



Investigating The Combined Effect of Citric Acid and *Bacillus cereus* on Phytoextraction of Cadmium by *Salsola imbricata*

Mehdi Ramazani¹, Asghar Mosleh Arani^{2*} , Hamid Sodaeezadeh¹, Mehdi khayat³ and Mohsen Sadeghian¹

1- Department of Arid Land and Desert Management, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran

2- Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, Yazd University, Yazd, Iran

3- Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

* Corresponding author, Email: amosleh@yazd.ac.ir

(Received: 30 January 2025; Revised: 8 June 2025; Accepted: 18 June 2025)

Abstract

Background and Objective: Biological stimulants have been considered to increase the efficiency of phytoremediation of heavy elements. The present study was conducted with the aim of evaluating the effect of the combined use of citric acid and plant growth promoting rhizobacterium (*Bacillus cereus*) on the plant-remediation ability of *Salsola imbricata* in cadmium-contaminated soils.

Methods: To carry out this research, a factorial experiment within a completely randomized design including cadmium with three levels (control, 30 and 60 mg/kg soil), seed inoculation with *Bacillus cereus* and citric acid with two levels (0 and 1 g/L) was considered in three replications. At the end of the study, shoot dry weight, root dry weight, stem height, dry biomass index, nutrient concentration, chlorophyll, proline and anthocyanin, and the amount of lead accumulation in the plant were measured.

Results: With the increase of cadmium concentration, the plant dry biomass, the amount of chlorophyll and the iron concentration in the plant decreased by 56, 53 and 35%, respectively, while the cadmium concentration, and proline and anthocyanin contents in the plant increased by 75, 71 and 41%, respectively. The use of citric acid and inoculation with plant growth promoting rhizobacterium improved the growth conditions of the plant, so that the combined use of these two at a concentration of 30 mg/kg cadmium increased biomass, chlorophyll and iron concentration in the plant by 43, 56 and 29%, respectively. The combined use of bacterium and citric acid also caused a 58% increase in root cadmium accumulation. The amount of cadmium in the aerial parts of the plant was undetectable.

Conclusion: Therefore, it was concluded that *Salsola imbricata* is a suitable plant for cadmium phytoextraction and the use of citric acid and *Bacillus cereus* can increase its ability for phytoextraction of cadmium.

Keywords: *Bacillus*, Heavy metals, Natural chelating agents, Phytoremediation.

How to Cite: Ramazani, M., Mosleh Arani, A., Sodaeezadeh, H., Khayat, M., Sadeghian, M., 2025. Investigating the combined effect of citric acid and *Bacillus cereus* on phytoextraction of cadmium by *Salsola imbricata*. J. Soil Plant Interact. 16(1), 89–102 (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jspi.16.1.20912>



Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.



بررسی تاثیر اسید سیتریک و باکتری محرک رشد *Bacillus cereus* بر گیاه استخراجی کادمیم در گیاه بیابانی شور جنوبی (*Salsola imbricata*)

مهدی رمضانی^۱، اصغر مصلح آرانی^{۲*}، حمید سودائی زاده^۱، مهدی خیاط^۳ و محسن صادقیان^۱

۱- گروه مدیریت و کنترل بیابان، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۳- گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: amosleh@yazd.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۳/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۲۸)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: در سال‌های اخیر استفاده از محرک‌های زیستی برای افزایش کارایی فرایند گیاه‌پالایی عناصر سنگین مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تاثیر کاربرد توام اسید سیتریک و باکتری محرک رشد گیاه (*Bacillus cereus*) بر توان گیاه‌پالایی گونه بیابانی شور جنوبی (*Salsola imbricata*) در خاک‌های آلوده به کادمیم انجام شد.

روش‌ها: برای انجام این پژوهش، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار شامل کادمیم با سه سطح (صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک)، تلقیح بذور با باکتری *Bacillus cereus* هنگام کاشت و اسید سیتریک با دو سطح (صفر و ۱ گرم در لیتر) در نظر گرفته شد. در پایان، وزن خشک شاخساره، وزن خشک ریشه، ارتفاع ساقه، شاخص زیست‌توده خشک، غلظت عناصر غذایی، کلروفیل، پرولین و آنتوسیانین و مقدار تجمع سرب در گیاه اندازه‌گیری شد.

نتایج: با افزایش غلظت کادمیم، زیست‌توده خشک گیاه، مقدار کلروفیل و مقدار جذب آهن در گیاه به ترتیب ۵۶، ۵۳ و ۳۵ درصد کاهش یافت. در صورتی که غلظت کادمیم برگ، پرولین و آنتوسیانین به ترتیب ۷۵، ۷۱ و ۴۱ درصد افزایش یافت. کاربرد اسید سیتریک و تلقیح با باکتری محرک رشد گیاه شرایط رشدی گیاه را بهبود بخشید، به طوری که کاربرد توام این دو در غلظت ۳۰ میلی گرم در کیلوگرم کادمیم، زیست‌توده، مقدار کلروفیل و غلظت آهن در گیاه را به ترتیب ۴۳، ۵۶ و ۲۹ درصد افزایش داد. کاربرد توام باکتری محرک رشد و اسید سیتریک هم‌چنین باعث افزایش ۵۸ درصدی جذب کادمیم در ریشه شد. مقدار کادمیم در شاخساره گیاه کمتر از حد تشخیص دستگاه بود.

نتیجه‌گیری کلی: یافته‌های این پژوهش نشان داد که گیاه شور جنوبی پتانسیل گیاه‌پالایی کادمیم را داشته و کاربرد اسید سیتریک و باکتری *Bacillus cereus* می‌تواند توانایی آن را برای گیاه‌تنبیتی کادمیم به طور معنی‌داری افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: باسیلوس، عناصر سنگین، کلات‌کننده‌های طبیعی، گیاه‌پالایی.



مقدمه

یکی از مباحث مهم به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، با پیشرفت سریع روند صنعتی شدن، آلودگی خاک به فلزات سنگین است (Chen et al., 2024). آلودگی خاک با عناصر سنگین به‌طور مستقیم اکوسیستم‌ها و سلامت انسان را به خطر می‌اندازد و یکی از پیامدهای آن ناامنی غذایی است (Hussain et al., 2021). عناصر سنگین در بخش‌های مختلف زنجیره غذایی تجمع می‌یابند (Okerefor et al., 2020). برخی فعالیت‌های انسانی مانند استخراج و ذوب سنگ‌های معدنی فلزدار و دپو باطله‌های معدنی در طبیعت از راه فعالیت‌های طبیعی مانند فرسایش بادی و آبی، باعث ورود عناصر سنگین به خاک شده و رشد گیاهان را در این مناطق محدود می‌سازند (Ali et al., 2015). در اثر معدن‌کاری بخش قابل توجهی از کانی‌های دارای عناصر، وارد خاک‌های مناطق اطراف معادن می‌شود. رواناب هم ممکن است با حرکت از کوه به طرف دشت، عناصر آلاینده را از معدن به خاک انتقال دهد.

