Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Effect of some chelating agents on the phytoremediation of beans (*Vicia faba*) in a Cd-polluted soil

Hanieh Doustmohamadi[1] | Aliashraf Amirinejad[2]✉ | Sareh Nezami[3]

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: haniehdm76@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: a.amirinejad@razi.ac.ir
3. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: s.nezami1981@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: May. 21, 2024

Revised: June. 28, 2024

Accepted: Aug. 3, 2024

Published online: Oct. 2024

Keywords:
Beans,
Calcareous Soil,
Citric Acid,
Heavy Metals,
Oxalic Acid.

ABSTRACT

Phytoremediation is an important method for refining heavy metals, but the main limitation is the low bioavailability of the metals. Chelating agents, by releasing heavy metals from the soil solid phase, can increase their uptake by the plants. In this research, the effects of some chelating agents on the phytoremediation of *Vicia faba* in a calcareous soil contaminated with Cd were investigated. A factorial experiment was conducted based on a completely randomized design with three replications in the greenhouse of Razi University. The factors included Cd at four levels (0, 5, 10, and 15 mg kg^{-1} soil as $CdCl_2$), and three chelating agents including ethylene di-amine tetra acetic acid (EDTA), citric acid (CA), and oxalic acid (OA), at two levels (4 and 8 mmol kg^{-1}). The results showed that the highest Cd concentration in the root and shoot (39.90 and 27 mg kg^{-1}, respectively) was obtained at 15 mg kg^{-1} of Cd and 8 mmol kg^{-1} of EDTA, CA, and OA. The highest values of transfer factor (0.67) and biological accumulation factor (5.65) were obtained at the highest level of Cd pollution and 8 mmol kg^{-1} of chelating agents. This indicates that firstly, cadmium was mainly accumulated in the root and was less transferred to the shoot. Secondly, it shows the potential of bean in phytoremediation and Cd uptake. Also, the amounts of the measured factors with citric and oxalic acid were not much different from EDTA, and therefore, these two environmentally friendly natural chelating agents could be used instead of EDTA.

Cite this article: Doustmohamadi, H., Amirinejad, A., & Nezami, S., (2024) Effect of some chelating agents on the phytoremediation of beans (*Vicia faba*) in a Cd-polluted soil, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (8), 1311-1322. https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.376851.669715

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.376851.669715

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Rapid industrialization and urbanization have resulted in increased emissions of toxic heavy metals entering the biosphere. Although these metals are toxic to many plants, some plants have evolved mechanisms to tolerate the toxicity and accumulateion of metals. Phytoremediation is an important method for refining heavy metals, but the main limitation is the low bioavailability of the metals. Chelating compounds, by releasing heavy metals from the soil solid phase, can increase their utake by the plants. Among heavy metals, cadmium (Cd) is recognized as highly toxic to living organisms and humans. In crop plants, the toxicity of Cd reduces uptake and translocation of nutrients and water, increases oxidative damage, disrupts plant metabolism, and inhibits plant morphology and physiology. In this research, the effects of some chelating agents on the phytoremediation of *Vicia faba* in calcareous soil contaminated with Cd were investigated.

Materials and Methods

To study the effects of some chelating agents on the phytoremediation of *Vicia faba* in calcareous soil contaminated with Cd, a factorial experiment was conducted based on a completely randomized design with three replications in the greenhouse of Razi University. The factors included Cd at four levels (0, 5, 10, and 15 mg kg^{-1} soil as $CdCl_2$), and three chelating agents including ethylene di-amine tetra acetic acid (EDTA), citric acid (CA), and oxalic acid (OA), at two levels (4 and 8 mmol kg^{-1}). At the end of vegetative growth and at the beginning of flowering stages of the plants, some growth parameters were determined and Cd concentration was measured in shoot and root of the plants. Based on Cd concentaration some parameters were determined. Data analysis was done using SPSS software and means comparison was done by Duncan's Multiple Range Test at α=0.05.

Results and Discussion

The analysis of variance showed that the intraction effects of EDTA, CA, and OAon most of the morphologica parameters of beans under Cd stress, i.e., root and aerial cadmium concentration, shoot height, root length, and shoot and root dry weight, were significant ($p < 0.01$). The results showed that the application of chelating agents in the control soil sample (without Cd) increased plant growth parameters. Although Cd stress led to a decrease in the morphological characteristics, the use of chelating agents aggravated the decrease. The highest Cd concentration in the root and shoot (39.90 and 27 mg kg^{-1}, respectively) was obtained at 15 mg kg-^{1} of Cd and 8 mmol kg^{-1} of EDTA, CA, and OA. The use of these chelating agents in the soil increased the Cd absorption in beans. Also, the results showed that the highest values of transfer factor (0.67) and biological accumulation factor (5.65) were obtained at the highest level of Cd pollution and 8 mmol kg^{-1} of chelating agents. This indicates that firstly, cadmium was mainly accumulated in the root and was less transferred to the shoot. Secondly, it shows the potential of bean in phytoremediation and Cd absorption. Also, the amounts of the mentioned factors with CA and OA were not much different from EDTA.

Conclusion

The results of the experiment confirmed that the use of EDTA, CA, and OA in the soil increased the Cd absorption in bean. Based on the biological accumulation factor (> 1) and transfer factor (<1), bean plant has the potential of Cd stabilization at the all Cd and chelating agent levels. In general, the use of chelating agents is an effective method to increase the phytoremediation ability of beans in the calcareous soil contaminated with Cd. Between chelating agents, CA and OA are environmentally friendly agents and can be used instead of EDTA.

Author Contributions

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript. All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۵، شماره ۸ شاپا: ۲۴۲۳-۷۸۳۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

اثر برخی عوامل کلات‌کننده بر گیاه‌پالایی باقلا (*Vicia faba*) در یک خاک آلوده به کادمیوم

هانیه دوستمحمدی[۱] | علی اشرف امیری‌نژاد[۲]✉ | ساره نظامی[۳]

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: haniehdm76@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: a.amirinejad@razi.ac.ir

۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: s.nezami1981@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۴/۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۱۳

تاریخ انتشار: آبان ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:
مدل رفتاری،
خاک غیراشباع،
مدل‌سازی عددی،
پلاستیسیته.

