

Enhancing the Efficiency of *Sorghum bicolor* L. in the Remediation of Cadmium-Contaminated Soils through a Bio-Chemical Approach

F. Rostami¹, H.R. Eisvand^{1*}, M. Daneshvar¹, M. Saeidi², S. Rahimi-Moghaddam¹

1- Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

(*- Corresponding Author Email: eisvand.hr@lu.ac.ir)

2- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agricultural Science and Engineering, Agriculture and Natural Resources Campus, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 29 August 2025

Revised: 11 June 2026

Accepted: 15 June 2026

Available Online: 15 June 2026

How to cite this article:

Rostami, F., Eisvand, H.R., Daneshvar, M., Saeidi, M., & Rahimi-Moghaddam, S. (2026). Enhancing the efficiency of *Sorghum bicolor* L. in the remediation of cadmium-contaminated soils through a bio-chemical approach. *Journal of Water and Soil*, 40(1), 73-88. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.95140.1496>

Introduction

Cadmium (Cd) contamination of soils is a serious environmental concern due to its persistence, high mobility, and toxicity, posing significant risks to food security and ecosystem stability. The transfer of Cd into the food chain through contaminated crops can lead to severe human health disorders. Phytoremediation has been recognized as an environmentally friendly and cost-effective strategy for the remediation of Cd-contaminated soils. Forage sorghum (*Sorghum bicolor* L.) is considered a promising species for phytoremediation because of its extensive root system, rapid growth rate, adaptability to stress conditions, and high biomass production. However, its phytoremediation efficiency may be restricted by limited Cd bioavailability in soil and metal-induced growth inhibition. Biological approaches such as plant growth-promoting bacteria (PGPB), including *Pantoea* agglomerans and *Pseudomonas fluorescens*, can improve plant performance under Cd stress through mechanisms such as siderophore production, phytohormone synthesis, phosphate solubilization, and stimulation of antioxidant defense systems. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) enhance root absorption capacity via extensive hyphal networks and may regulate metal distribution and stabilization in the rhizosphere. In addition, chemical chelators such as Na-EDTA can increase Cd solubility and availability for plant uptake, although their application may raise environmental concerns, including potential metal leaching. Although the individual effects of PGPB, AMF, and EDTA on Cd-contaminated soils have been widely reported, information regarding their interactive effects on forage sorghum under Cd stress remains limited. Therefore, this study aimed to evaluate the individual and combined effects of PGPB, AMF, and Na-EDTA on growth traits and Cd phytoremediation efficiency of forage sorghum grown in Cd-contaminated soil.

Materials and Methods

The experiment was conducted in the summer 2024 in a greenhouse at Razi University, Kermanshah, Iran, at the geographical coordinates 34°29'19" N latitude and 47°05'53" E longitude. Clay loam soil (pH 7.95, EC 0.435 dS m⁻¹, organic carbon 1.326%) was collected from a nearby field, air-dried, sieved (2 mm), and mixed with sand (2:1 ratio). Soil was spiked with 40 mg kg⁻¹ CdSO₄ and equilibrated for one month. A factorial completely

1



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.95140.1496>

randomized design with four replicates was applied across 48 pots (26 cm diameter, 30 cm height). Treatments included: (1) PGPB at three levels (control (no bacteria inoculation), *P. agglomerans* 6 g kg⁻¹ seed, *Ps. fluorescens* 7 mL kg⁻¹ seed); (2) AMF at two levels (control (no mycorrhizal inoculation), 30 g kg⁻¹ seed); and (3) Na-EDTA at two levels (control (zero), 3 mg kg⁻¹ soil). Seeds were inoculated with sugar-water solution (2%) for solid inoculants, followed by *Ps. fluorescens*, dried, and sown (10 seeds/pot, thinned to 5 plants). Na-EDTA was applied post-emergence. Irrigation was maintained at field capacity, and plants were harvested 93 days after sowing at the onset of the reproductive stage. Measured traits included aerial and root biomass (oven-dried at 80°C for 48 h), plant height, leaf area (ImageJ), Cd concentrations in plant tissues and soil (acid digestion and atomic absorption spectrometry), translocation factor (TF = shoot Cd/soil Cd), root bioconcentration factor (BCF = root Cd/soil Cd), and tolerance index (TI = treated aerial biomass/control aerial biomass). Data were analyzed using SAS 9.4 with ANOVA and Duncan's test ($P \leq 0.05$).