کادمیم یکی از سمی‌ترین عناصر فلزی سنگین در طبیعت است. این عنصر معمولاً در خاک به دو شکل آلی و غیرآلی وجود دارد و با اکسیدها یا کربنات‌ها ترکیب می‌شود (Hussain et al., 2021). در گیاهان زراعی، سمیت کادمیم باعث کاهش جذب و انتقال مواد غذایی و آب، افزایش آسیب اکسیداتیو، اختلال در متابولیسم گیاه و ایجاد محدودیت‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک در گیاه می‌شود (Haider et al., 2021). افزایش کادمیم در گیاه موجب کاهش توقف رشد ریشه و چوب‌پنبه‌ای شدن آن، تداخل با جذب و انتقال عناصر غذایی، کاهش میزان کلروفیل و اختلال در فعالیت آنزیم‌های مهم در فتوسنتز می‌شود. کادمیم با کاهش میزان تعلق و فتوسنتز و همچنین کاهش جذب عناصر غذایی، باعث کاهش مقاومت گیاه و مانع رشد ریشه و ساقه شده و در نهایت پیامد آن کاهش عملکرد گیاهان است (Shah et al., 2021). برای کاهش سمیت فلزات سنگین در خاک‌های آلوده بایستی اصلاح خاک انجام شود. روش‌های مرسوم مورد استفاده برای زدایش فلزات سنگین از خاک‌های

آلوده شامل حفاری، انتقال و ریختن خاک آلوده در مکان‌های مجاز به‌منظور دفع ضایعات خطرناک، فرآوری شیمیایی خاک به منظور غیرمتحرک کردن فلزات و آب‌شویی می‌باشند. تیمارهای فیزیکی و شیمیایی به صورت برگشت‌ناپذیر ویژگی‌های خاک را تحت تأثیر قرار داده، تنوع زیستی را از بین برده و ممکن است خاک را به یک محیط نامساعد برای رشد گیاهان مبدل سازند و البته این روش‌ها پرهزینه هستند (Ogundiran et al., 2024). بسیاری از این روش‌ها تنها آلاینده را به آلاینده دیگری تبدیل کرده یا آن را به بستر دیگری منتقل می‌کنند، اما زیست‌پالایی می‌تواند آلاینده‌ها را برای همیشه از بین برده و یا آنها را به مواد بی‌ضرر تبدیل کند (Mohammadi et al., 2019). زیست‌پالایی به عنوان یک روش پاک‌سازی موثر و ارزان عرضه شده است که در آن جذب و جمع‌آوری آلاینده‌ها در بافت‌های قابل‌برداشت گیاهی مدنظر است.

گونه‌های گیاهی خاص که غلظت‌های زیاد فلزات سنگین را بدون بروز علائم مسمومیت در بافت‌های خود ذخیره می‌کنند، نیز دارای توانایی احیای مجدد محیط‌زیست در فرآیندی تحت عنوان گیاه‌پالایی هستند (Zhang et al., 2014). این فناوری مستلزم استفاده از گیاهان انباشت‌گر فلزات به‌منظور زدایش، جابه‌جایی و یا تثبیت آلاینده‌های فلزی موجود در خاک است، با این وجود زمان‌بر بودن این فناوری یکی از معایب اصلی آن محسوب می‌شود. برای تسریع و افزایش توان گیاه‌پالایی گیاهان از تیمارهای شیمیایی و بیولوژیک استفاده می‌شود. محدودیت اصلی برای کاربرد روش گیاه‌پالایی، انحلال‌پذیری و زیست-فراهمی کم برخی از فلزات سنگین در خاک است. عوامل کلات‌کننده می‌توانند با سرعت‌بخشیدن به آزادسازی فلزات سنگین از بخش جامد و غیرفراهم خاک، کارایی جذب این فلزات توسط گیاهان را افزایش دهند (Zhang et al., 2014).

توجه به اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم مانند اسید سیتریک به‌عنوان عوامل کلات‌کننده طبیعی افزایش یافته است، زیرا این اسید آلی تجزیه‌پذیری زیاد و سمیت کمی داشته و از قدرت کلات‌کنندگی زیادی برخوردار است (Shahid et al.,

گیاه‌پالایی کمک می‌نماید.

هدف از انجام این پژوهش، بررسی تاثیر باکتری‌های محرک رشد گیاه و اسید سیتریک بر افزایش توان گیاه‌پالایی گیاه شور جنوبی در برابر تنش آلودگی خاک به کادمیم بود. نتایج این پژوهش می‌تواند در جنگل‌کاری بهینه شور جنوبی در مناطق خشک و بیابانی که در اثر فعالیت‌های معدنی، دارای خاک‌های آلوده به کادمیم می‌باشند، مفید باشد.

مواد و روش‌ها

برای بررسی تاثیر باکتری محرک رشد گیاه و اسید سیتریک بر ویژگی‌های رویشی و فیزیولوژیک گونه شور جنوبی تحت تنش آلودگی کادمیم، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در بهار و تابستان ۱۴۰۲ به مدت ۶ ماه در ایستگاه تولید نهال بیابانی اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری خراسان جنوبی اجرا شد. عامل اول باکتری محرک رشد گیاه (در دو سطح بدون تلقیح باکتری و تلقیح با باکتری *Bacillus cereus*)، عامل دوم اسید سیتریک (در دو سطح بدون اسید سیتریک و اسید سیتریک با غلظت ۱ گرم در لیتر) و عامل سوم کادمیم (در سه سطح شاهد، ۳۰ و ۶۰ میلی گرم در لیتر آب آبیاری معادل حدود ۳۰ و ۶۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک بر اساس محاسبه حجم آب آبیاری و جرم خاک در این پژوهش) بود.

بذرهای شور جنوبی (*Salsola imbericata*) از عرصه‌های طبیعی در خراسان جنوبی (شهرستان طبس) جمع‌آوری شد. برای انجام آزمایش، تعداد ۳۶ گلدان زهکش‌دار با ارتفاع ۱۸ و قطر دهانه ۲۰ سانتی‌متر، محتوی ۳ کیلوگرم خاک با سه واحد خاک زراعی بدون هوموس و یک واحد ماسه بادی (برای ایجاد بافت خاک سبک) تهیه شد (جدول ۱). بذور این گیاه از رویشگاه آن در خراسان جنوبی جمع‌آوری شد. نتایج جوانه‌زنی بذور در آزمایشگاه درصد جوانه‌زنی بیش از ۹۰ درصد را نشان داد. در هر گلدان، تعداد ۵ عدد بذر ضدعفونی‌شده کاشته شد. بذور بر حسب نوع تیمار، بدون تلقیح (شاهد) یا تلقیح‌شده با باکتری محرک رشد گیاه (*Bacillus cereus*) کشت شد. این سویه باکتری

(2018). اسید سیتریک ضمن تشکیل کمپلکس‌های تجزیه‌پذیر با فلزات سنگین به‌طور قابل توجهی حلالیت و جذب فلزات را به وسیله گیاه افزایش می‌دهد (Freitas et al., 2013). این اسید هم-چنین می‌تواند به‌طور غیرمستقیم فعالیت میکروبی خاک و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ریزوسفر را بهبود بخشیده و فراهمی عناصر غذایی برای گیاه را افزایش دهد.

باکتری‌های محرک رشد گیاه گروهی از باکتری‌ها هستند که رشد و عملکرد گیاه را افزایش می‌دهند و هم‌چنین باعث مقاومت گیاهان به آلودگی عناصر سنگین می‌شوند. این باکتری‌ها به دلیل برخورداری از صفات چندگانه‌ای مانند مقاومت نسبت به فلزات و تبدیل آن‌ها به فرم‌های با سمیت کمتر و هم‌چنین توانایی ارتقای رشد گیاهان از راه سازوکارهای مختلف، یکی از گزینه‌های مناسب برای استفاده در پژوهش‌های گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین هستند.

در اکوسیستم‌های خاکی، افزایش کارایی گیاه‌پالایی علاوه بر گیاه، به نوع و غلظت فلزات سنگین در خاک و برهم‌کنش‌های سویه باکتریایی، گیاه و خاک بستگی دارد. در این میان، باکتری‌هایی که از زیستگاه‌های تحت تنش عناصر سنگین انتخاب می‌شوند به دلیل سازگاری با این شرایط از کارایی بیشتری در افزایش مقاومت گیاه برخوردار خواهند بود (Hajabadi et al., 2021). باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه با استفاده از سازوکارهای مختلفی به‌طور مستقیم در افزایش رشد و عملکرد گیاه نقش ایفا می‌کنند (Amini et al., 2022). در حالت غیرمستقیم نیز باکتری‌های محرک رشد گیاه با استفاده از سازوکارهای مختلف آنتاگونیستی، آثار مضر بیمارگرهای گیاهی را خنثی یا تعدیل کرده و به این ترتیب موجب رشد گیاه می‌شوند (Goswami and Deka, 2020). باکتری‌های محرک رشد گیاه به-دلیل برخورداری از این ویژگی‌ها، هنگامی که با بذر تلقیح شده و یا در خاک به کار رفته‌اند، سبب کاهش قابل توجه سمیت فلزات و در عین حال بهبود همه جانبه رشد گیاهان شده‌اند. بنابراین استفاده از این ریزجانداران به عنوان مایه تلقیح برای بهبود رشد گیاه و افزایش جذب فلز سنگین به افزایش کارایی

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این آزمایش

Table 1. Some physical and chemical properties of the soil used in the experiment

نیترژن	فسفر	پتاسیم	سدیم	کلسیم	سولفات	رس	سیلت	شن
(درصد) N (%)	(میلی گرم در کیلوگرم) P (mg/kg)	(میلی گرم در کیلوگرم) K (mg/kg)	(میلی اکی والان در لیتر) Na (meq/L)	(میلی اکی والان در لیتر) Ca (meq/L)	(میلی اکی والان در لیتر) Sulfate (meq/L)	(درصد) Clay (%)	(درصد) Silt (%)	(درصد) Sand (%)
0.03	17	897	2.27	1.6	42	29	13	58

ادامه جدول ۱.