چکیده

گیاه‌پالایی یک روش مهم در پالایش فلزات سنگین از خاک است، اما محدودیت اصلی آن، زیست‌فراهمی کم فلزات کم فلزات است. عامل‌های کلات‌کننده می‌توانند با آزادسازی فلزات سنگین از بخش جامد خاک، راندمان جذب این فلزات توسط گیاهان را افزایش دهند. در این پژوهش، تأثیر کاربرد برخی عامل‌های کلات‌کننده بر گیاه‌پالایی باقلا (*Vicia faba*) دریک خاک آهکی آلوده با کادمیوم بررسی گردید. آزمایش به صورت فاکتوریل، در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشگاه رازی انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل کادمیوم در چهار سطح (۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک با کادمیوم کلرید) و سه عامل کلات‌کننده اتیلن دی آمین ترا استیک اسید (EDTA)، سیتریک اسید (CA) و اگزالیک اسید (OA)، هر کدام در دو سطح (۴ و ۸ میلی‌مول بر کیلوگرم) بودند. نتایج نشان داد که بیش‌ترین کادمیوم ریشه و شاخساره (به ترتیب ۳۹/۹۰ و ۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم و ۸ میلی‌مول بر کیلوگرم CA، OA و EDTA به‌دست آمد. بیش‌ترین مقادیر عامل انتقال (۰/۶۷) و عامل تجمع بیولوژیکی (۵/۶۵) در بالاترین سطح آلودگی کادمیوم و سطوح ۸ میلی‌مول بر کیلوگرم عوامل کلات کننده حاصل شد. این موضوع بیانگر آن است که اولاً کادمیوم به‌طورعمده در ریشه تجمع یافته و کم‌تر به اندام هوایی منتقل شده است. هم‌چنین این مطالعه نشان‌دهنده پتانسیل گیاه باقلا در گیاه‌پالایی و جذب کادمیوم است. هم‌چنین، مقادیر عامل‌های مذکور با مصرف اسید سیتریک و اسید اگزالیک تفاوت چندانی با EDTA نداشت و بنابراین می‌توان به‌جای EDTA از این دو عامل کلات‌کننده طبیعی دوست‌دار محیط‌زیست استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: اگزالیک اسید، باقلا، خاک آهکی، سیتریک اسید، فلزات سنگین

استناد: دوستمحمدی؛ هانیه، امیری‌نژاد؛ علی اشرف، نظامی؛ ساره، (۱۴۰۳) اثر برخی عوامل کلات‌کننده بر گیاه‌پالایی باقلا (*Vicia faba*) در یک خاک آلوده به کادمیوم، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵ (۸)، ۱۳۲۲-۱۳۱۱. https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.376851.669715

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.376851.669715

مقدمه

توسعه شهری و صنعتی همراه با فعالیت‌های کشاورزی، منجر به آلودگی خاک با عناصر سنگین در بعضی از مناطق جهان گردیده است (Wu *et al*., 2018). در بین این عناصر، کادمیوم چهارمین عنصر سمی برای گیاهان آوندی است که سمیت آن می‌تواند برخی از متابولیسم های فیزیولوژیکی از جمله تعرق، فتوسنتز و تثبیت نیتروژن را در گیاهان مختل سازد. همچنین، کادمیوم به‌طور معنی‌داری باعث کاهش ارتفاع بوته، طول ریشه، سطح برگ و تعداد برگ می‌گردد (Ehsan *et al*., 2014).

کادمیوم همانند یکسری از فلزات سنگین قابل‌تجزیه زیستی نیست. لذا در صورت تجمع در خاک، غلظت آن بایستی به زیر سطح بحرانی کاهش یابد (Wu *et al*., 2023). یک روش مقرون به‌صرفه و پایدار برای اصلاح خاک آلوده، گیاه‌پالایی است (Mahar *et al*., 2016). گیاه‌پالایی شامل رشد گیاهان در خاک برای استخراج فلزات سنگین از منطقه ریزوسفر و جداسازی آن به قسمت‌های قابل‌برداشت گیاه است. این فناوری، کم‌هزینه و سازگار با طبیعت بوده ولی با توجه به فراهمی‌زیستی پایین فلزات سنگین، پاک‌سازی خاک ممکن است سال‌ها به طول انجامد (Ashraf *et al*., 2019). یکی از ترکیبات مهم در راستای افزایش فراهمی عناصر و راندمان گیاه‌پالایی در اصلاح خاک‌های آلوده با فلزات سنگین، استفاده از عوامل کلات‌کننده در خاک است.

عوامل کلات‌کننده، ترکیبات شیمیایی یا طبیعی خاصی هستند که با کاتیون‌های فلزی، کمپلکس پایدار تشکیل داده و فراهمی‌زیستی و جذب آنها توسط گیاهان را افزایش می‌دهند. این ترکیبات با افزایش آزادسازی فلزات سنگین از فاز جامد خاک، قابلیت دسترسی آن‌ها در خاک و جذب به‌وسیله ریشه و سپس انتقال به اندام‌های هوایی گیاهان را تسریع می‌بخشند. با افزایش سرعت جذب فلز توسط گیاه، دوره اصلاح از طریق گیاه‌پالایی کوتاه‌تر و در نتیجه، هزینه اصلاح کاهش می‌یابد (Moslehi *et al*., 2019). استفاده از عوامل کلات‌کننده در خاک‌های آهکی با pH بالا بیش‌تر ضرورت دارد، زیرا این شرایط، زیست‌فراهمی فلزات سنگین را کاهش می‌دهد (Ali and Hadi, 2015). البته، استفاده زیاد از عوامل کلات‌کننده می‌تواند اثر مضر بر رشد و نمو گیاهان داشته و باعث پژمرده شدن و حتی مرگ گیاهان شود (Hasan et al., 2019). از مؤثرترین عوامل کلات‌کننده که در گیاه‌پالایی استفاده می‌شود می‌توان به اتیلن دی آمین ترا استیک اسید (EDTA)، سیتریک اسید و اگزالیک اسید اشاره کرد.

EDTA یک کلات‌کننده سنتزی قوی است که به دلیل ارزانی، به‌طور گسترده در استخراج بسیاری از فلزات سنگین مانند کادمیوم و سرب استفاده شده است. اما این ماده، تجزیه‌پذیری ضعیفی داشته و در محیط باقی می‌ماند. بنابراین، این نگرانی وجود دارد که کلات‌کننده ضمن خارج کردن فلز از خاک، از طریق آبشویی، آب زیرزمینی را آلوده نماید (Gluhar *et al*., 2020).

سیتریک اسید قوی‌ترین کلات‌کننده طبیعی است که توانایی ایجاد کمپلکس با فلزات را دارد. با توجه به کوچک بودن اندازه مولکول، می‌تواند به‌راحتی به ریشه گیاهان نفوذ کند. گزارش شده که افزودن سیتریک اسید (غلظت ۲/۵ میلی‌مولار) به خاک، ضمن این‌که به‌طور قابل‌توجهی پارامترهای رشدی کلزا را افزایش داد، اثرات بازدارندگی کادمیوم و علائم سمیت آن در کلزا را بهبود بخشید (Ehsan *et al*., 2014). اگزالیک اسید نیز یک اسید آلی با وزن مولکولی کم است که قابلیت دسترسی فلزات در خاک را بهبود می‌بخشد. به‌عبارت دیگر، این ترکیب با خاصیت کلات‌کنندگی می‌تواند آزادسازی فلز سنگین از بخش جامد خاک را سرعت بخشیده و قابلیت دسترسی آن را افزایش دهد (Hasan *et al*., 2019).

بر پایه توزیع گونه‌های فلزی، آنیون‌های اسید آلی نسبت به کلات‌های سنتزی کارآیی کمتری در کمپلکس‌کردن فلزات دو ظرفیتی در تمامی pHها دارند (Bissani, 2000). این حقیقت از ثابت‌های پایداری (Log K) کمپلکس‌های فلزی با لیگاندها ناشی می‌شود که در مورد کادمیوم با EDTA (۱۶/۴)، سیترات (۴/۵) و اگزالات (۴/۱) است. مهمترین مزیت استفاده از اسیدهای آلی به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک در فرآیند گیاه‌پالایی، درجه بالای تخریب زیستی آن‌ها در خاک است (Meers *et al*., 2008).