Results and Discussion

Shoot and root biomass as well as tolerance index were not significantly affected by treatments, indicating that Cd stress likely overshadowed the growth-promoting effects of biological amendments and that sorghum's intrinsic tolerance mechanisms played a dominant role. Na-EDTA significantly increased plant height by 12% compared with the control, suggesting that chelation reduced Cd toxicity and improved growth conditions. The interaction between bacteria and Na-EDTA significantly influenced leaf area. Single inoculation with *Pantoea agglomerans* or *Pseudomonas fluorescens* (without EDTA) increased leaf area by approximately 25.5% compared with the control, likely due to enhanced phytohormone production and nutrient availability. However, the addition of EDTA reduced this positive bacterial effect, possibly because of nutrient imbalance or microbial competition. The most pronounced phytoremediation response was observed under the combined application of *Pseudomonas fluorescens* and Na-EDTA. This treatment increased Cd concentration in shoots by 91% and in roots by 73.8% relative to the control. Simultaneously, soil bioavailable Cd decreased by 44.7%, confirming substantial Cd extraction from the soil. The translocation factor increased more than three-fold, and root bioconcentration factor increased by 216.7%, demonstrating enhanced Cd uptake and internal transfer capacity. AMF showed limited influence on BCF but reduced Cd translocation to shoots, suggesting a stabilizing role in the rhizosphere and partial immobilization of Cd, consistent with its protective function under heavy metal stress.

Conclusion

The combined application of *Pseudomonas fluorescens* and Na-EDTA markedly enhanced Cd phytoremediation efficiency in forage sorghum by increasing Cd uptake, root accumulation, translocation to shoots, and depletion of bioavailable soil Cd. While biomass production was not significantly altered, improvements in plant height, leaf area, TF, and BCF indicate enhanced functional performance under Cd stress. Single bacterial inoculation primarily improved leaf development and physiological potential, whereas AMF moderated Cd transfer to aerial parts through rhizospheric stabilization. Overall, integrating biological inoculants with controlled chelator application represents a promising strategy for optimizing phytoremediation of Cd-contaminated soils. Future research should evaluate long-term field performance, different contamination levels, and environmental safety aspects associated with chelator use.

Acknowledgement

Gratitude is extended to Lorestan, Razi, and Kharazmi Universities for providing the necessary facilities and cooperation to carry out this research.

Keywords: Phytoremediation, Plant Growth-Promoting Bacteria, Sustainable Soil Management, Cadmium Stress

افزایش کارایی سورگوم علوفه‌ای در پالایش خاک‌های آلوده به کادمیوم با رویکرد زیستی-شیمیایی

فرزاد رستمی^۱ - حمیدرضا عیسوند^{۱*} - ماشاله دانشور^۱ - محسن سعیدی^۲ - سجاد رحیمی مقدم^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

