸) در بیشترین غلظت کادمیم مشاهده شد (جدول ۴). نتایج پژوهشی حاکی از آن بود که شاخص تحمل گیاه شاهی (*Lepidium sativum*) با افزایش غلظت دو فلز کادمیم و کروم کاهش

### شاخص تحمل

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان می‌دهد اثر دوگانه بیوچار × سودوموناس پوتیدا در سطح پنج درصد و سایر اثرات بررسی شده بر شاخص تحمل گیاه ذرت در سطح یک درصد معنی‌دار شدند. شاخص تحمل گیاه

یافت (سویاریو و همکاران ۲۰۱۶). مطابق جدول ۴، کاربرد بیوچار، تلقیح سودوموناس پوتیدا و هم‌افزایی این دو باعث افزایش شاخص تحمل شد و در همه غلظت‌ها هم‌افزایی بیوچار و باکتری بالاترین شاخص تحمل را به‌خود اختصاص داد.

کمترین و بیشترین شاخص تحمل به‌ترتیب ۰/۵۸ و ۱/۴۵ بود که مربوط به تیمار عدم مصرف بیوچار و عدم تلقیح باکتری در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و مصرف بیوچار، تلقیح باکتری در غیاب کادمیم بود (جدول ۴). شاخص تحمل براساس زیست توده خالص انباشته شده در گیاهان تحت تنش فلزات سنگین

در مقایسه با گیاهان شاهد برآورد می‌شود؛ از این رو، شاخص قابل اعتمادی از سطح تحمل گیاهان به فلزات سنگین خاک است (پیوتتو و همکاران ۲۰۱۸). هنگامی‌که تیمارها بر رشد گیاه تأثیری نداشته باشند، شاخص تحمل برابر با یک است. درجه تحمل به سه دسته تحمل بالا (بزرگ‌تر از ۰/۶۰)، تحمل متوسط (۰/۳۵-۰/۶۰) و حساس (کوچک‌تر از ۰/۳۵) تقسیم می‌شود (لوکس و همکاران، ۲۰۰۴). بنابراین، باتوجه‌به اینکه در آزمایش حاضر شاخص تحمل بزرگ‌تر از ۰/۶۰ است، می‌توان ذرت را جزء گیاهان با تحمل بالا نسبت‌به کادمیم در نظر گرفت.

جدول ۴- مقایسه میانگین برش‌دهی برهمکنش اثر تیمارهای آزمایشی بر وزن خشک اندام‌های گیاهی و شاخص تحمل گیاه ذرت

شاخص تحمل گیاه	وزن خشک شاخساره	وزن خشک ریشه	سودوموناس پوتیدا	بیوچار	کادمیم (mg.kg <sup>-1</sup> )
(g.plant <sup>-1</sup> )					
۱/۰۰ <sup>d</sup>	۶/۴۹ <sup>d</sup>	۲/۰۷ <sup>c</sup>	عدم تلقیح	عدم مصرف	.
۱/۲۷ <sup>b</sup>	۸/۲۶ <sup>b</sup>	۲/۳۰ <sup>b</sup>	تلقیح		
۱/۱۱ <sup>c</sup>	۷/۲۳ <sup>c</sup>	۲/۳۰ <sup>b</sup>	عدم تلقیح	مصرف	
۱/۴۵ <sup>a</sup>	۹/۴۳ <sup>a</sup>	۲/۵۵ <sup>a</sup>	تلقیح		
۰/۸۶ <sup>d</sup>	۵/۶۰ <sup>d</sup>	۱/۷۸ <sup>c</sup>	عدم تلقیح	عدم مصرف	۲۵
۱/۰۵ <sup>b</sup>	۶/۸۱ <sup>b</sup>	۲/۰۸ <sup>b</sup>	تلقیح		
۰/۹۴ <sup>c</sup>	۶/۱۱ <sup>c</sup>	۲/۰۲ <sup>b</sup>	عدم تلقیح	مصرف	
۱/۱۵ <sup>a</sup>	۷/۴۴ <sup>a</sup>	۲/۱۹ <sup>a</sup>	تلقیح		
۰/۷۷ <sup>d</sup>	۵/۰۰ <sup>d</sup>	۱/۵۲ <sup>c</sup>	عدم تلقیح	عدم مصرف	۵۰
۰/۹۱ <sup>b</sup>	۵/۸۹ <sup>b</sup>	۱/۸۱ <sup>b</sup>	تلقیح		
۰/۸۶ <sup>c</sup>	۵/۵۵ <sup>c</sup>	۱/۸۵ <sup>b</sup>	عدم تلقیح	مصرف	
۱/۰۱ <sup>a</sup>	۶/۵۶ <sup>a</sup>	۱/۹۸ <sup>a</sup>	تلقیح		
۰/۶۵ <sup>d</sup>	۴/۲۳ <sup>d</sup>	۱/۲۶ <sup>c</sup>	عدم تلقیح	عدم مصرف	۷۵
۰/۸۴ <sup>b</sup>	۵/۴۴ <sup>b</sup>	۱/۵۳ <sup>b</sup>	تلقیح		
۰/۷۸ <sup>c</sup>	۵/۰۸ <sup>c</sup>	۱/۵۳ <sup>b</sup>	عدم تلقیح	مصرف	
۰/۹۴ <sup>a</sup>	۶/۱۱ <sup>a</sup>	۱/۷۰ <sup>a</sup>	تلقیح		
۰/۵۸ <sup>d</sup>	۳/۷۸ <sup>d</sup>	۱/۰۸ <sup>c</sup>	عدم تلقیح	عدم مصرف	۱۰۰
۰/۷۰ <sup>b</sup>	۴/۵۳ <sup>b</sup>	۱/۲۴ <sup>b</sup>	تلقیح		
۰/۶۴ <sup>c</sup>	۴/۱۶ <sup>c</sup>	۱/۲۳ <sup>b</sup>	عدم تلقیح	مصرف	
۰/۷۵ <sup>a</sup>	۴/۸۸ <sup>a</sup>	۱/۴۵ <sup>a</sup>	تلقیح		