Table 1. (Continued)

رسانایی الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) EC (dS/m)	pH	ماده آلی (درصد) Organic matter (%)	نسبت کربن به نیترژن (درصد) C/N (%)	کربنات کلسیم معادل (درصد) Calcium carbonate equivalent (%)	بافت خاک Soil texture
2.1	7.5	0.26	5.5	31	لوم رسی شنی Sandy clay loam

جدول ۲. صفات محرک رشد در *Bacillus cereus*Table 2. Plant growth promoting rhizobacteria treats in *Bacillus cereus*

سیدروفور (Siderophore)	سیانید هیدروژن (Hydrogen cyanide)	ACC دامیناز (1-Aminocyclopropane-1 carboxylic acid deaminase)	توان حل فسفات‌های معدنی (Phosphate solubilization)	IAA (Indole acetic acid)	ریزوباکتری (Rhizobacteria)
-	+	+	۱۳۷	۳/۶	<i>Bacillus cereus</i>

(+) و - به ترتیب توان تولید و عدم توان تولید متابولیت

نظر که هنوز در مرحله رویشی قرار داشتند، برای انجام آزمایش-های فیزیولوژیک، مورفولوژیک و بیوشیمیایی انجام شد. در این مرحله ویژگی‌های رشد و مورفولوژیک (وزن خشک شاخساره و وزن خشک ریشه، ارتفاع ساقه، قطر یقه) اندازه‌گیری شده و در نهایت، شاخص زیست‌توده خشک کل (مجموع وزن خشک ریشه و شاخساره) محاسبه شد. به منظور اندازه‌گیری غلظت عناصر غذایی، عصاره نمونه‌ها با هضم خشک به روش سوزاندن و ترکیب با اسید کلریدریک تهیه شد. غلظت آهن و منیزیم با دستگاه جذب اتمی و عناصر پتاسیم و کلسیم به روش نشر شعله‌ای و با دستگاه فلیم فتومتری اندازه‌گیری شد (Walinga et al., 1989).

اندازه‌گیری کلروفیل کل: بدین منظور ۰/۲ گرم بافت تازه برگ با ۱۰ میلی لیتر استون ۸۰ درصد درون هاون چینی به‌خوبی ساییده شد و به روش Lichtenthaler (1987) و با استفاده از دستگاه اسپکتوفوتومتر مدل Specord 210 plus اندازه‌گیری شد. غلظت رنگیزه‌های کلروفیل a و b بر حسب میلی گرم در گرم با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\text{Chl a} = 12.5\text{A}663.2 - 2.79\text{A}646.8$$

$$\text{Chl b} = 21.5\text{A}646.8 - 5.1\text{A}663.2 \quad (1)$$

$$\text{Total chlorophyll} = \text{Chl a} + \text{Chl b}$$

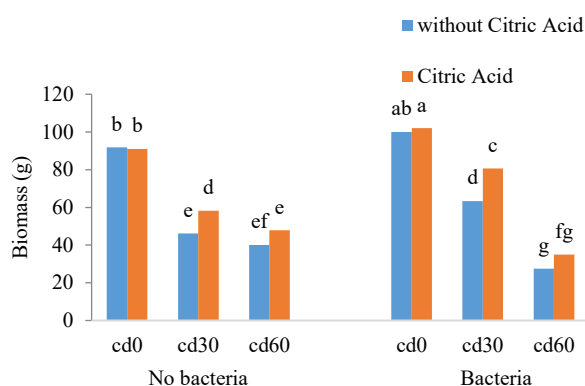
که در این فرمول Chl a و Chl b به ترتیب غلظت کلروفیل a و کلروفیل b و A و B در روابط مختلف مقادیر قرائت‌شده توسط دستگاه اسپکتوفوتومتر برای کلروفیل a و کلروفیل b است.

اندازه‌گیری پرولین: میزان پرولین موجود در برگ با استفاده از ۰/۵ گرم ماده تازه برگ تازه بر اساس واکنش با معرف

از ریزوسفر گیاه کک‌کش (*Pulicaria gnaphaloides*) توسط آذری (۱۳۹۹) از باطله‌های معدن سرب و روی کوشک بافق خالص‌سازی شده، صفات محرک رشد (جدول ۲) آن‌ها تعیین شده و اثر مثبت آن بر گندم ارزیابی شده بود.

گلدان‌ها تا رویش بذور و استقرار کامل با آب شرب آبیاری شدند. یک ماه پس از کاشت، نهال‌ها وجین شدند، به‌طوری‌که در هر گلدان یک نهال هم‌اندازه (۷ سانتی‌متری) نگهداشته شد. اعمال تیمار کادمیم و اسید سیتریک از هفته پنجم (که گیاهان در حالت رویشی قرار داشتند) آغاز شد. آبیاری برای تیمارهای بدون کادمیم با آب شرب و برای تیمارهای کادمیم با غلظت تعیین‌شده تا انتهای آزمایش انجام شد. اسید سیتریک برای تیمارهای مربوطه به‌صورت اسپری بر روی گیاه اعمال شد، به‌طوری‌که گیاه کاملاً خیس شده و مقداری از قطرات اسید سیتریک بر روی خاک گلدان ریخته شد و امکان جذب اسید سیتریک توسط ریشه نیز فراهم شد.

تهیه و تلقیح باکتری محرک رشد گیاه: برای تهیه مایه تلقیح، یک کلنی خالص از باکتری *Bacillus cereus* برداشته و تحت شرایط استریل به یک ارلن دارای محیط کشت نوترینت براث افزوده شد. ارلن باکتری روی شیکر با سرعت ۱۲۰ دور بر دقیقه و دمای ۲۸ درجه سلسیوس قرار داده شد، پس از ۴۸ ساعت مایع تلقیح باکتری با جمعیت تقریبی 3×10^8 باکتری در میلی لیتر آماده مصرف شدند. سوسپانسیون باکتری پیش از کاشت به بذور شور جنوبی (*Salsola imbericata*) به مدت ۴ ساعت تلقیح شد. اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک، مورفولوژیک و عناصر غذایی: شش ماه پس از شروع آزمایش نمونه‌برداری از نهال‌های مورد



شکل ۱. مقایسه میانگین مقدار وزن خشک گیاه شور جنوبی تحت تاثیر برهمکنش تیمارهای باکتری-اسید سیتریک و کادمیم. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده‌ی نبود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند (cd0, cd30 و cd60 به ترتیب مقادیر صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی گرم کادمیم در هر کیلوگرم خاک گلدان است).

Fig. 1. Mean comparison of plant biomass in *Salsola imbricata* affected by bacteria-citric acid and cadmium interaction. Means with at least one similar letter are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$). cd0, cd30 and cd60 are cadmium rates of 0, 30 and 50 mg per kg of pot soil, respectively.

تیمارها با تجزیه واریانس و در نهایت مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن (در سطح احتمال ۵ درصد) انجام شد.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر برهم‌کنش باکتری × اسید سیتریک × کادمیم بر صفات اندازه‌گیری شده معنی‌دار بود.