امروزه، حدود ۴۰۰ گونه گیاهی وجود دارند که توانایی تحمل سطوح بالای فلزات سنگین در خاک را دارند. در این بین، باقلا (*Vicia faba* L.) از تیره Fabaceae در گیاه‌پالایی بسیار کارآمد است و می‌تواند فلزات را از خاک جذب و در اندام هوایی ذخیره نماید. علاوه بر این، برهمکنش گیاه با باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن منجر به افزایش زیست‌توده میکروبی در ناحیه ریشه شده که خود می‌تواند به حذف بهتر آلاینده کمک کند (Srivastava *et al*., 2005).

با توجه به مطالب بیان‌شده، مهم‌ترین هدف مطالعه حاضر، ارزیابی مقایسه‌ای اثرات سطوح مختلف سه عامل کلات‌کننده EDTA (عامل کلات‌کننده شیمیایی) و سیتریک اسید و اگزالیک اسید (عوامل کلات‌کننده طبیعی) بر پتانسیل گیاه‌پالایی باقلا (*Vicia faba*) در

یک خاک آهکی آلوده به کادمیوم بود. این ارزیابی، با بررسی مقادیر عامل انتقال برای همه تیمارهای آزمایشی خواهد بود. به عبارت دیگر، این مطالعه بررسی می‌کند که چگونه عوامل کلات‌کننده مذکور می‌توانند جذب و تجمع کادمیوم توسط گیاهان باقلا را افزایش دهند. علاوه بر این، اثربخشی این عوامل را در ترویج گیاه‌پالایی و جذب کادمیوم توسط باقلا مقایسه می‌کند. این یافته‌ها به گسترش درک ما از روش‌های پایدار برای اصلاح خاک‌های آلوده به کادمیوم با استفاده از گیاه‌پالایی باقلا، به‌عنوان یک گونه گیاهی کارآمد و نیز توسعه استراتژی‌های سازگار با محیط‌زیست کمک می‌کند.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و آنالیزهای اولیه خاک

آزمایش به‌صورت فاکتوریل، در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۱ در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی اجرا شد. نمونه‌برداری خاک از لایه سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متری) زمین‌های زراعی دانشکده کشاورزی با مختصات جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۸ دقیقه شمالی و ۴۷ درجه و ۵ دقیقه شرقی انجام شد. بعد از هواخشک کردن و عبور از الک دو میلی‌متری، بعضی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت به روش هیدرومتر، واکنش (pH) به‌وسیله pH سنج و همین‌طور قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره ۱:۱ آب به خاک به‌وسیله هدایت‌سنج، کلسیم کربنات معادل به‌روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک و کربن آلی (OC) به‌روش اصلاح‌شده والکلی و بلک تعیین شدند (Klute, 1986). هم‌چنین، فسفر قابل‌جذب به روش اولسن و پتاسیم قابل‌جذب با آمونیوم استات یک نرمال انـدازه‌گیـری شـدند. شکل قابل‌جذب کادمیوم در نمونه خاک نیز به‌وسیله محلول DTPA ۰/۰۰۵ مـولار در pH ۷/۲ با دستگاه جذب اتمیک (Varian SpectrAA 220FS) تعیین شد (Lindsay and Norvell. 1986). ویژگی‌های نمونه خاک مورداستفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک مورداستفاده

پارامتر	بافت	رس (٪)	سیلت (٪)	شن (٪)	EC ($dS\ m^{-1}$)	pH	آهک (٪)	پتاسیم قابل‌جذب ($mg\ kg^{-1}$)	فسفر قابل‌جذب ($mg\ kg^{-1}$)	نیتروژن (٪)	OC (٪)	کادمیوم ($mg\ kg^{-1}$)
مقدار	SiC	۴۴	۴۱/۶	۱۴/۴	۰/۳۲	۷/۸۲	۲۵/۵	۱۸۰	۸/۵	۰/۰۸	۰/۷۸	۰/۰۷

آماده‌سازی تیمارها و کاشت گیاه در گلخانه

تیمارهای آزمایشی شامل کادمیوم در چهار سطح (۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک با کلریدکادمیوم) و عوامل کلات‌کننده اتیلن دی آمین تترا استیک اسید (EDTA)، سیتریک اسید و اگزالیک اسید، هر کدام در دو سطح (۴ و ۸ میلی‌مول بر کیلوگرم) بودند. انتخاب سطوح کادمیوم و عوامل کلات‌کننده بر اساس نتایج تحقیقات قبلی در خصوص گیاه باقلا و سایر گیاهان مشابه صورت گرفت (Ehsan *et al*., 2014: Gluhar *et al*., 2020: Hasan *et al*., 2019; Suthar *et al*., 2014). تمامی تیمارها در سه تکرار اعمال شدند.

در اجرای آزمایش از گلدان‌های پنج کیلوگرمی استفاده شد. جهت اعمال تیمار کادمیوم، محلول‌هایی متناسب با سطوح کاربردی (۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) از نمک کادمیوم کلرید تهیه و بر روی مقدار خاک موردنیاز هر گلدان اسپری و به‌طور کامل با خاک مخلوط شد. نمونه‌های خاک به مدت یک ماه در رطوبت معادل ۸۰ درصد ظرفیت زراعی (FC) در گلخانه نگهداری شدند. کوددهی نیز بر اساس نیاز گیاه و نتایج آزمون خاک انجام گردید. قبل از کاشت گیاه از تیمارهای مورد نظر نمونه‌های خاک تهیه شده و غلظت کادمیوم آن‌ها نیز اندازه‌گیری شد. سپس، چهار عدد بذر باقلا با فاصله مناسب و در عمق دو سانتی‌متری خاک هر گلدان کاشته شد. بعد از جوانه‌زنی و استقرار کامل گیاهان، سه بوته در هر گلدان باقی گذاشته شد. در طول دوره داشت (حدود سه ماه)، رطوبت خاک گلدان‌ها در محدوده ظرفیت مزرعه حفظ شد. عوامل کلات‌کننده به صورت محلول در آب و طی دو دوره آبیاری در مدت ۲۰ روز قبل از برداشت به خاک اضافه شدند.

ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

در پایان دوره رشد رویشی (قبل از گلدهی)، برخی پارامترهای رشدی گیاه با استفاده از روش‌های رایج اندازه‌گیری و به صورت میانگین هر بوته محاسبه شدند. ارتفاع گیاه از سطح خاک تا انتهای ساقه و طول ریشه‌های هر بوته بعد از شستشو با خط‌کش اندازه‌گیری شدند. جرم خشک شاخساره و ریشه بعد از خشک‌کردن داخل آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت، با ترازو تعیین گردید. همچنین،

بعد از آسیاب کردن نمونه‌ها و عبور از الک ۰/۵ میلی‌متری، با استفاده از روابط زیر درصد زی‌توده ریشه و اندام هوایی به‌دست آمد:

$$\%RB = \frac{RDW}{RFW} \times 100$$

$$\%AB = \frac{ADW}{AFW} \times 100$$

RB زی‌توده ریشه، RDW وRFW جرم خشک و تر ریشه، AB زی‌توده بخش هوایی، ADW و AFW جرم خشک و تر بخش هوایی هستند.