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



**غلظت کادمیم در خاک، ریشه و شاخساره**

همه اثرات تیمارهای آزمایشی بر غلظت کادمیم در خاک و ریشه در سطح یک درصد معنی‌دار شدند. همچنین همه اثرات تیمارهای آزمایشی به‌جز اثر ساده بیوچار بر غلظت کادمیم در شاخساره در سطح یک درصد معنی‌دار شدند (جدول ۵). براساس جدول ۶ با افزایش غلظت کادمیم، میزان کادمیم در خاک، ریشه و شاخساره افزایش یافت. با مصرف بیوچار میزان کادمیم خاک (به‌جز شاهد) کاهش نشان داد. همچنین، مصرف

بیوچار در همه غلظت‌های کادمیم موجب کاهش میزان کادمیم در ریشه و شاخساره شد. نتایج آزمایش آلابودی و همکاران (۲۰۱۹) حاکی از آن است که با افزایش میزان فلزات سنگین در خاک، غلظت سرب، کادمیم و کروم در زیست توده گیاه ذرت افزایش یافت. در این راستا، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزودن بیوچار به تدریج فرم قابل دسترس سرب و کادمیم را در خاک کاهش داد؛ لذا میزان جذب سرب و کادمیم توسط گیاهان در حال رشد نیز کاهش یافت.

**جدول ۵- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای آزمایشی بر میزان غلظت کادمیم خاک، ریشه و شاخساره در گیاه****ذرت**

منابع تغییر	درجه آزادی	غلظت کادمیم قابل استفاده در خاک	غلظت کادمیم در ریشه	غلظت کادمیم در شاخساره
کادمیم	۴	۹۱۱/۰۰۷**	۱۴۹۸/۳۷۴**	۱۷۲۹/۹۵۸**
بیوچار	۱	۰/۶۵۷**	۰/۹۰۳**	۰/۱۱۷ <sup>ns</sup>
سودوموناس پوتیدا	۱	۲۲۸/۵۱۵**	۷۵۶/۱۱۷**	۹۰۷/۶۶۲**
کادمیم×بیوچار	۴	۰/۸۳۴**	۲/۸۷۰**	۲/۱۸۸**
کادمیم×سودوموناس پوتیدا	۴	۲۴/۷۷۸**	۸۹/۶۵۵**	۱۱۲/۶۷۶**
بیوچار×سودوموناس پوتیدا	۱	۹۱/۶۰۹**	۲۴۹/۴۹۳**	۳۱۰/۶۵۳**
کادمیم×بیوچار×سودوموناس پوتیدا	۴	۱۰/۰۰۰**	۳۲/۲۳۷**	۴۱/۱۳۰**
خطای آزمایش	۶۰	۰/۰۴۸	۰/۰۳۵	۰/۰۷۳
ضریب تغییرات (%)		۲/۴۳	۱/۷۱	۲/۲۱۶

\*\*، \* و <sup>ns</sup>: به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و عدم معنی‌داری می‌باشد.

مکانیسم‌های مختلف بی‌حرکتی فلزات سنگین را می‌توان پس از استفاده از بیوچار مشاهده کرد. اول، بیوچار می‌تواند خصوصیات خاک را در تعیین تحرک عناصر مانند pH خاک یا ظرفیت تبادل کاتیونی تحت تأثیر قرار دهد. در مرحله دوم، بیوچار می‌تواند با استفاده از چندین مکانیزم، از جمله تبادل فلز، ایجاد کمپلکس با گروه‌های مختلف عاملی در بیوچار و جذب اختصاصی و غیراختصاصی، از مجموعه‌های جذب خاک پشتیبانی کرده و موجب بی‌حرکتی عناصر شود (مدینسکا-ژوراسک و همکاران ۲۰۲۰).

تلقیح سودوموناس پوتیدا و کاربرد هم‌زمان بیوچار و باکتری موجب افزایش غلظت کادمیم در خاک، ریشه و شاخساره شد. بیشترین میزان کادمیم در خاک، ریشه و شاخساره به ترتیب ۲۳/۲۹، ۳۳/۹۱ و ۳۶/۲۵ میلی‌گرم بود که هر سه مربوط به غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک می‌باشند (جدول ۶). باکتری‌ها از طریق تغییر pH خاک، رهاسازی کلات‌کننده‌ها (مانند اسیدهای آلی و سیدروفورها) و واکنش‌های اسید و احیاء قادر به تغییر قابلیت دسترسی فلزات سنگین هستند (محوچی و همکاران ۲۰۱۸).