مقایسه میانگین‌ها

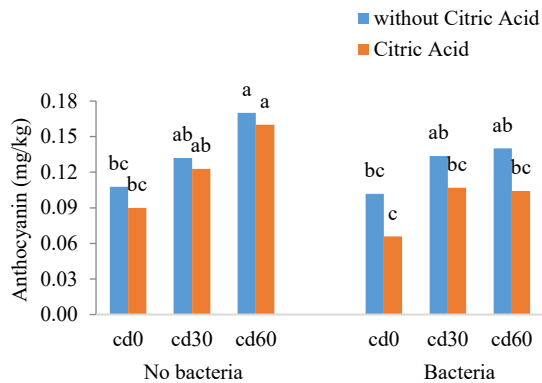
نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم وزن خشک گیاه ۵۶ درصد کاهش یافت. اسید سیتریک در غلظت ۳۰ mg/kg، وزن خشک گیاه را در گیاهان تلقیح‌شده با باکتری و بدون تلقیح با باکتری افزایش داد. تلقیح باکتری برای تیمار اسید سیتریک باعث افزایش وزن خشک گیاه به مقدار ۴۳ درصد در غلظت mg/kg ۳۰ شد در حالی‌که در غلظت mg/kg ۶۰ وزن خشک گیاه کاهش یافت (شکل ۱).

نین‌هیدرین و با دستگاه اسپکتوفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر بر حسب میکروگرم در گرم وزن تازه اندازه‌گیری شد (Bates et al., 1973).

اندازه‌گیری آنتوسیانین: برای سنجش آنتوسیانین از روش Wanger (1979) استفاده شد. ۱ گرم از بافت مورد نظر را در هاون چینی با ۱۰ میلی لیتر متانول اسیدی کاملاً سائیده و عصاره در لوله‌های آزمایش سرپیچ‌دار ریخته شد و به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی و دمای ۲۵ درجه سلسیوس قرار گرفت. سپس عصاره به مدت ۱۰ دقیقه در ۴۰۰۰ rpm سانتریفوژ شده و جذب محلول رویی در طول موج ۵۵۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. محاسبه غلظت با استفاده از ضریب خاموشی $M^{-1}cm^{-1}$ ۳۳۰۰۰ انجام شده و نتایج بر حسب میکرومول در گرم وزن تازه گزارش شد.

اندازه‌گیری عنصر کادمیم: هضم نمونه‌های گیاهی (ریشه و شاخساره) به روش سوزاندن خشک و ترکیب با اسید هیدروکلریک انجام شد. برای هضم نمونه‌ها به این روش، ۲ گرم نمونه خشک گیاهی پس از توزین، در کروزه‌های چینی ریخته شد. سپس به مدت چهار ساعت در کوره با دمای معمولی قرار گرفت. پس از خروج کروزه‌ها از کوره (خاکستر باید کاملاً سفید شده باشد) و پس از خنک‌شدن خاکستر، به آرامی مقدار ۱۰ میلی لیتر اسید هیدروکلریک دو مولار به آن افزوده شد. پس از اتمام واکنش‌ها، کروزه‌ها بر روی اجاق برقی گرمادهی شدند. سپس محتویات کروزه‌ها از کاغذ صافی عبور داده شد و به درون بالن ۱۰۰ میلی لیتری صاف شد. پس از آن، کروزه‌ها و کاغذ صافی را چندین بار با آب مقطر شستشو داده و سپس عصاره حاصل به حجم رسانده شد. در نهایت در این عصاره غلظت عناصر سنگین سرب، کادمیم و روی با استفاده از دستگاه جذب اتمی شعله‌ای Analytic Jena مدل NovAA 300 (ساخت کشور آلمان) اندازه‌گیری شد (Chardonens et al., 1998).

تجزیه آماری: به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده از نرم‌افزار SPSS16 استفاده شد و نمودارها با نرم‌افزار Excel رسم گردید. پس از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف، اختلاف بین سطوح مختلف

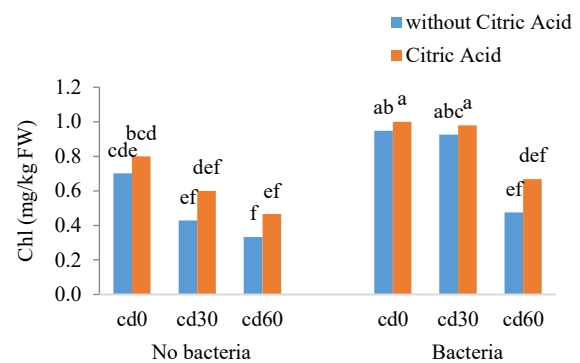


شکل ۳. مقایسه میانگین مقدار آنتوسیانین در گیاه شور جنوبی تحت تاثیر برهمکنش تیمارهای باکتری-اسید سیتریک و کادمیم. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده‌ی نبود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند (cd0، cd30 و cd60 به ترتیب مقادیر صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم کادمیم در هر کیلوگرم خاک گلدان است).

Fig. 3. Mean comparison of anthocyanin content in *Salsola imbricata* affected by bacteria-citric acid and cadmium interaction. Means with at least one similar letter are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$). cd0, cd30 and cd60 are cadmium rates of 0, 30 and 50 mg per kg of pot soil, respectively.

شرایط بدون باکتری، کاربرد اسید سیتریک در دو غلظت ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مقدار پرولین را کاهش داد. در شرایط تلقیح گیاه با باکتری، کاربرد اسید سیتریک در غلظت ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به مقدار ۹ درصد پرولین را به‌طور معنی‌داری کاهش داد. تلقیح باکتری محرک رشد گیاه در غلظت ۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در کاربرد اسید سیتریک یا بدون کاربرد اسید سیتریک مقدار پرولین را کاهش داد (شکل ۴).

نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم، مقدار کلسیم در تیمار تلقیح با باکتری در دو حالت کاربرد یا بدون کاربرد اسید سیتریک به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. کاربرد اسید سیتریک در غلظت ۳۰ در شرایط بدون باکتری و در غلظت صفر و ۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در شرایط تلقیح باکتری، مقدار کلسیم را افزایش داد. تلقیح با باکتری نیز مقدار کلسیم را در غلظت‌های صفر و ۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در کاربرد اسید سیتریک یا بدون کاربرد اسید سیتریک افزایش داد (شکل ۵).



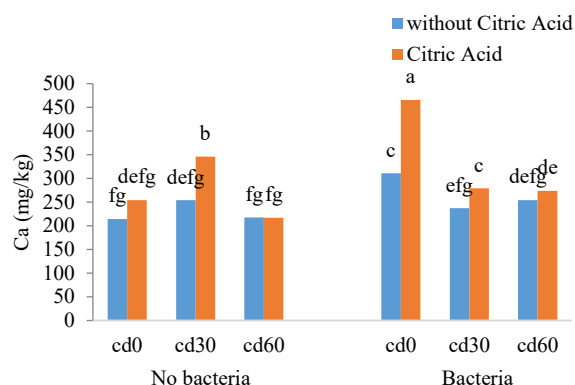
شکل ۲. مقایسه میانگین مقدار کلروفیل کل (Chl) در گیاه شور جنوبی تحت تاثیر برهمکنش تیمارهای باکتری-اسید سیتریک و کادمیم. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده‌ی نبود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند (cd0، cd30 و cd60 به ترتیب مقادیر صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم کادمیم در هر کیلوگرم خاک گلدان است).

Fig. 2. Mean comparison of total chlorophyll (Chl) in *Salsola imbricata* affected by bacteria-citric acid and cadmium interaction. Means with at least one similar letter are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$). cd0, cd30 and cd60 are cadmium rates of 0, 30 and 50 mg per kg of pot soil, respectively.