برای اندازه‌گیری غلظت کادمیوم ریشه و اندام هوایی از روش هضم خشک استفاده گردید (Jones, 2001). سپس، با توجه به نتایج غلظت کادمیوم ریشه و اندام هوایی و نیز مقدار کادمیوم قابل عصاره گیری خاک با DTPA، عامل انتقال (TF) و عامل تجمع بیولوژیکی (BF_A) با استفاده از روابط زیر تعیین شدند (Cheraghi et al., 2020):

$$TF = = \frac{Cd\ Shoot\ (\frac{mg}{kg})}{Cd\ Root\ (\frac{mg}{kg})}$$

$$BF_A = \frac{Cd\ Root\ (\frac{mg}{kg})}{Cd\ DTPA\ (\frac{mg}{kg})}$$

Cd_{shoot}: مقدار کادمیوم موجود در اندام هوایی (بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم)

Cd_{Root}: مقدار کادمیوم موجود در ریشه (بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم)

Cd_{DTPA}: مقدار کادمیوم قابل عصاره‌گیری خاک با DTPA (بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم)

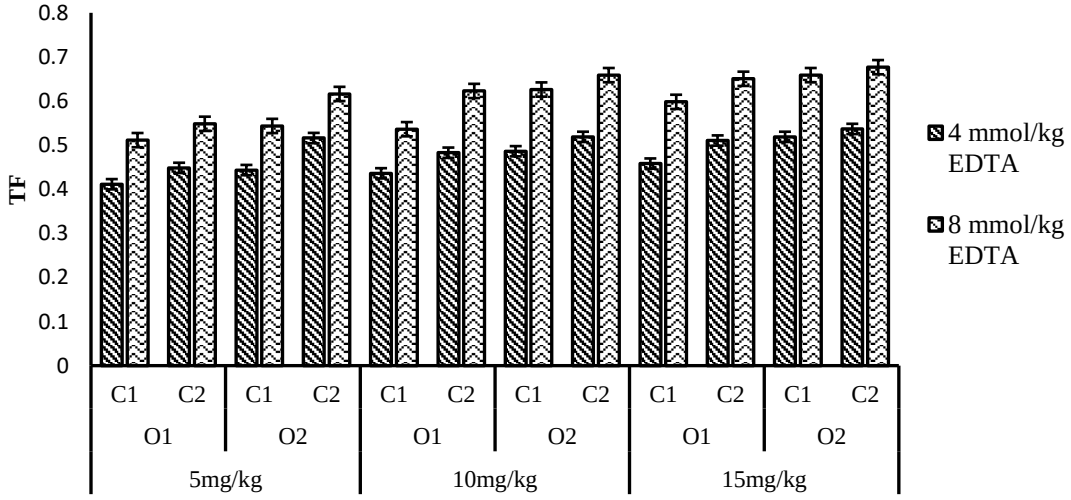
آنالیز آماری

تجزیه واریانس داده‌ها بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و مقایسه میانگین داده‌ها بر اساس آزمون دانکن با استفاده از نرم‌افزار SPSS-16 انجام گرفت.

نتایج و بحث

عامل‌های انتقال و تجمع بیولوژیکی

بر اساس نتایج، در هر سه سطح آلودگی کادمیوم در خاک، مقدار عامل انتقال (TF) در سطح ۸ میلی‌مول بر کیلوگرم عوامل کلات‌کننده نسبت به سطح ۴ میلی‌مول بر کیلوگرم بیشتر بود. بیش‌ترین مقدار این عامل (۰/۶۷) در بالاترین سطح آلودگی کادمیوم (۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) و سطوح ۸ میلی‌مول بر کیلوگرم عوامل کلات‌کننده و کم‌ترین آن (۰/۴۱) در پایین‌ترین سطح آلودگی کادمیوم و سطوح ۴ میلی‌مول بر کیلوگرم عوامل کلات‌کننده بود (شکل ۱).

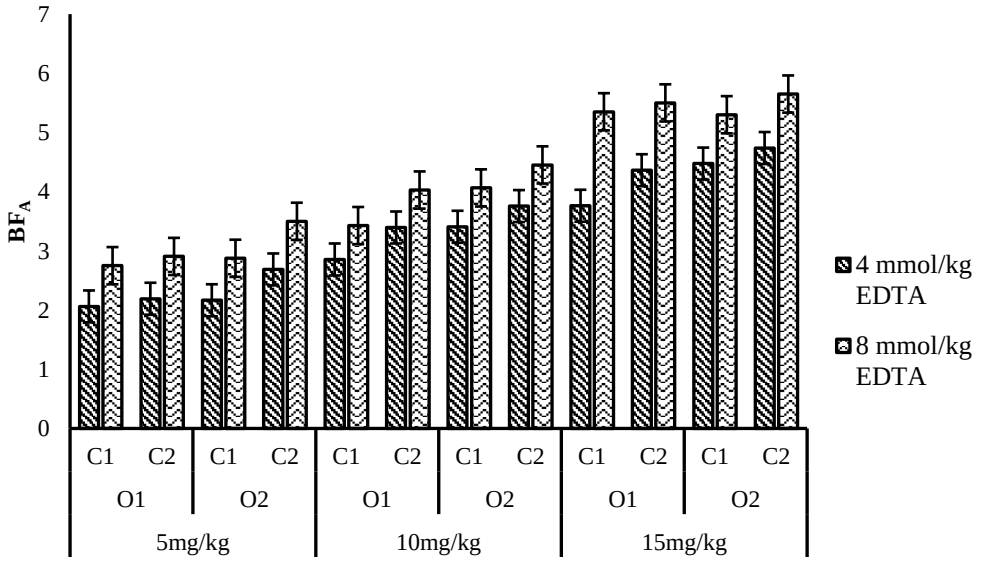


شکل ۱. اثر عوامل کلات‌کننده بر عامل انتقال کادمیوم در گیاه باقلا

C_1 و C_2 به‌ترتیب بیانگر کاربرد اسیدسیتریک در سطوح ٤ و ٨ میلی‌مول بر کیلوگرم، O_1 و O_2 به‌ترتیب بیانگر کاربرد اسید اگزالیک در سطوح ٤ و ٨ میلی‌مول برکیلوگرم، ۵، ۱۰ و ۱۵ به‌ترتیب بیانگر کاربرد سطوح مختلف کادمیوم است.

بر اساس نتایج، عوامل کلات‌کننده در همه سطوح آلودگی سبب افزایش جذب کادمیوم در اندام هوایی باقلا شدند. به‌طور کلی، مقادیر TF بزرگ‌تر از ۱ نشانگر توانایی گیاه در استخراج کادمیوم از خاک است. به‌عبارت دیگر، مقادیر کمتر از ۱ در این مطالعه نشان می‌دهد که کادمیوم عمدتاً در ریشه بوده و کم‌تر به اندام هوایی منتقل شده است. یکی از دلایل جابجایی کم آن از ریشه به اندام هوایی، ممکن است تشکیل ترکیبات با تحرک کم در ریشه باشد که به‌آسانی به اندام هوایی منتقل نمی‌شود. لازم به ذکر است که توانایی انتقال آلاینده‌ها از ریشه به اندام هوایی در گیاهان متفاوت است و به عبارتی، برخی گیاهان برای تثبیت گیاهی [1] و برخی به‌منظور استخراج گیاهی [2] مناسب می‌باشند.