جدول ۶- مقایسه میانگین برش‌دهی برهمکنش اثر تیمارهای آزمایشی بر میزان غلظت کادمیم خاک، ریشه و شاخساره در

## گیاه ذرت

غلظت کادمیم در شاخساره	غلظت کادمیم در ریشه	غلظت کادمیم قابل استفاده در خاک	سودوموناس پوتیدا	بیوچار	کادمیم (mg.kg <sup>-1</sup> )
(mg.kg <sup>-1</sup> )					
۰/۰۰۳ <sup>b</sup>	۰/۰۰۳ <sup>c</sup>	۰/۰۰۱ <sup>b</sup>	عدم تلقیح	عدم مصرف	۰
۰/۰۰۴ <sup>b</sup>	۰/۰۰۳ <sup>b</sup>	۰/۰۰۲ <sup>a</sup>	تلقیح		
۰/۰۰۳ <sup>c</sup>	۰/۰۰۱ <sup>d</sup>	۰/۰۰۱ <sup>b</sup>	عدم تلقیح	مصرف	
۰/۰۰۵ <sup>a</sup>	۰/۰۰۴ <sup>a</sup>	۰/۰۰۲ <sup>a</sup>	تلقیح		
۳/۲۱۳ <sup>c</sup>	۲/۵۶۳ <sup>c</sup>	۲/۷۹۸ <sup>c</sup>	عدم تلقیح	عدم مصرف	۲۵
۴/۱۷۴ <sup>b</sup>	۳/۸۲۷ <sup>b</sup>	۳/۳۵۳ <sup>b</sup>	تلقیح		
۱/۸۲۸ <sup>d</sup>	۱/۳۳۹ <sup>d</sup>	۱/۷۸۲ <sup>d</sup>	عدم تلقیح	مصرف	
۵/۹۶۶ <sup>a</sup>	۵/۵۱۹ <sup>a</sup>	۴/۳۶۰ <sup>a</sup>	تلقیح		
۱۱/۴۸۰ <sup>c</sup>	۹/۳۵۵ <sup>c</sup>	۹/۳۳۶ <sup>c</sup>	عدم تلقیح	عدم مصرف	۵۰
۱۵/۷۱۶ <sup>b</sup>	۱۳/۱۱۳ <sup>b</sup>	۱۱/۲۶۱ <sup>b</sup>	تلقیح		
۷/۱۰۶ <sup>d</sup>	۵/۶۹۳ <sup>d</sup>	۶/۲۸۴ <sup>d</sup>	عدم تلقیح	مصرف	
۲۰/۳۹۸ <sup>a</sup>	۱۷/۸۵۶ <sup>a</sup>	۱۳/۹۵۷ <sup>a</sup>	تلقیح		
۱۷/۱۹۴ <sup>c</sup>	۱۵/۴۹۸ <sup>c</sup>	۱۳/۵۸۸ <sup>c</sup>	عدم تلقیح	عدم مصرف	۷۵
۲۱/۱۴۷ <sup>b</sup>	۱۸/۸۸۸ <sup>b</sup>	۱۵/۲۰۷ <sup>b</sup>	تلقیح		
۱۰/۶۸۷ <sup>d</sup>	۹/۶۷۳ <sup>d</sup>	۹/۶۶۷ <sup>d</sup>	عدم تلقیح	مصرف	
۲۵/۶۰۴ <sup>a</sup>	۲۲/۱۷۴ <sup>a</sup>	۱۷/۲۱۶ <sup>a</sup>	تلقیح		
۲۲/۲۷۱ <sup>c</sup>	۲۰/۷۳۸ <sup>c</sup>	۱۷/۱۱۰ <sup>c</sup>	عدم تلقیح	عدم مصرف	۱۰۰
۲۷/۰۹۷ <sup>b</sup>	۲۵/۴۰۹ <sup>b</sup>	۱۹/۲۰۹ <sup>b</sup>	تلقیح		
۱۵/۲۱۴ <sup>d</sup>	۱۴/۸۵۴ <sup>d</sup>	۱۳/۴۹۱ <sup>d</sup>	عدم تلقیح	مصرف	
۳۶/۲۵۴ <sup>a</sup>	۳۳/۹۰۹ <sup>a</sup>	۲۳/۲۹۲ <sup>a</sup>	تلقیح		

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

## فاکتور تجمع زیستی ریشه و شاخساره

مطابق جدول ۷، کلیه اثرات تیمارهای آزمایشی بر فاکتور جمع‌زیستی ریشه در سطح یک درصد معنی‌دار شد. اثر ساده بیوچار و اثر دوگانه کادمیم×بیوچار بر فاکتور تجمع زیستی شاخساره معنی‌دار نشدند. فاکتور تجمع زیستی شاخساره برای ارزیابی پتانسیل انتقال فلز از خاک به گیاه استفاده می‌شود (لیو و همکاران ۲۰۲۰). افزایش غلظت کادمیم از صفر تا ۲۵ میلی‌گرم موجب کاهش فاکتور تجمع زیستی

ریشه و شاخساره شد؛ اما با افزایش غلظت کادمیم از غلظت ۲۵ تا ۱۰۰ میلی‌گرم، فاکتور تجمع زیستی ریشه و شاخساره زیاد شد. کاربرد بیوچار در همه غلظت‌ها موجب کاهش فاکتور تجمع زیستی ریشه و شاخساره گردید؛ در حالی‌که تلقیح سودوموناس پوتیدا و هم‌زیستی بیوچار و باکتری در همه غلظت‌ها به‌جز شاهد موجب افزایش فاکتور تجمع زیستی ریشه و شاخساره شد (جدول ۸).