چکیده

آلودگی خاک به فلزات سنگین به‌ویژه کادمیوم از چالش‌های جدی زیست‌محیطی است به‌نحوی که حذف آن از خاک دشوار و پرهزینه می‌باشد. این پژوهش با هدف ارزیابی اثرات ترکیبی عوامل زیستی و شیمیایی بر بهبود کارایی سورگوم علوفه‌ای در پالایش خاک‌های آلوده به کادمیوم انجام شد. آزمایش در شرایط گلخانه‌ای در قالب طرح کاملاً تصادفی به‌صورت فاکتوریل با چهار تکرار اجرا گردید. تیمارهای آزمایش شامل سه سطح باکتری محرک رشد (بدون باکتری، پانتوئه آگلومرانس و سودوموناس فلورسنس)، دو سطح مایکوریزا (بدون مایکوریزا و مایکوریزا) و دو سطح EDTA (بدون EDTA و با EDTA) بود. خاک با سولفات کادمیوم با غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم آلوده شد و صفات مورفولوژیکی (زیست‌توده، ارتفاع بوته، مساحت برگ)، غلظت فلز در گیاه و خاک، فاکتورهای انتقال و تجمع زیستی و شاخص تحمل اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که بیشترین تأثیر معنی‌دار مربوط به تیمار باکتری سودوموناس فلورسنس و EDTA بوده است، زیست‌توده بخش هوایی و ریشه و همچنین شاخص تحمل به نحو معنی‌داری تحت تأثیر تیمارها قرار نگرفتند، اما تیمار EDTA باعث افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته به میزان ۱۲ درصد نسبت به شاهد شد. مساحت برگ نیز با کاربرد باکتری‌ها به طور معنی‌دار تا ۲۵/۵ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. غلظت کادمیوم در اندام هوایی با تیمار ترکیبی سودوموناس فلورسنس و EDTA به‌طور معنی‌دار و به میزان ۹۱ درصد نسبت به شاهد بیشتر شد، غلظت کادمیوم در ریشه نیز در تیمار مذکور ۷۳/۸۴ درصد نسبت به شاهد بیشتر شد. غلظت کادمیوم قابل جذب خاک با تیمار ترکیبی سودوموناس فلورسنس و EDTA به‌طور معنی‌دار ۴۴/۷ درصد کاهش یافت و فاکتور انتقال با این ترکیب بیش از سه برابر شاهد بود. تجمع زیستی کادمیوم در ریشه نیز با تیمار ترکیبی سودوموناس فلورسنس و EDTA ۲۱۶/۶۶ درصد افزایش معنی‌دار نسبت به شاهد نشان داد. این یافته‌ها بیانگر پتانسیل بالای ترکیب باکتری و EDTA در افزایش جذب و انتقال فلز برای گیاه‌پالایی می‌باشد و می‌تواند در مدیریت پایدار خاک‌های آلوده به فلزات سنگین کاربرد داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: باکتری‌های محرک رشد، تنش کادمیوم، گیاه‌پالایی، مدیریت پایدار خاک

مقدمه

محسوب می‌شود (Rizwan et al., 2017). ورود این فلز به زنجیره غذایی از طریق محصولات کشاورزی آلوده می‌تواند عوارض جدی را برای سلامت انسان ایجاد کند (Haider et al., 2021). در پاسخ به

آلودگی خاک به کادمیوم^۳ به‌دلیل پایداری، تحرک بالا و سمیت شدید آن، یک تهدید جهانی برای امنیت غذایی و سلامت بوم‌سامانه‌ها

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

(Email: eisvand.hr@lu.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

۲- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی پردیس طبیعی دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