هم‌چنین، در هر سه سطح آلودگی کادمیوم در خاک، مقدار عامل تجمع بیولوژیکی (BF_A) در سطح ۸ مول بر کیلوگرم عوامل کلات‌کننده نسبت به سطح ۴ میلی‌مول بر کیلوگرم بیش‌تر بود. بیش‌ترین مقدار این عامل (۵/۶۵) در بالاترین سطح آلودگی کادمیوم و در سطح ۸ میلی‌مول بر کیلوگرم عوامل کلات‌کننده و کم‌ترین آن (۲) در پایین‌ترین سطح آلودگی و در سطح ۴ میلی‌مول بر کیلوگرم عوامل کلات کننده بود (شکل ۲).



شکل ۲. اثر عوامل کلات‌کننده بر عامل تجمع بیولوژیکی کادمیوم در گیاه باقلا

C_1 و C_2 به ترتیب بیانگر کاربرد اسید سیتریک در سطوح ٤ و ٨ میلی‌مول بر کیلوگرم، O_1 و O_2 به ترتیب بیانگر کاربرد اسید اگزالیک در سطوح ٤ و ٨ میلی‌مول بر کیلوگرم، ۵، ۱۰ و ۱۵ به ترتیب بیانگر کاربرد سطوح مختلف کادمیوم است.

بر اساس نتایج، عوامل کلات‌کننده در همه سطوح آلودگی، سبب افزایش جذب کادمیوم در ریشه شدند و با افزایش سطح آلودگی، مقدار جذب در اندام هوایی گیاه نیز افزایش یافت. مقادیر BF_A بیش از ۱ نشانگر پتانسیل گیاه در جذب آلاینده است. به‌عبارت دیگر، مقادیر بیش‌تر از ۱ در این مطالعه بیانگر پتانسیل گیاه باقلا در گیاه‌پالایی و جذب کادمیوم است. البته با این وجود، باقلا به‌عنوان بیش‌انباشتگر عمل نکرد، زیرا در گیاهان بیش‌انباشتگر، کل مقدار کادمیوم جذب‌شده توسط گیاه باید بیش از ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم باشد. البته، مقایسه نتایج BF_A بالای حاصله با داده‌های سایر مطالعات و با مقادیر بسیار کم‌تر، نشان‌دهنده اثر عوامل کلات‌کننده کاربردی در این مطالعه در افزایش فراهمی کادمیوم در خاک و جذب آن توسط گیاه باقلا است.

به‌طورکلی، با توجه به مقادیر BF_A بزرگ‌تر از ۱ و TF کوچک‌تر از ۱ در تمام سطوح آلودگی کادمیوم و عوامل کلات‌کننده، می‌توان گفت که، گیاه باقلا پتانسیل تثبیت گیاهی کادمیوم را دارد. هم‌چنین، بر اساس نتایج، EDTA تاثیر بیشتری نسبت به سایر عوامل کلات‌کننده در جذب کادمیوم توسط گیاه داشته است. این امر به دلیل بالابودن ثابت پایداری تشکیل کمپلکس کلات EDTA با یون کادمیوم (۱۶/۴) در محلول خاک است (Meers *et al.*, 2008). اما به دلیل اثرات منفی EDTA در خاک (اثر بازدارندگی بر رشد گیاه و کاهش فعالیت‌های آنزیمی و زی‌توده میکروبی خاک)، جایگزینی آن با سایر عوامل کلات‌کننده لازم به نظر می‌رسد (Kaurin *et al.*, 2020).

1 . Phytostabilization
2 . Phytoextraction

ویژگی‌های مورفولوژیک بخش هوایی و ریشه باقلا

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات متقابل کادمیوم، EDTA، سیتریک اسید (CA) و اگزالیک اسید (OA) بر غلظت کادمیوم ریشه و شاخساره، ارتفاع گیاه، طول ریشه و نیز جرم خشک شاخساره و ریشه باقلا در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲).

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرات عوامل کلات‌کننده بر غلظت کادمیوم ریشه و شاخساره باقلا تحت تنش کادمیوم

منابع تغییرات	درجه آزادی	کادمیوم ریشه	کادمیوم شاخساره	ارتفاع گیاه	طول ریشه	جرم خشک شاخساره	جرم خشک ریشه
کادمیوم	۳	۰/۵۳**	۲/۷۱**	۱۸/۱۶**	۱/۰۷**	۰/۵۵**	۱/۸**
سیتریک اسید	۱	۰/۳۸**	۰/۰۹**	۰/۰۱۵*	۰/۰۱۴*	۰/۳**	۰/۱۱۴**
کادمیوم × سیتریک اسید	۳	۰/۰۵**	۰/۰۸**	۰/۴۳**	۰/۴۴**	۰/۰۶**	۰/۰۶**
اگزالیک اسید	۱	۱/۳**	۰/۰۰۴*	۰/۰۴**	۰/۳۹**	۱/۳۵**	۰/۱۲**
کادمیوم× اگزالیک اسید	۳	۰/۰۰۵**	۰/۰۸۵**	۰/۹۶**	۰/۸**	۰/۰۰۱ ns	۰/۰۸**
ستیریک اسید × اگزالیک اسید	۱	۰/۳**	۰/۰۰۳*	۰/۰۷**	۰/۰۶**	۰/۲۸**	۰/۰۰۰۸**
کادمیوم× ستیریک اسید × اگزالیک اسید	۳	۰/۰۰۳*	۰/۰۰۴**	۰/۰۰۷ ns	۰/۰۰۶ ns	۰/۰۰۴*	۰/۰۰۰۵**
EDTA	۱	۱۳/۵**	۰/۰۸۱**	۰/۰۰۵ ns	۰/۰۰۳ ns	۱۴**	۰/۹۵۱**
EDTA×کادمیوم	۳	۰/۰۱۳**	۰/۳**	۱/۱۵**	۱/۲**	۰/۰۱**	۰/۳۵۳**
سیتریک اسید ×EDTA	۱	۰/۰۰۲ ns	۰/۰۰۴**	۰/۰۰۹ ns	۰/۰۰۷ ns	۰/۰۰۷**	۰/۰۰۴**
کادمیوم×سیتریک اسید ×EDTA	۳	۰/۰۰۵**	۰/۰۰۳*	۰/۰۱۳**	۰/۰۱۱**	۰/۰۰۲ ns	۰/۰۰۳**
اگزالیک اسید ×EDTA	۱	۰/۲۹**	۰/۰۴۶**	۰/۰۲**	۰/۰۱۸**	۰/۲۸**	۰/۰۱۳**
کادمیوم× اگزالیک اسید ×EDTA	۳	۰/۰۰۴*	۰/۰۰۵**	۰/۰۶**	۰/۰۵۳**	۰/۰۰۷**	۰/۰۱۲**
سیتریک اسید ×اگزالیک اسید ×EDTA	۱	۰/۲۷**	۰/۰۱۶**	۰/۰۰۹ ns	۰/۰۰۵ ns	۰/۲۷**	۰/۰۰۲**
کادمیوم×سیتریک اسید× اگزالیک اسید ×EDTA	۳	۰/۰۰۷**	۰/۰۰۵**	۰/۰۶**	۰/۰۷۴**	۰/۰۰۷**	۰/۰۱۵**
خطا	۶۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۱

غلظت کادمیوم ریشه و شاخساره باقلا

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین مقادیر کادمیوم ریشه و شاخساره (به ترتیب ۳۹/۹ و ۲۷ $mg\ kg^{-1}$) در شرایط تنش شدید کادمیوم (۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) همراه با کاربرد ۸ میلی‌مول بر کیلوگرم از هر یک از عوامل کلات‌کننده (CA، OA و EDTA) به‌دست آمد. کم‌ترین مقادیر کادمیوم ریشه و شاخساره (۴/۴۰ و ۲/۲۵ $mg\ kg^{-1}$) نیز با کاربرد پایین‌ترین سطح از عوامل کلات‌کنندها (۴ میلی‌مول بر کیلوگرم) و سطح ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم به‌دست آمد به‌عبارت دیگر، اگرچه با افزایش غلظت کادمیوم در خاک، غلظت آن در اندام‌های گیاه بیشتر شد، اما کاربرد عوامل کلات‌کننده نیز با تشدید جذب کادمیوم، توانایی گیاه‌پالایی باقلا را افزایش دادند.