جدول ۷- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای آزمایشی در صفات مرتبط با قابلیت گیاه‌پالایی گیاه نرت

منابع تغییر	درجه آزادی	فاکتور تجمع زیستی ریشه	فاکتور تجمع زیستی شاخساره	فاکتور انتقال	جذب کادمیم در شاخساره
کادمیم	۴	۰/۹۰۱**	۵/۰۵۷**	۰/۸۶۴**	۰/۰۳۷۶**
بیوچار	۱	۰/۰۶۳**	۰/۰۷۷ <sup>NS</sup>	۰/۰۷۴*	۰/۰۰۱۵**
سودوموناس پوتیدا	۱	۱/۴۱۴**	۰/۱۳۲*	۰/۷۴۱**	۰/۰۴۴۲**
کادمیم×بیوچار	۴	۰/۰۴۸**	۰/۰۴۴ <sup>NS</sup>	۰/۰۷۰**	۰/۰۰۰۱**
کادمیم×سودوموناس پوتیدا	۴	۰/۰۱۵**	۰/۰۵۳**	۰/۳۷۱**	۰/۰۰۰۶**
بیوچار×سودوموناس پوتیدا	۱	۱/۲۰۹**	۰/۲۳۵**	۰/۱۵۵**	۰/۰۰۹۴**
کادمیم×بیوچار×سودوموناس پوتیدا	۴	۰/۳۱۸**	۰/۳۱۷**	۰/۱۰۷**	۰/۰۰۰۹**
خطای آزمایش	۶۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۳۰	۰/۰۱۷	۰/۰۰۰۰۰۵
ضریب تغییرات (%)		۱/۲۹	۱۱/۳۹	۱۰/۷۴	۳/۵۸

\*, \*\*, و NS: به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و عدم معنی‌داری می‌باشد.

### فاکتور انتقال

براساس جدول تجزیه واریانس (جدول ۷) تمام تیمارهای آزمایشی در سطح یک درصد معنی‌دار شدند. فاکتور انتقال در گیاه نرت با افزایش غلظت کادمیم روند کاهشی داشت. به طوری که کمترین فاکتور انتقال (۱/۰۲) در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و بیشترین فاکتور انتقال (۲/۳۳) در شاهد دیده شد (جدول ۸). فاکتور انتقال اندازه‌گیری توانایی گیاهان برای انتقال فلزات انباشته شده از ریشه‌ها به اندام هوایی گیاه است و نسبتی از غلظت فلز در اندام هوایی به ریشه‌ها می‌باشد (حسین و همکاران ۲۰۱۳). اگر فاکتور انتقال بزرگ‌تر از یک باشد، گیاه مورد نظر برای استخراج گیاهی آلاینده‌ها مناسب است و گیاهانی که در آن‌ها میزان فاکتور انتقال کمتر از یک و میزان فاکتور تجمع زیستی بیشتر از یک باشد، برای فرآیند تثبیت گیاهی مناسب هستند (جهانتاب و همکاران ۲۰۱۶). در این پژوهش فاکتور انتقال گیاه بزرگ‌تر از یک است؛ بنابراین، می‌توان ادعان داشت گیاه نرت برای استخراج گیاهی که یکی از فرآیندهای گیاه‌پالایی است، مناسب است.

نتایج آزمایش کبیری و همکاران (۲۰۱۸) نیز نشان داد که کاربرد مقادیر مختلف بیوچار، فاکتور تجمع زیستی سرب را در ریشه نرت کاهش معنی‌داری داد ( $P < 0.05$ ). رسولی صدقیانی و همکاران (۲۰۱۸) از نتایج آزمایش خود دریافتند که تلقیح گیاه گل گندم (*Centaurea hypoleuca johncoutts*) با سه گونه باکتری از جنس سودوموناس شامل سودوموناس پوتیدا (*Pseudomonas putida*)، سودوموناس فلورسنس (*Pseudomonas fluorescens*) و سودوموناس آئروژینوزا (*Pseudomonas aeruginosa*) موجب افزایش فاکتور تجمع زیستی ریشه و شاخساره گیاه تحت تنش کادمیم شد. در مطالعه حاضر کمترین مقدار فاکتور تجمع زیستی ریشه و شاخساره (۰/۷۵ و ۱/۰۳) مربوط به تیمار مصرف بیوچار و عدم تلقیح باکتری در غلظت ۲۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک بود که به ترتیب ۱۸/۴۸ و ۱۰/۴۳ درصد نسبت به شاهد خود کاهش نشان داد.