بسیار محدود و نوظهور است. به تازگی، مطالعات بر روی گیاه آفتابگردان^۸ نشان داد که کاربرد توأم باکتری‌های محرک رشد گیاه و کود آلی نسبت به کاربرد تک تیماری، کارایی بسیار بالاتری در استخراج سرب داشت (Saleem et al., 2018). همچنین، اثر مثبت ترکیب مایکوریزا و بیوجار در کاهش سمیت کادمیوم برای ذرت^۹ گزارش شد (Liu et al., 2018). با این وجود، تاکنون مطالعه جامعی که به‌طور همزمان به بررسی اثر متقابل این سه عامل کلیدی بر جذب کادمیوم در گیاه سورگوم در یک خاک آلوده به این فلز بپردازد، انجام نشده است. این شکاف دانشی، انگیزه اصلی برای طراحی تحقیق حاضر است. بر این اساس، این پژوهش با هدف واکاوی تأثیر کاربرد جداگانه و ترکیبی باکتری‌های محرک رشد، قارچ‌های مایکوریزا و کلات‌کننده EDTA^{۱۰} بر شاخص‌های رشد، ویژگی‌های فیزیولوژیکی و به‌طور ویژه، توانایی گیاه‌پالایی سورگوم علوفه‌ای در یک خاک آلوده به کادمیوم انجام شد. فرضیه اصلی آن است که کاربرد ترکیبی این تیمارها می‌تواند با ایجاد اثر هم‌افزایی، بیشترین کارایی را در استخراج کادمیوم و کاهش تنش وارد بر گیاه داشته باشد. نتایج این مطالعه می‌تواند گامی مهم در جهت توسعه پروتکل‌های عملی و کارآمد برای پالایش خاک‌های آلوده باشد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در تابستان سال زراعی ۱۴۰۳ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی کرمانشاه اجرا گردید. خاک مورد استفاده از مزرعه مجاور گلخانه به مختصات عرض جغرافیایی ۳۴°۲۹'۱۹" و طول جغرافیایی ۴۷°۰۵'۵۳" و به‌صورت تصادفی و از دو عمق ۰-۳۰ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متری برداشت شد و پس از اختلاط هوا خشک شد و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد، بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962) تعیین شد و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آنها مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (جدول ۱)، هدایت الکتریکی به روش استاندارد عصاره اشباع خاک با دستگاه EC متر (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954)، اسیدیته به روش بلک (Black, 1965)، نیتروژن کل به روش کج‌لدال (Nelson & Sommers, 1980)، کربن آلی خاک به روش تیتراسیون واکلی-بلک (Walkley & Black, 1934)، آهک کل خاک به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتراسیون (Black, 1965)، فسفر به روش اولسن و سامرز استخراج و غلظت آن با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد (Olsen & Sommers, 1982)، پتاسیم به روش چپمن استخراج و

این معضل، فناوری گیاه‌پالایی به‌عنوان یک راهکار پایدار و مقرون‌به‌صرفه برای پالایش خاک‌های آلوده مورد توجه قرار گرفته است. موفقیت این فناوری به شدت به انتخاب گیاهی با توانایی تجمع فلز در بخش هوایی و تولید زیست‌توده بالا وابسته است (Kumar et al., 2024). در این میان، سورگوم علوفه‌ای *Sorghum bicolor* به دلیل ویژگی‌های خاص از جمله سیستم ریشه‌ای گسترده، سرعت رشد بالا، سازگاری با شرایط سخت و تولید زیست‌توده قابل توجه، به‌عنوان یک گونه با قابلیت تجمع زیاد عناصر سنگین^۱ برای گیاه‌پالایی کادمیوم معرفی شده است (Jia et al., 2016). با این وجود، کارایی این گیاه اغلب به‌دلیل دسترسی زیستی^۲ محدود کادمیوم در خاک و سمیت آن که منجر به مهار رشد و اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی می‌شود، با محدودیت مواجه است (Zhang et al., 2024). برای غلبه بر این چالش‌ها، راهبردهای اصلاحی زیستی مختلفی از جمله استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه^۳ مورد توجه قرار گرفته است (Chi et al., 2025). این باکتری‌ها از طریق مکانیسم‌های متنوعی از جمله تولید سیدروفور^۴ برای کلاته‌سازی^۵ فلزات، سنتز هورمون‌های رشد گیاهی مانند اکسین، حل‌کنندگی فسفات و القای سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، نه تنها تحمل گیاه به تنش کادمیوم را افزایش می‌دهند، بلکه بر قابلیت جذب و تجمع آن نیز می‌افزایند (Sharma et al., 2024). به‌طور مشابه، قارچ‌های مایکوریزای آربوسکولار^۶ با ایجاد یک شبکه هیفی گسترده در خاک، سطح جذب ریشه را به‌طور چشمگیری افزایش داده و با تثبیت فلزات در ساختارهای خود و یا در ناحیه ریزوسفر، انتقال آن به بخش‌های هوایی را تعدیل نموده و در نتیجه سمیت کادمیوم برای میزبان را کاهش می‌دهند (Chen et al., 2022). علاوه بر عوامل زیستی، استفاده از کلات‌کننده‌های شیمیایی مانند EDTA (اتیلن دی آمین تترا استیک اسید) یک روش رایج برای افزایش انحلال‌پذیری و تحرک فلزات در خاک است. شهید و همکاران (Shahid et al., 2014) بیان می‌کنند که کاربرد EDTA می‌تواند غلظت کادمیوم را در اندام هوایی افزایش دهد، با این حال، این ترکیب می‌تواند اثرات منفی بر ساختار خاک و جامعه میکروبی داشته و با افزایش خطر آلودگی فلز به لایه‌های زیرین خاک، تهدیدی برای آب‌های زیرزمینی ایجاد کند. اگرچه اثرات جداگانه هر یک از این تیمارها (باکتری‌های محرک رشد گیاه، مایکوریزا و EDTA) به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته است، اما پژوهش در مورد اثرات هم‌افزایی^۷ و ترکیبی آنها، که می‌تواند پتانسیل گیاه‌پالایی را به حداکثر برساند،