گزارش شده است که کاربرد تیمار EDTA با ایجاد پیوند با یون‌های کادمیوم خاک موجب افزایش دسترسی و جذب بیش‌تر کادمیوم توسط ریشه و انتقال آن به بخش هوایی گیاه می‌شود (Suthar *et al*., 2014). به عبارتی، جذب کادمیوم توسط گیاهان در خاک‌های آلوده می‌تواند به‌عنوان یک فرایند مثبت از نظر حفظ محیط‌زیست در نظر گرفته شود (Wu *et al*., 2023).

کاربرد سیتریک اسید نیز نقش مؤثری در کاهش pH موضعی خاک داشته و با افزایش حلالیت ترکیبات کادمیوم خاک، موجب تسهیل جذب و انتقال کادمیوم به درون گیاه می‌شود (Ehsan *et al*., 2014). اگزالیک اسید هم به‌عنوان یک اسید آلی، به علت توانایی در محلول‌سازی ترکیبات و یا افزایش قابلیت دسترسی عناصر، نقش مؤثری در افزایش جذب به‌وسیله ریشه و غلظت آن در بافت‌های گیاهی دارد (دبستانی رضوی و همکاران، ۱۳۹۴).

به‌طورکلی، وجود پیوندهای آلی–فلزی در ترکیب کلات و فلزات سبب می‌شود فلزات کم‌تر در معرض کلوئیدها و هیدروکسیدها و اکسیدها قرارگرفته، لذا مانع از رسوب و تثبیت آن‌ها در خاک می‌شود. از طرفی کلات‌ها توسط ریشه گیاهان قابل‌جذب بوده، می‌توانند فلزات را از فاز جامد و غیرمحلول به فازهای تبادلی انتقال داده و در نهایت میزان جذب فلزات توسط گیاهان را افزایش دهند (Wu *et al*., 2018).

ارتفاع گیاه و طول ریشه

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین ارتفاع بوته (۵۱/۱ سانتی‌متر) و طول ریشه باقلا (۲۴/۲ سانتی‌متر) در شرایط کاربرد همه

عوامل کلات‌کننده (CA، OA و EDTA) به میزان ۸ میلی‌مول بر کیلوگرم و بدون کادمیوم به‌دست آمد. به‌عبارتی، عوامل کلات‌کننده با افزایش فراهم‌آوری عناصر معدنی لازم برای رشد گیاه، موجب افزایش رشد عمومی گیاه و از جمله ارتفاع گیاه و طول ریشه می‌شوند. کمترین ارتفاع بوته و طول ریشه باقلا (به‌ترتیب ۲۵/۳ و ۱۰/۱ سانتی‌متر) نیز در تیمار کاربرد ۱۵ میلی‌مول بر کیلوگرم کادمیوم و ۸ میلی‌مول بر کیلوگرم از عوامل کلات‌کننده (CA، OA و EDTA) به‌دست آمد.

زمانی که گیاهان در معرض تنش فلزات سنگین مانند کادمیوم قرار گیرند، سازوکارهای تحمل و سازگاری در گیاهان نسبت به تنش فعال می‌شود. کاهش رشد اندام‌های هوایی و ریشه از پاسخ‌های گیاه نسبت به عوامل تنش‌زای محیطی است. به‌عبارت دیگر، در اثر جذب فلزات سنگین، گرانروی درون سلول و قابلیت ارتجاعی دیواره سلولی کاهش یافته و این عوامل سبب کاهش رشد طولی ساقه و ریشه می‌شود (Eissa *et al*., 2014). همچنین، کادمیوم اثرات منفی بر فرایندهای فتوسنتزی گیاهان داشته و موجب کاهش سنتز هورمون‌های رشد و به دنبال آن، رشد عمومی گیاه می‌گردد. از طرف دیگر، تنش کادمیوم با تخریب سلول‌های ریشه، باعث کاهش سنتز پروتئین و رشد و توسعه ریشه در خاک می‌شود (Wu *et al*., 2023).

همین‌طور، کاربرد عوامل کلات‌کننده مانند EDTA در بوته‌های باقلا تحت تنش نیز با افزایش جذب و تجمع کادمیوم در سلول‌های برگ و ریشه، موجب کاهش معنی‌دار رشد عمومی گیاه و از جمله ارتفاع و طول ریشه شد. به عبارتی، EDTA از طریق از بین بردن سدهای فیزیولوژیکی جداره ریشه، سبب جذب و عبور راحت کادمیوم از طریق ریشه و انتقال آن به بخش هوایی و در نهایت کاهش رشد گیاه می‌شود (Jean *et al*., 2018).

جرم خشک شاخساره و ریشه

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین جرم خشک شاخساره (۱/۳ گرم) و ریشه (۱/۲ گرم) باقلا در شرایط کاربرد ۸ میلی‌مول بر کیلوگرم سیتریک اسید، اگزالیک اسید و EDTA و بدون کادمیوم و کم‌ترین آن‌ها (به ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۱ گرم) در تیمار شدید کادمیوم (۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و کاربرد ۸ میلی‌مول بر کیلوگرم سیتریک اسید، اگزالیک اسید و EDTA به‌دست آمد. به‌عبارتی، عوامل کلات‌کننده در تیمار شاهد، سبب افزایش جرم خشک شاخساره گیاه شده اما با اعمال تنش کادمیوم و افزایش سطوح آن، موجب کاهش جرم شاخساره گردیدند

در شرایط تنش فلزات سنگین، تولید گونه‌های فعال اکسیژن زیاد می‌شود که تأثیر منفی بر ویژگی‌های رشدی گیاهان دارد. از دیگر دلایل کاهش ویژگی‌های رشدی گیاهان در اثر سمیت این فلزات، کاهش فعالیت‌های فتوسنتزی و متابولیسم کربوهیدرات‌ها است (Wu *et al*., 2018).

از طرفی، ریشه گیاه جزء اولین اندام‌هایی است که در معرض تنش فلزات سنگین قرار می‌گیرد. به عبارتی، کادمیوم از طریق ایجاد اختلال در تقسیم سلولی، سبب کاهش رشد و توسعه ریشه در خاک می‌شود. هم‌چنین، تنش کادمیوم با کاهش سنتز RNA، کلروز برگی، توقف باز و بسته شدن روزنه‌ها و کاهش فعالیت‌های آنزیمی سبب کاهش رشد عمومی گیاهان و از جمله کاهش جرم خشک شاخساره و ریشه می‌شود (Wu *et al*., 2023).