جدول ۸- مقایسه میانگین برش‌دهی برهمکنش اثر تیمارهای آزمایشی بر صفات مرتبط با قابلیت گیاه‌پالایی گیاه ذرت

کادمیم ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )	بیوچار	سودوموناس پوتیدا/	فاکتور تجمع زیستی ریشه	فاکتور تجمع زیستی شاخساره	فاکتور انتقال	جذب کادمیم در شاخساره ( $\text{mg.pot}^{-1}$ )
.	عدم مصرف	عدم تلقیح	۲/۰۰ <sup>a</sup>	۳/۳۳ <sup>a</sup>	۱/۶۷ <sup>b</sup>	۰/۰۰۰۰۲۱ <sup>c</sup>
		تلقیح	۱/۵۰ <sup>b</sup>	۲/۰۰ <sup>b</sup>	۱/۳۳ <sup>b</sup>	۰/۰۰۰۰۳۳ <sup>b</sup>
	مصرف	عدم تلقیح	۱/۰۰ <sup>c</sup>	۲/۳۳ <sup>b</sup>	۲/۳۳ <sup>a</sup>	۰/۰۰۰۰۱۶ <sup>c</sup>
		تلقیح	۲/۰۰ <sup>a</sup>	۲/۵۰ <sup>b</sup>	۱/۲۵ <sup>b</sup>	۰/۰۰۰۰۴۷ <sup>a</sup>
۲۵	عدم مصرف	عدم تلقیح	۰/۹۲ <sup>c</sup>	۱/۱۵ <sup>c</sup>	۱/۲۵ <sup>b</sup>	۰/۰۱۷۹۸۷ <sup>c</sup>
		تلقیح	۱/۱۴ <sup>b</sup>	۱/۲۵ <sup>b</sup>	۱/۰۹ <sup>c</sup>	۰/۰۲۸۴۳۲ <sup>b</sup>
	مصرف	عدم تلقیح	۰/۷۵ <sup>d</sup>	۱/۰۳ <sup>d</sup>	۱/۳۷ <sup>a</sup>	۰/۰۱۱۱۸۱ <sup>d</sup>
		تلقیح	۱/۲۷ <sup>a</sup>	۱/۳۷ <sup>a</sup>	۱/۰۸ <sup>c</sup>	۰/۰۴۴۳۸۹ <sup>a</sup>
۵۰	عدم مصرف	عدم تلقیح	۱/۰۰ <sup>c</sup>	۱/۲۳ <sup>c</sup>	۱/۲۳ <sup>ab</sup>	۰/۰۵۷۴۴۳ <sup>c</sup>
		تلقیح	۱/۱۶ <sup>b</sup>	۱/۴۰ <sup>b</sup>	۱/۲۰ <sup>b</sup>	۰/۰۹۲۶۱۱ <sup>b</sup>
	مصرف	عدم تلقیح	۰/۹۱ <sup>d</sup>	۱/۱۳ <sup>d</sup>	۱/۲۵ <sup>a</sup>	۰/۰۳۹۴۴۹ <sup>d</sup>
		تلقیح	۱/۲۸ <sup>a</sup>	۱/۴۶ <sup>a</sup>	۱/۱۴ <sup>c</sup>	۰/۱۳۳۸۸۷ <sup>a</sup>
۷۵	عدم مصرف	عدم تلقیح	۱/۱۴ <sup>c</sup>	۱/۲۷ <sup>c</sup>	۱/۱۱ <sup>ab</sup>	۰/۰۷۲۷۷۷ <sup>c</sup>
		تلقیح	۱/۲۴ <sup>b</sup>	۱/۳۹ <sup>b</sup>	۱/۱۲ <sup>ab</sup>	۰/۱۱۵۰۴۶ <sup>b</sup>
	مصرف	عدم تلقیح	۱/۰۰ <sup>d</sup>	۱/۱۰ <sup>d</sup>	۱/۱۰ <sup>b</sup>	۰/۰۵۴۲۶۷ <sup>d</sup>
		تلقیح	۱/۳۲ <sup>a</sup>	۱/۴۹ <sup>a</sup>	۱/۱۳ <sup>a</sup>	۰/۱۵۶۵۱۴ <sup>a</sup>
۱۰۰	عدم مصرف	عدم تلقیح	۱/۲۱ <sup>c</sup>	۱/۳۰ <sup>c</sup>	۱/۰۷ <sup>a</sup>	۰/۰۸۴۲۳۶ <sup>c</sup>
		تلقیح	۱/۳۲ <sup>b</sup>	۱/۴۱ <sup>b</sup>	۱/۰۷ <sup>a</sup>	۰/۱۲۲۷۳۲ <sup>b</sup>
	مصرف	عدم تلقیح	۱/۱۰ <sup>d</sup>	۱/۱۳ <sup>d</sup>	۱/۰۲ <sup>b</sup>	۰/۰۶۳۲۱۹ <sup>d</sup>
		تلقیح	۱/۴۶ <sup>a</sup>	۱/۵۶ <sup>a</sup>	۱/۰۷ <sup>a</sup>	۰/۱۷۷۰۴۴ <sup>a</sup>