نتایج نشان داد افزایش غلظت کادمیم باعث کاهش ۵۳ درصدی کلروفیل کل شد. در شرایط تلقیح با باکتری مقدار کلروفیل در غلظت صفر و غلظت ۳۰ mg/kg به‌طور معنی‌داری نسبت به شرایط بدون باکتری در کاربرد اسید سیتریک و یا بدون کاربرد اسید سیتریک افزایش یافت. این افزایش در شرایط کاربرد اسید سیتریک در غلظت ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم برابر ۵۶ درصد اندازه‌گیری شد. (شکل ۲).

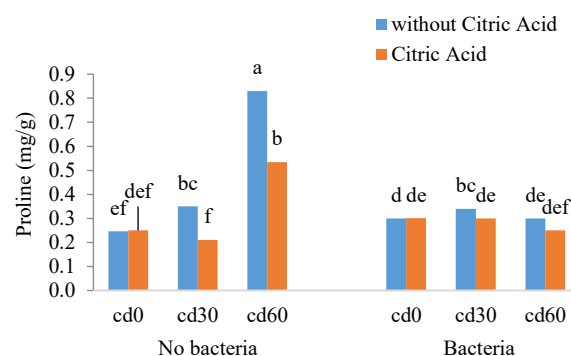
نتایج نشان داد که افزایش غلظت کادمیم باعث افزایش ۴۱ درصدی آنتوسیانین شد. اسید سیتریک تاثیر معنی‌داری بر مقدار آنتوسیانین در تلقیح گیاه با باکتری یا بدون تلقیح با باکتری نداشت. تلقیح باکتری تنها در غلظت ۶۰ mg/kg در شرایط کاربرد اسید سیتریک باعث کاهش ۱۵ درصدی آنتوسیانین شد (شکل ۳).

نتایج نشان داد با افزایش غلظت کادمیم، مقدار پرولین در شرایط بدون تلقیح باکتری به مقدار ۷۱ درصد افزایش یافت. در



شکل ۵. مقایسه میانگین مقدار کلسیم در گیاه شور جنوبی تحت تاثیر برهمکنش تیمارهای باکتری-اسید سیتریک و کادمیم. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده‌ی نبود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند (cd0، cd30 و cd60 به ترتیب مقادیر صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی گرم کادمیم در هر کیلوگرم خاک گلدان است).

Fig. 4. Mean comparison of Ca^{2+} content in *Salsola imbricata* affected by bacteria-citric acid and cadmium interaction. Means with at least one similar letter are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$). cd0, cd30 and cd60 are cadmium rates of 0, 30 and 50 mg per kg of pot soil, respectively.

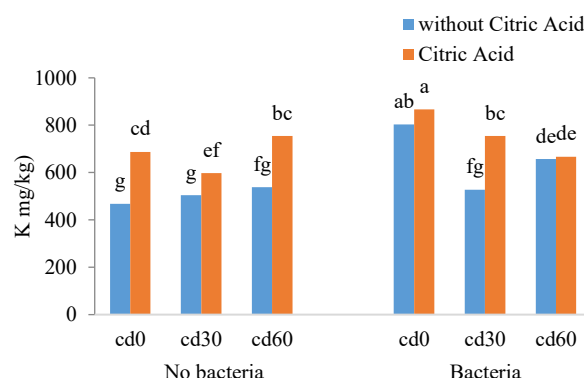


شکل ۴. مقایسه میانگین مقدار پرولین در گیاه شور جنوبی تحت تاثیر برهمکنش تیمارهای باکتری-اسید سیتریک و کادمیم. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده‌ی نبود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند (cd0، cd30 و cd60 به ترتیب مقادیر صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی گرم کادمیم در هر کیلوگرم خاک گلدان است).

Fig. 4. Mean comparison of proline content in *Salsola imbricata* affected by bacteria-citric acid and cadmium interaction. Means with at least one similar letter are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$). cd0, cd30 and cd60 are cadmium rates of 0, 30 and 50 mg per kg of pot soil, respectively.

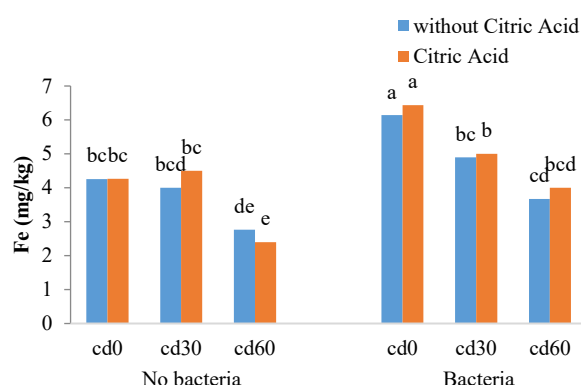
نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم در شرایط تلقیح با باکتری مقدار پتاسیم نسبت به بدون باکتری در غلظت صفر (در کاربرد اسید سیتریک و یا بدون کاربرد آن) کاهش یافت، در صورتی که در شرایط بدون تلقیح باکتری و بدون اعمال اسید سیتریک تفاوت معنی‌داری دیده نشد ولی در کاربرد اسید سیتریک در غلظت ۳۰ میلی گرم در کیلوگرم ابتدا مقدار پتاسیم کاهش یافت ولی در غلظت ۶۰ میلی گرم در کیلوگرم افزایش یافت. کاربرد اسید سیتریک در شرایط بدون باکتری مقدار پتاسیم را به طور معنی‌داری افزایش داد، در حالی که با تلقیح باکتری، اسید سیتریک تنها در غلظت ۳۰ میلی گرم در کیلوگرم مقدار پتاسیم را افزایش داد (شکل ۶).

نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم، مقدار منیزیم در شرایط تلقیح با باکتری (در کاربرد اسید سیتریک و یا بدون کاربرد آن) کاهش معنی‌داری یافت و در شرایط بدون باکتری این کاهش تنها در اعمال اسید سیتریک به دست آمد. کاربرد اسید سیتریک تنها در تیمار شاهد بدون تلقیح باکتری مشاهده شد. تلقیح باکتری



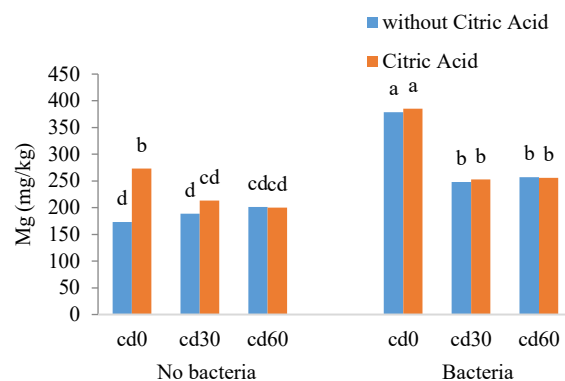
شکل ۶. مقایسه میانگین مقدار پتاسیم در گیاه شور جنوبی تحت تاثیر برهمکنش تیمارهای باکتری-اسید سیتریک و کادمیم. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده‌ی نبود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند (cd0، cd30 و cd60 به ترتیب مقادیر صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی گرم کادمیم در هر کیلوگرم خاک گلدان است).

Fig. 6. Mean comparison of K^{+} content in *Salsola imbricata* affected by bacteria-citric acid and cadmium interaction. Means with at least one similar letter are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$). cd0, cd30 and cd60 are cadmium rates of 0, 30 and 50 mg per kg of pot soil, respectively.



شکل ۸. مقایسه میانگین مقدار آهن در گیاه شور جنوبی تحت تاثیر برهمکنش تیمارهای باکتری-اسید سیتریک و کادمیم. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده نبود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند (cd0، cd30 و cd60 به ترتیب مقادیر صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی گرم کادمیم در هر کیلوگرم خاک گلدان است).

Fig. 8. Mean comparison of Fe²⁺ content in *Salsola imbricata* affected by bacteria-citric acid and cadmium interaction. Means with at least one similar letter are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$). cd0, cd30 and cd60 are cadmium rates of 0, 30 and 50 mg per kg of pot soil, respectively.