در مقابل، کاربرد EDTA، سیتریک اسید و اگزالیک اسید، به‌عنوان عوامل کلات‌کننده، سبب افزایش جرم خشک شاخساره و ریشه گیاه باقلا در نمونه خاک شاهد (بدون کادمیوم) شد. این امر به دلیل نقش این عوامل در افزایش جذب عناصر غذایی و فراهم کردن شرایط بهینه رشدی گیاه است (محبی نجم‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۸).

البته، کاربرد عوامل کلات‌کننده در تیمارهای تحت تنش کادمیوم موجب کاهش جرم خشک اندام هوایی و ریشه باقلا گردید. این امر، احتمالاً به دلیل اثرات این عوامل در افزایش قابلیت جذب کادمیوم و به دنبال آن، افزایش سمیت این عنصر در گیاه باشد. به عبارتی، این عوامل با تشکیل کمپلکس با یون‌های کادمیوم، سبب افزایش جذب آن می‌شوند.

زی‌توده شاخساره و ریشه

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین زی‌توده شاخساره و ریشه (به ترتیب ۶۳/۵۹ و۶۱/۱ درصد) در شرایط بدون کادمیوم و کاربرد ۸ میلی‌مول بر کیلوگرم از سیتریک اسید، اگزالیک اسید و EDTA و کم‌ترین آن‌ها (۴ و ۱/۱ درصد) در تیمار ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم و ۸ میلی‌مول بر کیلوگرم عوامل کلات‌کننده به‌دست آمد.

فلزات سنگین با اثرات سمی بر مسیرهای متابولیکی، سبب ایجاد اختلالات فیزیولوژیکی در گیاهان می‌شوند. مکانیسم‌های مسمومیت

شامل کاهش اثر گروه‌های عاملی مؤثر بر سنتز مولکول‌های زیستی و آنزیم‌ها، غیرفعال کردن آنزیم‌ها و تأثیر بر سیستم انتقال مواد مغذی و یون‌ها و یا جایگزینی آن‌ها با یون‌های غیرضروری می‌باشند (Wu *et al*., 2018). در بین فلزات سنگین، کادمیوم عنصری غیرضروری با سمیت بالا و فاقد هرگونه نقش مثبت در متابولیسم سلول‌های گیاهی است. کادمیوم می‌تواند جایگزین دیگر فلزات مثل مس و کلسیم در ساختار آنزیم و کوآنزیم‌ها شود. هم‌چنین، کادمیوم اثر مستقیم بر فتوسیستم ۲ و فتوسنتز دارد و از طریق جلوگیری از انتقال الکترون‌ها، در فعالیت فتوسیستم ۲ اختلال ایجاد می‌کند (Wu *et al*., 2023). به‌عبارت دیگر، کادمیوم اثر بازدارنده بر آنزیم ۳-فسفوگلیسیریک اسید کیناز (آنزیم‌های احیایی فتوسنتز) و در نتیجه، اثر بازدارندگی بر جذب کربن دی‌اکسید در چرخه کربن و فتوسنتز دارد (Ali and Hadi, 2015). هم‌چنین، کادمیوم جذب‌شده توسط ریشه، دارای آثار منفی بر زیست‌توده شاخساره و ریشه گیاهان است. در واقع، کادمیوم با جلوگیری از رشد و توسعه ریشه در خاک، موجب کاهش جذب آب و مواد مغذی می‌شود (Wu *et al*., 2023). تمامی این موارد می‌توانند از دلایل کاهش زی‌توده شاخساره و ریشه تحت شرایط آلودگی کادمیوم باشند.

کاربرد عوامل کلات‌کننده در گیاهان تحت تنش کادمیوم، به دلیل اثر منفی این فلز سنگین بر جذب عناصر غذایی مانند آهن، به‌عنوان عامل کمک‌کننده در ساختار مولکولی ترکیبات آلی، باعث کاهش زی‌توده بخش هوایی و ریشه باقلا گردید. در مقابل، کاربرد کلات کننده سبب افزایش زیست‌توده شاخساره و ریشه گیاه در نمونه خاک شاهد (بدون کادمیوم) شد. گزارش شده است که سیتریک اسید می‌توانند با کاهش pH خاک، سبب تجزیه اسید کربوکسیلات شوند و از این طریق، موجب تشکیل کمپلکس با فلز کادمیوم و تحریک جذب آن توسط ریشه و انتقال به بخش‌های هوایی گیاهان گردد (عربی و همکاران، ۱۳۸۹).

نتیجه‌گیری

نتایج بیانگر اثر معنی‌دار کادمیوم بر کاهش تمام پارامترهای مورفولوژیکی باقلا و زی‌توده است. در مقابل، کاربرد EDTA ، سیتریک اسید و اگزالیک اسید در شرایط بدون کادمیوم (خاک شاهد)، ویژگی‌های رشدی گیاه را افزایش دادند. به‌عبارت دیگر، کلات‌کننده‌ها با افزایش سرعت جذب کادمیوم در شرایط تنش شدید کادمیوم (۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) شاخص‌های رشدی باقلا را کاهش دادند. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که هر سه عامل کلات‌کننده باعث افزایش جذب کادمیوم توسط گیاهان باقلا شدند. بالاترین غلظت کادمیوم در سطوح بالاتر آلودگی کادمیوم و ۸ میلی‌مول در کیلوگرم غلظت EDTA، سیتریک اسید و اگزالیک اسید مشاهده شد. علاوه بر این، مقادیر عامل انتقال برای همه تیمارها بیشتر از یک بود، که نشان می‌دهد گیاهان باقلا پتانسیل تثبیت گیاهی را دارند. به عبارتی، استفاده از این عوامل کلات‌کننده یک روش مؤثر در راستای افزایش قابلیت گیاه‌پالایی باقلا در خاک‌های آهکی آلوده با کادمیوم است. هم‌چنین، بر اساس نتایج، بیش‌ترین مقادیر عامل انتقال و عامل تجمع بیولوژیکی در سطح ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم (بالاترین سطح آلودگی) و سطوح ۸ میلی‌مول بر کیلوگرم عوامل کلات‌کننده به‌دست آمد. این موضوع بیانگر آن است که اولاً کادمیوم به‌طور عمده در ریشه تجمع یافته و کم‌تر به اندام هوایی منتقل شده است. ثانیاً نشان‌دهنده پتانسیل گیاه باقلا در گیاه‌پالایی و جذب کادمیوم است. هم‌چنین، مقادیر عامل‌های مذکور با مصرف اسید سیتریک و اسید اگزالیک تفاوت چندانی با EDTA نداشت و بنابراین می‌توان به‌جای EDTA از دو عامل کلات‌کننده طبیعی دیگر و دوست‌دار محیط‌زیست استفاده کرد. به‌طورکلی، این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از عوامل کلات‌کننده خاص می‌تواند کارایی گیاه‌پالایی را در خاک آلوده به کادمیوم از طریق افزایش جذب فلز توسط گیاهان باقلا افزایش دهد. این یافته‌ها به توسعه استراتژی‌های سازگار با محیط‌زیست برای اصلاح فلزات سنگین با استفاده از رویکردهای گیاهی کمک می‌کند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

دبستانی‌رضوی، سیما؛ خراسانی، رضا و فتوت، امیر (۱۳۹۴). اثر EDTA و اسید اگزالیک در افزایش قابلیت استفاده فسفر خاک برای گیاه گندم. پژوهش‌های خاک. ۲۹(۱)، ۱-۱۰.