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

### جذب کادمیم در شاخساره

براساس نتایج جدول تجزیه واریانس ۷، اثر ساده، اثر دوگانه و اثر متقابل سه‌گانه تیمارهای آزمایشی بر مقدار جذب کادمیم در شاخساره در سطح یک درصد معنی‌دار شدند. جذب کادمیم در شاخساره با بالا رفتن غلظت کادمیم یک سیر صعودی را طی کرد (جدول ۸). تلقیح باکتری و هم‌زیستی بیوچار و سودوموناس پوتیدا/ موجب افزایش جذب کادمیم در شاخساره شدند. در حالی‌که، با کاربرد بیوچار در همه غلظت‌ها به جز شاهد مقدار جذب کادمیم در شاخساره کاهش یافت (جدول ۸). همچنین جدول ۸ نشان می‌دهد کمترین میزان جذب کادمیم در شاخساره (۰/۰۰۰۰۱۶ میلی‌گرم) متعلق به

تیمار مصرف بیوچار، عدم تلقیح باکتری و عدم آلودگی کادمیم است در صورتی‌که بیشترین مقدار جذب (۰/۱۷۷۰۴۴ میلی‌گرم) در تیمار هم‌افزایی بیوچار و باکتری در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک مشاهده شد. 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 (کاس و همکاران ۲۰۰۳). در پژوهش حاضر جذب کادمیم در شاخساره که به‌عنوان فاکتور پالایش در نظر گرفته می‌شود؛ با افزایش غلظت کادمیم در خاک افزایش یافت.

نشان دهد. باتوجه‌به اینکه با مصرف بیوچار غلظت کادمیم در خاک، ریشه و شاخساره و فاکتور تجمع زیستی ریشه و شاخساره، کاهش یافت و با تلقیح باکتری و هم‌افزایی بیوچار و باکتری این صفات افزایش نشان داد، لذا می‌شود از بیوچار به‌واسطه بی‌حرکت‌سازی فلزات سنگین موجود در خاک به‌عنوان تثبیت گیاهی استفاده کرد. در حالی‌که تلقیح باکتری و هم‌افزایی بیوچار و باکتری از طریق افزایش سازگاری گیاه میزبان با خاک نامطلوب در حالت تنش، افزایش رشد گیاه، تغییر در فراهمی زیستی فلزات سنگین، از بین بردن علائم مسمومیت گیاهی و افزایش انتقال فلزات سنگین در گیاه، کارایی گیاه‌پالایی را افزایش می‌دهند.

#### سپاسگزاری

به این وسیله از مسئولین آزمایشگاه مرکزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری جهت یاری رساندن در انجام بخشی از این پژوهش تشکر و قدردانی می‌گردد.

اما، با مصرف بیوچار جذب کادمیم در شاخساره تنزل یافت؛ در حالی‌که با تلقیح باکتری و هم‌افزایی بیوچار و سودوموناس پوتیدا/ میزان جذب کادمیم در شاخساره افزایش یافت. با مصرف بیوچار و تلقیح باکتری مقدار وزن خشک شاخساره افزایش نشان داد؛ اما چون غلظت کادمیم در شاخساره با مصرف بیوچار کاهش نشان داد؛ بنابراین، میزان جذب کادمیم در شاخساره نیز با مصرف بیوچار کاهش یافت.

#### نتیجه‌گیری کلی

افزایش غلظت کادمیم موجب تجمع بیشتر آن در اندام‌های گیاهی ذرت گردید، اما باتوجه‌به بالا بودن شاخص تحمل گیاه ذرت می‌توان استفاده از این گیاه را در گیاه‌پالایی توصیه کرد. همچنین استفاده از بیوچار و باکتری سودوموناس پوتیدا/ توانست موجب افزایش شاخص تحمل شود. بنابراین ذرت می‌تواند تحمل بالاتری را در برابر کادمیم بدون علائم سمیت یا با سمیت کمتر

#### منابع مورد استفاده

- Abbas A, Azeem M, Naveed M, Latif A, Bashir S, Ali A, Bilal M and Ali L. 2020. Synergistic use of biochar and acidified manure for improving growth of maize in chromium contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, 22 (1): 52-61.
- Abbas S, Javed MT, Shahid M, Hussain I, Haidera MZ, Chaudhary HJ, Tanwir K and Maqsood A. 2020. *Acinetobacter* sp. SG-5 inoculation alleviates cadmium toxicity in differentially Cd tolerant maize cultivars as deciphered by improved physio-biochemical attributes, antioxidants and nutrient physiology. *Plant Physiology and Biochemistry*, 155: 815-827.
- Adiloglu S. 2020. Interaction of some heavy metals with copper content in dock plant. *Journal of Agriculture and Nature*, 23 (4): 1078-1084.
- Alaboudi KA, Ahmed B and Brodie G. 2019. Effect of biochar on Pb, Cd and Cr availability and maize growth in artificial contaminated soil. *Annals of Agricultural Sciences*, 62: 95-102.
- Aprile A and De Bellis L. 2020. Editorial for special issue "heavy metals accumulation, toxicity, and detoxification in plants". *International Journal of Molecular Sciences*, 21 (11): 1-5.
- Baker AJM and Brooks RR. 1989. Terrestrials higher plants which hyper accumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1: 81-126.
- Bertan AS, Baumbach FP, Tonialb IB, Pokrywiecki TS and Dusman E. 2020. Assessment of phytoremediation potencial of *Allium cepa* L. in raw sewage treatment. *Brazilian Journal of Biology*, 80 (2): 431-436.
- Chiwetalu UJ, Mbajiorgu CC and NJ Ogbuagu. 2020. Remedial ability of maize (*Zea mays*) on lead contamination under potted condition and non-potted field soil condition. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 5: 51-59.