7- Synergistic
8- *Helianthus annuus*
9- *Zea mays*
10- Sodium EDTA (Ethylenediaminetetraacetic acid)

1- Hyperaccumulator
2- Bioavailability
3- Plant Growth Promoting Bacteria (PGPB)
4- Siderophore
5- Chelation
6- Arbuscular mycorrhiza

زیست‌توده اندام‌هوایی: در پایان رشد رویشی و آغاز مرحله زایشی بوته‌ها از محل طوقه بریده شدند و پس از توزین، به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شدند. پس از آن مجدداً وزن شدند و بر حسب گرم در بوته گزارش شد. زیست‌توده ریشه: بوته‌ها پس از خروج از گلدان و شستشوی کامل، به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک و سپس بر حسب گرم در بوته توزین شدند. ارتفاع بوته: ارتفاع بوته‌ها از سطح گلدان تا نقطه انتهایی رشد بر حسب سانتی‌متر محاسبه شد. مساحت برگ: مساحت مربوطه با نرم‌افزار (Image j) در مرحله پایان رشد رویشی محاسبه شد. فاکتور انتقال^۶ و تجمع زیستی ریشه^۷ طبق فرمول‌های ۱ و ۲ و شاخص تحمل^۸ طبق فرمول (۳) محاسبه شدند:

$$TF = \frac{Cd_{Shoot}}{Cd_{Soil}} \quad (1)$$

که در این فرمول Cd_{shoot} و Cd_{soil} به ترتیب نشان‌دهنده غلظت کادمیوم در اندام هوایی و خاک (بر حسب میکروگرم بر کیلوگرم) هستند (Yoon et al., 2006)

$$BCF = \frac{Cd_{root}}{Cd_{Soil}} \quad (2)$$

که در این فرمول Cd_{root} و Cd_{soil} به ترتیب نشان‌دهنده غلظت کادمیوم در ریشه و خاک (بر حسب میکروگرم بر کیلوگرم) هستند (Zayed et al., 1998).

$$TI = \frac{B_{treatment}}{B_{control}} \quad (3)$$

که در این فرمول $B_{treatment}$ و $B_{control}$ به ترتیب نشان‌دهنده زیست توده خشک اندام هوایی (بر حسب گرم) در تیمارهای مختلف و شرایط شاهد هستند (Wilkins, 1978).

پردازش داده‌ها

آنالیز آماری برای مقایسه اثر تیمارها مورد استفاده بر صفات مورد اندازه‌گیری با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS 9.4 انجام شد. برای مقایسه میانگین‌ها از روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده گردید.