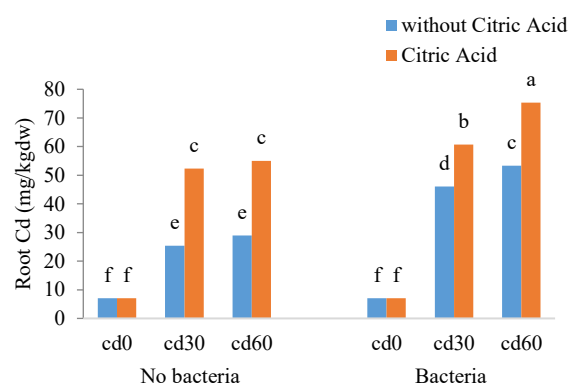
شکل ۷. مقایسه میانگین مقدار منیزیم در گیاه شور جنوبی تحت تاثیر برهمکنش تیمارهای باکتری-اسید سیتریک و کادمیم. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده نبود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند (cd0، cd30 و cd60 به ترتیب مقادیر صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی گرم کادمیم در هر کیلوگرم خاک گلدان است).

Fig. 7. Mean comparison of Mg²⁺ content in *Salsola imbricata* affected by bacteria-citric acid and cadmium interaction. Means with at least one similar letter are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$). cd0, cd30 and cd60 are cadmium rates of 0, 30 and 50 mg per kg of pot soil, respectively.

در همه غلظت‌های کادمیم مقدار منیزیم در گیاه را افزایش داد (شکل ۷).

نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم، مقدار آهن در گیاه شور جنوبی در شرایط تلقیح با باکتری (در کاربرد اسید سیتریک و یا بدون کاربرد آن) و در شرایط بدون باکتری (تنها در غلظت ۶۰ میلی گرم در کیلوگرم) مقدار آهن به میزان ۳۵ درصد کاهش یافت. کاربرد اسید سیتریک تاثیر معنی‌داری بر مقدار آهن در گیاه نداشت. اما تلقیح با باکتری در غلظت‌های صفر و ۶۰ میلی گرم در کیلوگرم مقدار جذب آهن در گیاه شور جنوبی را به میزان ۲۰ درصد در دو حالت با یا بدون اسید سیتریک افزایش داد (شکل ۸).

نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم خاک مقدار آن در ریشه گیاه شور جنوبی به مقدار ۷۵ درصد افزایش یافت. کاربرد اسید سیتریک به‌طور معنی‌داری در شرایط تلقیح باکتری یا بدون تلقیح با باکتری باعث افزایش مقدار کادمیم در ریشه شد. تلقیح با باکتری نیز به‌جز در تیمار شاهد، در سایر تیمارها مقدار کادمیم ریشه را حدود ۵۸ درصد افزایش داد (شکل ۹).



شکل ۹. مقایسه میانگین مقدار کادمیم در ریشه گیاه شور جنوبی تحت تاثیر برهمکنش تیمارهای باکتری-اسید سیتریک و کادمیم. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده نبود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند (cd0، cd30 و cd60 به ترتیب مقادیر صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی گرم کادمیم در هر کیلوگرم خاک گلدان است).

Fig. 9. Mean comparison of Cd²⁺ content in the root of *Salsola imbricata* affected by bacteria-citric acid and cadmium interaction. Means with at least one similar letter are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$). cd0, cd30 and cd60 are cadmium rates of 0, 30 and 50 mg per kg of pot soil, respectively.

نتایج اندازه‌گیری کادمیم در شاخساره گیاه شور جنوبی نشان داد که مقدار این عنصر کمتر از حد تشخیص دستگاه بود.

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که کادمیم باعث کاهش وزن خشک گیاه شور جنوبی شد (شکل ۱). فلزات سنگین با اثر سمی بر مسیرهای متابولیکی، سبب ایجاد اختلالات فیزیولوژیک در گیاهان می‌شوند. سازوکارهای مسمومیت شامل کاهش اثر گروه‌های عامل موثر بر سنتز مولکول‌های زیستی و آنزیم‌ها، غیرفعال کردن آنزیم‌ها و تاثیر بر سیستم انتقال مواد مغذی و یون‌ها و یا جایگزینی آن‌ها با یون‌های غیرضروری است (Wu et al., 2018). در بین فلزات سنگین، کادمیم عنصری غیرضروری با سمیت زیاد و بدون هر گونه نقش مثبت در سوخت‌وساز سلول‌های گیاهی است. کادمیم می‌تواند جایگزین دیگر فلزات مانند مس، روی، آهن و کلسیم در ساختار آنزیم و کوآنزیم‌ها شود. هم‌چنین کادمیم، اثر مستقیم بر فتوسنتز ۲ و فتوستز دارد و با جلوگیری از انتقال الکترون‌ها در فعالیت فتوسنتز ۲ اختلال ایجاد می‌کند (Wu et al., 2023). به عبارت دیگر کادمیم با اثر بر آنزیم ۳- فسفو گلیسرک اسید کیناز (آنزیم‌های احیایی فتوستز) اثر بازدارندگی بر جذب دی‌اکسید کربن در چرخه کربن و فتوستز ایجاد می‌کند (Ali and Hadi, 2015). تمامی این موارد می‌توانند دلیل کاهش وزن گیاه در شرایط تنش کادمیم باشند.

نتایج این پژوهش نشان داد که کادمیم به‌طور معمول در ریشه تجمع می‌یابد و کمتر (از مقدار قابل اندازه‌گیری) به شاخساره گیاه منتقل می‌شود. گیاهان برای فعالیت سوخت‌وسازی خود به کادمیم نیاز ندارند. به‌طور معمول غلظت کادمیم در ریشه گیاه زیادتر بوده و با حرکت به‌سوی بخش‌های بالایی گیاه از مقدار آن کاسته می‌شود. به‌دلیل وجود پیوندهای شکسته مواد آلی، ساختار نامنظم بافت ریشه، و بار الکتریکی منفی خنثی‌نشده در ریشه، انتقال کادمیم به بخش‌های بالایی گیاه تا حد زیادی کاهش می‌یابد. یکی دیگر از دلایل انتقال بسیار اندک کادمیم از ریشه به

شاخساره، ممکن است تشکیل ترکیبات با تحرک کم در ریشه باشد که به‌آسانی به شاخساره منتقل نمی‌شوند. لازم به ذکر است که توانایی انتقال آلاینده‌ها از ریشه به شاخساره به نوع گونه گیاهی نیز بستگی دارد؛ به عبارتی برخی گیاهان برای تثبیت گیاهی^۱ و برخی به‌منظور استخراج گیاهی^۲ مناسب می‌باشند. با توجه به تاثیر فلزات سنگین بر رشد گیاهان و اثر سمی آن‌ها و در نتیجه کاهش عملکرد، برخی مراجع غلظت بحرانی فلزات سنگین (حدی از غلظت که در بیشتر از آن عملکرد شروع به کاهش می‌کند) را مبنای گروه‌بندی قرار داده‌اند. بر این اساس دامنه غلظت طبیعی کادمیم در گیاهان برابر با ۰/۱-۲/۴ میلی گرم در کیلوگرم و غلظت بحرانی در گیاه برابر با ۳۰-۵ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک گیاه برآورد شده است (Alloway, 1990). نتایج نشان داد گیاه شور جنوبی می‌تواند بیشتر از حد مذکور کادمیم را در خود نگه‌دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که گیاه شور جنوبی پتانسیل گیاه‌پالایی خوبی دارد. نتایج اثر باکتری محرک رشد سودوموناس فلورسانس همراه با کاربرد EDTA بر جذب کادمیم در گیاه ذرت، نشان داد که این دو با افزایش فرم قابل استفاده کادمیم، فراهمی زیستی این عنصر سنگین برای گیاه را افزایش می‌دهند (Hamidpour et al., 2020).