- Cluis C. 2004. Junk-greedy greens: phytoremediation as a new option for soil decontamination. *Journal of Biotechnology*, 2: 60-67.
- Cui L, Yan J, Yang Y, Li L, Quan G, Ding C, Chen T, Fu Q and Chang A. 2013. Influence of biochar on microbial activities of heavy metals contaminated paddy fields. *BioResources*, 8 (4): 5536-5548.
- Danish S, Tahir FA, Rasheed MK, Ahmad N, Ali MA, Kiran S, Younis U, Irshad I and Butt B. 2019. Effect of foliar application of Fe and banana peel waste biochar on growth, chlorophyll content and accessory pigments synthesis in spinach under chromium (IV) toxicity. *Open Agriculture*, 4: 381-390.
- Diab EE, Makeen EA and Elhassan HE. 2020. Phytoremediation of cadmium contaminated-soil by maize (*Zea mays*) plant. *International Journal of Agriculture and Environmental Research*, 6 (2): 252-265.
- El-Hassanin AS, Samak MR, Abdel-Rahman GN, Abu-Sree YH and Saleh EM. 2020. Risk assessment of human exposure to lead and cadmium in maize grains cultivated in soils irrigated either with low-quality water or freshwater. *Toxicology Reports*, 7: 10-15.
- Hawkes JS. 1997. What is a heavy metal?. *Journal of Chemical Education*, 74: 1369-1374.
- Hussain A, Abbas N, Arshad F, Akram M, Khan ZI, Ahmad K, Mansha M and Mirzaei F. 2013. Effects of diverse doses of lead (Pb) on different growth attributes of *Zea mays* L.. *Agricultural Sciences*, 4 (5): 262-265.
- Ibrahim N and El Afandi G. 2020. Phytoremediation uptake model of heavy metals (Pb, Cd and Zn) in soil using *Nerium oleander*. *Heliyon*, 6 (7): 1-7.
- Jafari M, Moameri M, Jahantab E and Zargham N. 2017. Effects of municipal solid waste compost and biochar on the phytoremediation potential of *Bromus tomentellus* Boiss. in greenhouse condition. *Journal of Rangeland*, 11 (2): 194-206.
- Jahantab E, Jafari M, Motasharezadeh B, Tavili A and Zargham N. 2016. Evaluation of the phyto-remediation of rangeland plants in soils contaminated with petroleum, with an emphasis on heavy metal Ni. *Environmental Sciences*, 14 (3): 107-122.
- Kabiri P, Motaghian HR and Hosseinpour AR. 2018. Phytoremediation potential of maize (*Zea mays* L.) using biochars produced from walnut leaves in a contaminated soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 25 (4): 133-152.
- Khalofah A, Bokhari NA, Migdadi HM and Alwahibi MS. 2019. Antioxidant responses and the role of *Moringa oleifera* leaf extract for mitigation of cadmium stressed *Lepidium sativum* (L.). *South African Journal of Botany*, 129: 341-346.
- Kos B, Grcman H, and Lestan D. 2003. Phytoextraction of lead, zinc and cadmium from soil by selected plants. *Plant and Soil Environmental*, 49: 548-553.
- Labrecque M, Hu Y, Vincent G and Shang K. 2020. The use of willow microcuttings for phytoremediation in a copper, zinc and lead contaminated field trial in Shanghai, China. *International Journal of Phytoremediation*, 22 (13): 1331-1337.
- Li Y, Lin J, Huang Y, Yao Y, Wang X, Liu C, Liang Y, Liu K and Yu F. 2020. Bioaugmentation-assisted phytoremediation of manganese and cadmium co-contaminated soil by Polygonaceae plants (*Polygonum hydropiper* L. and *Polygonum lapathifolium* L.) and *Enterobacter* sp. FM-1. *Plant and Soil*, 448: 439-453.
- Lindsay WL and Norvell WA. 1978. Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42: 421-428.
- Liu S, Pu S, Deng D, Huang H, Yan C, Ma H and Razavie BS. 2020. Comparable effects of manure and its biochar on reducing soil Cr bioavailability and narrowing the rhizosphere extent of enzyme activities. *Environment International*, 134: 1-11.
- Luo JS, Xiao Y, Yao J, Wu Z, Yang Y, Ismail AM and Zhang Z. 2020. Overexpression of a defensin-like gene CAL2 enhances cadmium accumulation in plants. *Frontiers in Plant Science*, 11 (217): 1-10.