غلظت آن با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتری قرائت شد (Chapman & Kelly, 1930) (جدول ۱). غلظت کادمیوم قابل جذب خاک^۱: پس از عصاره‌گیری به روش DTPA، غلظت کادمیوم قابل جذب خاک توسط دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی (SpectrAA 220, Varian, Australia) بر حسب میکروگرم بر کیلوگرم قرائت شد (Lindsay & Prokop et al., 2003 Norvell, 1978). غلظت کادمیوم در گیاه^۲: به روش هضم اسیدی و غلظت آن توسط دستگاه طیف‌سنجی جذب اتمی شعله‌ای بر حسب میکروگرم بر کیلوگرم قرائت شد (Grembecka & Szefer, 2013). همچنین ویژگی‌های یک نمونه آب چاه، از منبع آبیاری گلخانه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. میزان کادمیوم آب به روش مستقیم (اسیدی‌سازی با اسید نیتریک) توسط دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی (SpectrAA 220, Varian, Australia) بر حسب میکروگرم بر لیتر قرائت شد (Lindsay & Norvell, 1978)، هدایت الکتریکی آب با دستگاه EC متر (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954)، اسیدیته آب با PH متر (Black, 1965)، و بی‌کربنات آب به روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد (National Research Council, 1993) (جدول ۲). آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی به صورت فاکتوریل با چهار تکرار و در ۴۸ گلدان با قطر ۲۶ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. تیمارها شامل: (۱) باکتری محرک رشد در سه سطح بدون باکتری، بذرمال با مایه جامد پانتوئه آگلومرانس^۳ (۶ گرم در کیلوگرم بذر)، بذرمال با محلول سودوموناس فلورسنس^۴ (۷ میلی‌لیتر در کیلوگرم بذر)، (۲) قارچ مایکوریزا در دو سطح (بدون مایکوریزا و بذرمال با مایه جامد ۳۰ گرم در کیلوگرم بذر) و (۳) پودر EDTA در دو سطح (صفر و مصرف ۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) بود. محتوی گلدان‌ها به نسبت ۲:۱ خاک و ماسه با پودر سولفات کادمیوم^۵ (۴۰ میلیگرم در کیلوگرم) به صورت محلول در آب و اسپری مخلوط و به مدت (یک ماه) در زیر نایلون آماده شد، سپس به نسبت مساوی در هر گلدان توزین و برای کاشت آماده شد. برای بذر مال کردن بذور با مایه جامد آماده مایکوریزا آریسکولار و مایه جامد باکتری پانتوئه آگلومرانس از محلول رقیق شده آب و شکر ۲٪ استفاده شد. زمان غوطه‌وری بذور: ۲-۳ دقیقه و پس از آغشته کردن بذرها در سایه خشک شد و سپس در محلول باکتری سودوموناس فلورسنس به مدت حداکثر ۲ دقیقه قرار داده شد و پس از خشک شدن در سایه، تعداد ۱۰ بذر با فواصل مساوی کشت شد، پس از استقرار گیاهچه ۵ بوته در هر گلدان باقی ماند و EDTA به صورت محلول در آب به گلدان‌ها اضافه شد. آبیاری بر اساس نیاز آبی گیاه و در حد ظرفیت زراعی خاک انجام شد و برداشت، ۹۳ روز پس از کاشت بذرها و در ابتدای مرحله زایشی صورت گرفت.

5- Cadmium sulfate hydrate (3CdSO₄·8H₂O)

6- Transfer Factor

7- Root Bioconcentration Factor

8- Tolerance Index

1- Bioavailable cadmium concentration in soil

2- Cadmium concentration in plant

3- *Pantoea agglomerans*

4- *Pseudomonas fluorescens*

جدول ۱- آنالیز خاک قبل از اعمال تیمارها

Table 1- Soil analysis before the application of treatments

کادمیوم قابل جذب Cd ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	هدایت الکتریکی عصاره اشباع ECe (dS m^{-1})	اسیدیته pH	رس (%) Clay	شن (%) Sand	سیلت (%) Silt
186	0.435	7.95	31	22	47
بافت خاک Soil texture	نیترژن کل TN (%)	کربن آلی O.C (%)	آهک (CaCO_3) (%)	فسفر P (mg kg^{-1})	پتاسیم K (mg kg^{-1})
Clay Loam	0.14	1.326	40	9.05	474

جدول ۲- آنالیز آب

Table 2- Irrigation water analysis

کادمیوم Cd ($\mu\text{g L}^{-1}$)	هدایت الکتریکی EC (dS m^{-1})	اسیدیته pH	بی کربنات Bicarbonate (mg L^{-1})
28.4	0.827	8.28	-