عربی، زهرا؛ همایی، مهدی و اسدی، محمد اسماعیل (۱۳۸۹). مقایسه آثار افزودن اسید سیتریک و کی‌لیت‌های مصنوعی بر افزایش پالایش گیاهی کادمیوم از خاک. علوم آب و خاک. ۱۴(۵۴)، ۸۵-۹۵.

محبی نجم‌آبادی، الهام؛ فتوت، امیر و حلاج نیا، اکرم (۱۳۹۸). اثر سیتریک اسید، نیتریلو تری استیک اسید و پلی اکریل آمید آنیونی بر گیاه پالایی نیکل به وسیله ذرت و آفتابگردان. تحقیقات آب و خاک. ۵۰(۴)، ۹۳۳-۹۲۱.

REFERENCES

Ali, N., and Hadi, F. (2015). Phytoremediation of cadmium improved with the high production of endogenous phenolics and free proline contents in *Parthenium hysterophorus* plant treated exogenously with plant growth regulator and chelating agent. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(17), 13305–13318. https://doi.org/10.1007/s11356-015-4595-3.

Arabi, Z., Homaee, M., and Asadi, M.E. (2011). Comparison effects of citric acid and synthetic chelators in enhancing phytoremediation of cadmium. *Journal of Water and Soil Science*, 14(54), 85-95. (*In Persian*).

Ashraf, S., Ali, Q., Zahir, Z.A., Ashraf, S., and Asghar, H.N. (2019). Phytoremediation: environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174,714–727. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068.

Bissani, C. A. (2000). Effects of root-derived organic acids on metal speciation in soil solution and bioavailability. University of Wisconsin, Madison. 146 pages.

Cheraghi-Aliakbari, S., Beheshti-Aleagha, A., Ranjbar, F., and Nosrati, I. (2020). Comparison of Myagrum perfoliatum and Sophora alopecuroides in phytoremediation of Cd- and Pb-contaminated soils: A chemical and biological investigation. *Chemosphere*, 259, 1-28. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127450

Dabestani Razavi, S., Khorassani, R., and Fotovat, A. (2015). Effect of oxalic acid on increasing soil phosphorus availability for wheat. *Soil Research*, 29(1), 1-10. 10.22092/IJSR.2015.101387. (*In Persian*).

Ehsan, S., Ali, S., Noureen, S., Mahmood, K., Farid, M., Ishaque, W., Shakoor, M.B., and Rizwan, M. (2014). Citric acid assisted phytoremediation of cadmium by *Brassica napus* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 106,164– 172. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.03.007.

Eissa, M.A., Ghoneim, M.F., Elgharably, G.A. and Abd El-Razek, M. (2014). Phytoextraction of nickel, lead and cadmium from metals contaminated soils using different field crops and EDTA. *World Applied Sciences Journal*, 32, 1045–1052. https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2014.32.06.912.

Gluhar, S., Kaurin, A., and Lestan, D. (2020). Soil washing with biodegradable chelating agents and EDTA: technological feasibility, remediation efficiency and environmental sustainability. *Chemosphere*, 257, 127226. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127226.

Hasan, M.M., Uddin, M.N., Ara-Sharmeen, I., Alharby, H., Alzahrani, Y., Hakeem, K.R., and Zhang, L. (2019). Assisting phytoremediation of heavy metals using chemical amendments. *Plants*, 8(9), 295. https://doi.org/10.3390/plants8090295.

Jean, L., Bordas, F., Gautier-Moussard, C., Vernay, P., Hitmi, A., and Bollinger, J.C. (2018). Effect of citric acid and EDTA on chromium and nickel uptake and translocation by Datura innoxia. *Environmental Pollution*, 153(3), 555–563. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.09.013.

Jones, J.B. (2001). *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. CRC Press, p.566 384. https://doi.org/10.1201/9781420025293

Kaurin, A., Gluhar, S., Tilikj, N., and Lestan, D. (2020). Soil washing with biodegradable chelating agents and EDTA: Effect on soil properties and plant growth. Chemosphere, 260, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127673

Klute, A. (1986). *Methods of soil analysis: Part 1 and 2, Physical and chemical methods*. 2nd Edition, American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, Madison, Wis., USA. ISBN: 9780891180883, 0891180885

Lindsay, W. L., and Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421-428. https://doi.org/10.2136/sssaj1978.

Mahar, A., Wang, P., Ali, A., Awasthi, M.K., Lahori, A.H., Wang, Q., Li, R., and Zhang, Z. (2016). Challenges and opportunei ties in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 126, 111-121. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.023.

Meers, E., Tack, F.M.G., Van Slycken, S., Ruttens, A., Du Laing, G., Vangrosveld, J., and Verloo, M.G. (2008). Chemically Assisted Phytoextraction: A review of potential soil amendments for increasing plant uptake of heavy metals. *International Journal of Phytoremediation*, 10, 390-416. https://doi.org/ 10.1080/15226510802100515.

Mohebbi najmabadi, E., Fotovat, A., and Halajnia, A. (2019). Effect of citric acid, nitrilotriacetic acid and anion polyacrylamide on phytoremediation of nickel by maize and sunflower. *Soil and Water Research*, 50(4), 921-933. https://doi.org/10.22059/IJSWR.2018.254627. (*In Persian*).

Moslehi A, Feizian, M., Higueras, P., and Eisvand, H.R. (2019). Assessment of EDDS and vermicompost for the phytoextraction of Cd and Pb by sunflower (*Helianthus annuus* L.). *International Journal of Phytoremediation*, 21,191–199. https://doi.org/10.1080/15226514.2018. 1501336.

Srivastava, S., Mishra, S., Dwivedi, S., Baghel, V.S., Verma, S., Tandon, P.K., Rai, U.N., and Tripathi, R.D. (2005). Nickel phytoremediation potential of bean (*Vicia faba* L.), and ts biochemical responses. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 74,715–724. https://doi.org/10.1007/s00128-005-0641-z.

Suthar, V., Memon, K.S., and Mahmood-Ul-Hassan, M. (2014). EDTA-enhanced phytoremediation of contaminated calcareous soils: heavy metal bioavailability, extractability, and uptake by maize and sesbania. *Environmental Monitoring and Assessment*, 86, 3957–68. https://doi.org/10.1007/s10661-014-3671-3.

Wu, Y.Y., Tian, W.F., Cheng, C.X., Yang, L., Ye. Q.Q., Li, W.H., and Jiang, J.Y. (2023). Effects of cadmium exposure on metabolism, antioxidant defense, immune function, and the hepatopancreas transcriptome of *Cipangopaludina cathayensis*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 264, 115416. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115416.

Wu, W., Wu, P., Yang, F., Sun, D., Zhang, D., and Zhou, Y. (2018). Assessment of heavy metal pollution and human health risks in urban soils around and electronics manufacturing facility. *Science of the Total Environment*, 630, 53-61. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.183.