نتایج پژوهش حاضرهم‌چنین نشان داد که کاربرد باکتری و اسید سیتریک باعث افزایش انباشت کادمیم در ریشه شد (شکل ۹). کاربرد اسید سیتریک نقش موثری در کاهش pH موضعی خاک دارد و با افزایش حلالیت کادمیم خاک، موجب تسهیل جذب و انتقال کادمیم به‌درون گیاه می‌شود (Ehsan et al., 2014). به‌طورکلی، وجود پیوندهای آلی-فلزی در ترکیبات اسید سیتریک و فلزات سبب می‌شود فلزات کم‌تر در معرض کلوئیدها، هیدروکسیدها و اکسیدها قرار گیرند؛ بنابراین مانع از رسوب و تثبیت آن‌ها در خاک می‌شود. از طرفی اسید سیتریک می‌تواند کادمیم را از فاز جامد و غیرمحللول به فازهای تبدلی انتقال داده و در نهایت میزان جذب کادمیم توسط گیاه را افزایش دهد (Wu et al., 2018). اسید سیتریک با کادمیم می‌تواند کمپلکس کادمیم-

(Najafi Zilaie et al., 2022; Zilaie et al., 2022)

نتایج نشان داد که بیشترین وزن خشک گیاه شور جنوبی در شرایط کاربرد اسید سیتریک و باکتری در شرایط با یا بدون کادمیم بدست آمد. این یافته به دلیل نقش این عامل در افزایش جذب عناصر غذایی و فراهم کردن شرایط بهینه رشد گیاه است (محبی نجم‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۸). باکتری‌های محرک رشد گیاه، باعث تحریک رشد گیاه با سازوکارهای مستقیم و غیرمستقیم می‌شوند. سازوکارهای مستقیم، شامل تسهیل جذب مواد مغذی توسط گیاه از راه تثبیت نیتروژن، انحلال فسفات‌های غیرآلی و جذب ریزمغذی‌هایی مانند آهن با تولید سیدروفور (Zilaie et al., 2022) و تعدیل سطح هورمون‌های گیاهی مانند افزایش تولید اکسین، سیتوکینین و جبریلین یا کاهش تولید اتیلن از راه فعالیت ACC دآمیناز است. چنین تغییراتی در هورمون‌های گیاهی می‌تواند باعث افزایش طول ریشه یا تعداد تارهای کشنده آن و در نتیجه افزایش جذب مواد غذایی توسط گیاه شود. سازوکارهای غیرمستقیم، بر اساس ساخت ترکیباتی مانند آنتی‌بیوتیک‌ها، آنزیم‌های تجزیه‌کننده مانند پروتئاز، سلولاز، گلوکاناز، کیتیناز و لاکتوناژ، سیانید هیدروژن و ترکیبات فراری مانند دی‌متیل‌دی-سولفید و دی‌متیل‌پنتانوات برای جلوگیری از فعالیت عوامل بیماری‌زای گیاهی در خاک و افزایش مقاومت سیستمی گیاه به این عوامل (Najafi et al., 2023) است. تولید ترکیبات فرار آلی و اگزوپلی‌ساکارید، از دیگر سازوکارهای غیرمستقیم محرک رشد گیاه باکتری‌های ریزوسفری است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش بیانگر اثر معنی‌دار کادمیم بر کاهش تمام صفات مورفولوژیک گیاه شور جنوبی است. در مقابل کاربرد اسید سیتریک و باکتری محرک رشد *Bacillus cereus*، نه تنها ویژگی‌های رشدی گیاه را افزایش دادند بلکه باعث افزایش جذب کادمیم توسط گیاه شور جنوبی شد. بنابراین نتیجه‌گیری شد که استفاده از این باکتری محرک رشد و اسید سیتریک روشی موثر در راستای افزایش توان گیاه‌پالایی شور جنوبی در خاک‌های

اسید سیتریک (Cd-CA) تشکیل دهد و تحرک کادمیم را برای جذب توسط گیاه افزایش دهد (Ghnaya et al., 2013). اسید سیتریک دارای سه گروه کربوکسیل و یک گروه هیدروکسیل است که تشکیل این کمپلکس را مهیا می‌کند. سایر پژوهش‌ها نیز تاثیر اسید سیتریک در افزایش ورود کادمیم به درون گیاه را نشان داده‌اند (Ma et al., 2019; Yang et al., 2022) که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. در تیمارهای تحت تنش کادمیم و کاربرد اسید سیتریک، وزن خشک گیاه شور جنوبی به‌طور معنی‌داری کاهش کمتری نسبت به گیاهانی داشت که از اسید سیتریک استفاده نشده بود. این موضوع نشان داد که کمپلکس Cd-CA نه تنها باعث افزایش جذب کادمیم شد بلکه سمیت یون کادمیم را نیز کاهش داد. نتایج مشابه توسط Ma و همکاران (۲۰۲۰) بدست آمد.

استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه در این پژوهش، باعث افزایش مقدار کلروفیل کل در گونه گیاهی شور جنوبی شد (شکل ۲). افزایش مقدار کلروفیل ممکن است به دلیل تولید سیدروفور و اکسین توسط این باکتری‌ها باشد. سیدروفور میل ترکیبی شدید برای پیوند با برخی کاتیون‌ها از جمله آهن سه-ظرفیتی دارد، که از عناصر ضروری برای ساخت کلروفیل است. در شرایط اعمال کادمیم، مقدار پرولین و آنتی‌اکسیدان‌های کل افزایش یافت (شکل ۲ و ۳). پرولین و آنتی‌اکسیدان‌ها می‌توانند در محافظت از ساختارهای سلولی، ساختمان ماکرومولکول‌ها و از بین بردن رادیکال‌های آزاد نقش بسیار مهمی باری کنند (Yang et al., 2024). تلقیح با باکتری‌های محرک رشد گیاه باعث کاهش محتوی پرولین و آنتی‌اکسیدان کل شد. باکتری‌های محرک رشد گیاه با افزایش جذب پتاسیم از راه اسیدی کردن محیط ریزوسفر، افزایش جذب آب به دلیل تولید اکسین و افزایش حجم ریشه، در تعدیل آثار تنش کادمیم مشارکت می‌کنند، که این خود کاهش تولید پرولین و آنتی‌اکسیدان‌های کل را توجیه می‌کند. کاهش محتوی پرولین در شرایط تنش‌های زیستی در تیمارهای تلقیحی با باکتری محرک رشد گیاه در پژوهش‌های دیگری نیز گزارش شده است

تشکر و سپاسگزاری

در انجام این پژوهش، حمایت مالی خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نشده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ گونه تضاد منفعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

آلوده با کادمیم است. همچنین، نتایج نشان داد که کادمیم تنها در ریشه گیاه شور جنوبی تجمع می‌یابد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در صورت تایید نتایج این پژوهش در آزمایش‌های مزرعه‌ای، از این گیاه در گیاه‌تثبیتی کادمیم استفاده گردد. این یافته‌ها به توسعه راهکارهای سازگار با طبیعت و موفقیت عملیات احیای بیولوژیک بیابان بویژه در عرصه‌های استخراج معادن برای اصلاح فلزات سنگین با استفاده از رویکردهای گیاهی کمک می‌کند.