- Lux A, Sotníková A, Opatrna J and 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.
- Ma LQ, Komar KM, Tu C, Zhang W, Cai Y and Kenelly ED. 2001. A fern that hyper accumulates arsenic. *Nature*, 409: 579-582.
- Ma QJ, Sun MH, Lu J, Hu DG, Kang H, You CX and Hao YJ. 2020. Phosphorylation of a malate transporter promotes malate excretion and reduces cadmium uptake in apple. *Journal of Experimental Botany*, 71 (12): 3437-3449.
- Mahohi A, Raiesi F and Hosseinpur AR. 2018. Phytoremediation of lead in the presence of individual and combined inoculation of earthworms, arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobacteria by maize. *Journal of Soil and Water Conservation*, 25 (2): 91-110.
- Medynska-Juraszek A and Cwielałag-Piasecka I. 2020. Effect of biochar application on heavy metal mobility in soils impacted by copper smelting processes. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29 (2): 1749-1757.
- Medynska-Juraszek A, Rivier PA, Rasse D and Joner EJ. 2020. Biochar affects heavy metal uptake in plants through interactions in the rhizosphere. *Applied Sciences*, 10 (15): 1-12.
- Mokarram-Kashtiban S, Hosseini SM, Tabari Kouchaksaraei M and Younesi H. 2019. Bioavailability of soil heavy metals as influenced by biochar and rhizosphere bacteria in the white willow (*Salix alba* L.) phytoremediation process. *Applied Soil Research*, 7 (4):196-211.
- Narimani S, Bazgir E and Mirzaei Najafgholi H. 2017. Evaluation of effective factors on survival and activity of petroleum degradation bacteria in bioremediation process. *Journal of Cellular and Molecular Research (Iranian Journal of Biology)*, 30 (1): 85-93.
- Odiyi BO, Giwa GO, Abiya SE and Babatunde OS. 2020. Effects of crude oil pollution on the morphology, growth and heavy metal content of maize (*Zea mays* Linn.). *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 24 (1): 119-125.
- Piotto FA, Carvalho MEA, Souza LA, Rabelo FHS, Franco MR, Batagin-Piotto KD and Azevedo RA. 2018. Estimating tomato tolerance to heavy metal toxicity: cadmium as study case. *Environmental Science and Pollution Research*, 25: 27535-27544.
- Rasouli Sadaghiani MH, Khodaverdiloo H, Barin M and Kazemalilou S. 2018. Evaluation of the potential of soil microbial activity on Cd phytoremediation in a contaminated soil. *Journal of Soil and Water Science*, 22 (1): 305-316.
- Shafiq S, Adeel M, Raza H, Iqbal R, Ahmad Z, Naeem M, Sheraz M, Ahmed U, and Azmi UR. 2019. Effects of foliar application of selenium in maize (*Zea mays* L.) under cadmium toxicity. *Biological Forum*, 11 (2): 27-37.
- Shokri Z, Boroomand N, Sarcheshmeh Pour M and Alizadeh HR. 2016. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on cadmium phytoremediation by marigold (*Tagetes erecta*). *Journal of Soil Management and Sustainable*, 6 (1): 191-204.
- Sobariu DL, Tudorache Fertu DL, Diaconu M, Pavel LV, Hlihor RM, Dragoi EN, Curteanu S, Lenz M, Corvini PFX and Gavrilescu M. 2016. Rhizobacteria and plant symbiosis in heavy metal uptake and its implications for soil bioremediation. *New Biotechnology*, 39: 125-134.
- Sofy MR, Seleiman MF, Alhammad BA, Alharbi BM and Mohamed HI. 2020. Minimizing adverse effects of Pb on maize plants by combined treatment with jasmonic, salicylic acids and proline. *Agronomy*, 10 (5): 1-19.
- Subramaniam N and Sundaram L. 2020. Siderophore producing *Pseudomonas* spp. isolated from rhizospheric soil and enhancing iron content in *Arachis hypogaea* L. plant. *International Journal of Agricultural Technology*, 6 (2): 429-442.

- Sun J, Cui L, Quan G, Yan J, Wang H and Wu L. 2020. Effects of biochar on heavy metals migration and fractions changes with different soil types in column experiments. *BioResources*, 15 (2): 4388-4406.
- Tirry N, Tahri Joutey N, Sayel H, Kouchou A, Bahafid W, Asri M and El Ghachtouli N. 2018. Screening of plant growth promoting traits in heavy metals resistant bacteria: Prospects in phytoremediation. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 16: 613-619.
- Woodis Jr TC, Hunter GB and Johnson FJ. 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.
- Wu Q, Huang L, Su N, Shabal L, Wang H, Huan X, Wen R, Yu M, Cui J, and Shabala S. 2020. Calcium-dependent hydrogen peroxide mediates hydrogen-rich water-reduced cadmium uptake in plant roots. *Plant Physiology*, 183: 1331-1344.
- Zhang WH, Cai Y, Tu C and Ma QL. 2002. Arsenic speciation and distribution in an arsenic hyperaccumulating plant. *Environmental Science*, 300: 167-177.
- Zhang Y, Li C, Ji X, Yun C, Wang M and Luo X. 2020. The knowledge domain and emerging trends in phytoremediation: a scientometric analysis with CiteSpace. *Environmental Science and Pollution Research*, 27: 15515-15536.
- Zubbri NA, Mohamed AR, Kamiuchi N and Mohammadi M. 2020. Enhancement of CO<sub>2</sub> adsorption on biochar sorbent modified by metal incorporation. *Environmental Science and Pollution Research*, 27: 11809-11829.