منابع مورد استفاده

References

1. Alloway, B.J., 1990. Heavy Metals in Soil. Black and Glasgow. Ltd. London, pp. 177–196.
2. Ali, B., Gill, R.A., Yang, S., Gill, M.B., Farooq, M.A., Liu, D., Daud, M.K., Ali, S., Zhou, W., 2015. Regulation of cadmium-induced proteomic and metabolic changes by 5-aminolevulinic acid in leaves of *Brassica napus* L. PLOS ONE 10, e0123328.
3. Amini Hajiabadi, A., Mosleh Arani, A., Etesami, H., 2022. Salt-tolerant genotypes and halotolerant rhizobacteria: A potential synergistic alliance to endure high salinity conditions in wheat. Environ. Exp Bot, 202, 157–163.
4. Azari Najafabadi, S., Mosleh Arani, A., Azimzadeh, H., 2019. Resistance to Different Concentrations of Lead in Rhizospheric Bacteria Extracted from *Pulicaria* and *Salsola* Established on Lead Mine Tailings. MSc Thesis. Yazd University, Yazd. (In Persian with English abstract)
5. Bates, L.S. Waldren, R.P., Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant Soil. 39, 205–207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>.
6. Chardonens, A.N., Ten Bookum, W.M., Kuijper, L.D., Verkleij, J.A., Ernst, W.H., 1998. Distribution of cadmium in leaves of cadmium tolerant and sensitive ecotypes of *Silene vulgaris*. Physiol. Plantar. 104(1), 75–80.
7. Chen, Q., Wang, L., Li, B., He, S., Li, Y., He, Y., Liang, X., Zhan, F., 2024. Remediation of cadmium and lead in mine soil by ameliorants and its impact on maize (*Zea mays* L.) cultivation. Agronomy, 14, 372.
8. Ehsan, S., Ali, S., Nouran, S., Mahmood, K., Farid, M., Ishaque, W., Shakoar, M.B., Rizwan, M., 2014. Citric acid assisted phytoremediation of cadmium by *Brassica napus* L. Ecotoxicol. Environ. Saf. 106, 164–172.
9. Freitas, E.W., Nascimento, C.W., Souza, A., Silva, F.B., 2013. Citric acid-assisted phytoextraction of Pb: A field experiment. Chemosphere, 92, 213–217.
10. Ghnaya, T., Zaier, H., Baioui, R., Sghaier, S., Lucchini, G., Sacchi, G.A., Lutts, S., Abdelly, C., 2013. Implication of organic acids in the long-distance transport and the accumulation of lead in *Sesuvium portulacastrum* and *Brassica juncea*. Chemosphere. 90(4), 1449–1454.
11. Haider, F.U., Liqun, C., Coulter, J.A., Cheema, S.A., Wu, J., Zhang, R., Wenjun, M., Farooq, M., 2021. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies, Ecotoxicol. Environ. Saf. 211, 111887.
12. Hajiabadi, A.A., Arani, A.M., Ghasemi, S., Rad, M.H., Etesami, H., Manshadi, S.S., Dolati, A., 2021. Mining the rhizosphere of halophytic rangeland plants for halotolerant bacteria to improve growth and yield of salinity-stressed wheat. Plant Physiol. Biochem, 163, 139–153.
13. Hamidpour, M., Nemati, H., Abbaszadeh Dahaji, P., Roosta, H.R., 2020. Effects of plant growth-promoting bacteria on EDTA-assisted phytostabilization of heavy metals in a contaminated calcareous soil. Environ. Geochem. Health. 42(8): 2535–2545. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00422-3>.
14. Hussain, B., Ashraf, M.N., Shafeeq-Ur-Rahman Abbas, A., Li, J., Farooq, M., 2021. Cadmium stress in paddy fields: Effects of soil conditions and remediation strategies. Sci. Total. Environ. 754, 142188.
15. Lichtenthaler, H.K., 1987. Chlorophyll and carotenoids: pigments photosynthetic bio-membranes. Methods Enzymol. 148, 350–382.
16. Ma, H., Li, X., Hou, S., Peng, D., Wang, Y., Xu, F., Xu, H., 2019. The activation and extraction systems using organic acids and Lentinus edodes to remediate cadmium contaminated soil. Environ. Pollut. 255(Pt 2), 113252. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113252>.
17. Ma, H., Li, X., Wei, M., Zeng, G., Hou, S., Li, D., Xu, H., 2020. Elucidation of the mechanisms into effects of organic acids on soil fertility, cadmium speciation and ecotoxicity in contaminated soil. Chemosphere 239(13), 124706. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124706>.

18. Mohammadi, F., Samaei, M.R., Azhdarpoor, A., Teiri, H., Badeenezhad, A., Rostami, S., 2019. Modelling and optimizing pyrene removal from the soil by phytoremediation using response surface methodology, artificial neural networks, and genetic algorithm. *Chemosphere* 237, 124486.
19. Najafi Zilaie, M., Mosleh Arani, A., Etesami, H., Dinarvand, M., 2022. Improved salinity and dust stress tolerance in the desert halophyte *Haloxylon aphyllum* by halotolerant plant growth-promoting rhizobacteria. *Front. Plant Sci.* 13, 948260.
20. Najafi Zilaie, M., Mosleh Arani, A., Etesami, H., 2023. Evaluation of air pollution (dust) tolerance index of three desert species *Seidlitzia rosmarinus*, *Haloxylon aphyllum*, and *Nitraria schoberi* under salinity stress. *Environ. Monit. Assess.* 195(7), 838.
21. Ogundiran, M.B., Adejumo, S.A., Fagbenro, J.A., 2024. Sustainable remediation techniques for solid waste polluted soils. In: Frazer-Williams, R., Ogundiran, M.B., Unuabonah, E.I. (Eds.), *Environmental Pollution and Public Health*, IJ Publication, Palakkad, Kerala, India, pp. 265–288.
22. Okereafor, U., Makhatha, M., Mekuto, L., Uche-Okereafor, N., Sebola, T., Mavumengwana, V., 2020. Toxic metal implications on agricultural soils, plants, animals, aquatic life and human health. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health* 17, 2204.
23. Shah, S.B., 2021. Heavy metals in the marine environment—An overview. In: Shah, S.B. (Eds.), *Heavy Metals in Scleractinian Corals*. Springer Briefs in Earth Sciences, Springer, Cham.
24. Shahid, N., Niazi, N.K., Khalid, S.M., Bibi, B., Rashid, M.I., 2018. A critical review of selenium biogeochemical behavior in soil-plant system with an inference to human health. *Environ. Pollut.* 234, 915–934.
25. Wagner, G.J., 1979. Content and vacuole/extravacuole distribution of natural sugars, free amino acids, and anthocyanin in protoplasts. *Plant Physiol.* 64(1), 88–93. <https://doi.org/10.1104/pp.64.1.88>.
26. Walinga, I., VanVark, W., Houba, V.J.G. and Van der lee, J.J., 1989. *Plant Analysis Procedures*. Department of soil Science and Plant Nutrition, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Syllabus Part 7: 197–200.
27. Wu, M., Luo, Q., Liu, S., Zhao, Y., Long, Y., Pan, Y., 2018. Screening ornamental plants to identify potential Cd hyperaccumulators for bioremediation. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 162, 35–41.
28. Wu, S., Yang, Y., Qin, Y., Deng, X., Zhang, Q., Zou, D., Zeng, Q., 2023. *Cichorium intybus* L. is a potential Cd-accumulator for phytoremediation of agricultural soil with strong tolerance and detoxification to Cd. *J. Hazard. Mater.* 451, 131182.
29. Yang, X., Li, J., Yang, Z., Chen, M., Zhang, L., 2024. Plant growth promoting bacteria and citric acid promote growth and cadmium phytoremediation in ryegrass. *Int. J. Phytoremediation* 26(3), 382–392. <https://doi.org/10.1080/15226514.2023.2243631>.
30. Yang, Z., Xue, B., Song, G., Shi, S., 2022. Effects of citric acid on antioxidant system and carbon-nitrogen metabolism of *Elymus dahuricus* under Cd stress. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 233, 113321. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113321>.
31. Zhang, M., Tang, S., Huang, X., Zhang, F., Pang, Y., Huang, Q., Yi, Q., 2014. Selenium uptake, dynamic changes in selenium content and its influence on photosynthesis and chlorophyll F1 fluorescence in rice (*Oryza sativa* L.). *Environ. Exp. Bot.* 107, 39–45.
32. Zilaie, M.N., Arani, A.M., Etesami, H., Dinarvand, M., 2022. Halotolerant rhizobacteria enhance the tolerance of the desert halophyte *Nitraria schoberi* to salinity and dust pollution by improving its physiological and nutritional status. *Appl. Soil. Ecol.* 179, 104578.
33. Zilaie, M.N., Arani, A.M., Etesami, H., Dinarvand, M., Dolati, A., 2022. Halotolerant plant growth-promoting rhizobacteria-mediated alleviation of salinity and dust stress and improvement of forage yield in the desert halophyte *Seidlitzia rosmarinus*. *Environ. Exp. Bot.* 201, 104952.