نتایج و بحث

زیست توده اندام هوایی

دوگانه و سه گانه آن‌ها تأثیر آماری معنی داری بر وزن خشک ریشه سورگوم علوفه‌ای نشان ندادند (جدول ۳). همزیستی با مایکوریزا در گیاه سورگوم در شرایط آلودگی فلزات سنگین لزوماً منجر به افزایش وزن ریشه نمی‌شود و تأثیر آن به عوامل محیطی، شدت تنش و نوع قارچ بستگی دارد (Kchikich *et al.*, 2025). رقابت بین میکروارگانیسم‌ها برای منابع ریزوسفری ممکن است مانع از تأثیر مثبت بر رشد ریشه شده باشد (Dhawi *et al.*, 2016). در تحقیقی توسط عبدالله و همکاران (Al-Dokhi *et al.*, 2015)، تأثیر قارچ‌های مایکوریزا و EDTA بر رشد ریشه آفتابگردان در خاک آلوده به کادمیوم بررسی شد. نتایج آنها نشان داد که هیچ‌یک از تیمارها اثر معنی داری بر وزن خشک ریشه نداشتند، این مطالعه اشاره کرد که کاهش رشد ریشه ممکن است به عنوان یک مکانیسم حفاظتی برای محدود کردن جذب کادمیوم عمل کند.

ارتفاع بوته

نتایج نشان دادند تنها اثر ساده EDTA بر ارتفاع بوته گیاه سورگوم در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار بود و سایر اثرات معنی دار نبودند (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد تیمار حاوی EDTA ۱۲ درصد نسبت به تیمار شاهد (۸۱/۲ سانتی متر) ارتفاع بیشتری داشت (شکل ۱). این یافته بیانگر نقش مثبت EDTA در کاهش اثرات منفی تنش کادمیوم بر رشد اندام هوایی گیاه است. به نظر می‌رسد EDTA با نقش کلاته‌کنندگی خود باعث کاهش فراهمی کادمیوم در اطراف ریشه و در نتیجه کاهش سمیت آن شده و به رشد بهتر بخش هوایی گیاه، از جمله ارتفاع، کمک کرده است. این یافته با دیگر نتایج هم‌راستا است کاربرد

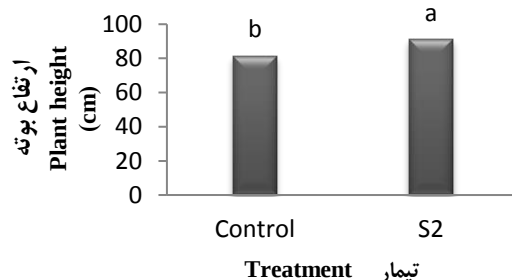
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که هیچ‌یک از اثرات ساده باکتری‌های محرک رشد، قارچ مایکوریزا و EDTA، همچنین اثرات متقابل دوگانه و سه گانه آن‌ها بر وزن خشک اندام هوایی گیاه سورگوم علوفه‌ای تحت تنش کادمیوم معنی دار نبودند (جدول ۳). بر اساس گزارش چیرانجیوی و همکاران (Chiranjeevi *et al.*, 2024) کاربرد قارچ‌های مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد مگر در شرایط تغذیه‌ای بهینه، در گیاه سورگوم علوفه‌ای تحت تنش فلزات سنگین، تأثیر معنی داری بر رشد اندام هوایی نداشته است، همچنین مطالعه مذکور تأکید می‌کند که تنش شدید ناشی از کادمیوم می‌تواند اثرات مثبت عوامل زیستی را بر رشد اندام هوایی گیاه کاهش دهد. در شرایط آلودگی شدید، افزایش وزن خشک گیاه مستلزم زمان بیشتری برای استقرار همزیستی مؤثر مایکوریزا و تثبیت عملکرد باکتری‌ها است (Qin *et al.*, 2024). بنابراین، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در حضور کادمیوم، رشد اندام هوایی گیاه سورگوم علوفه‌ای پاسخ آماری معنی داری به تیمارهای زیستی نشان نداد و به نظر می‌رسد که مکانیسم‌های فیزیولوژیک دیگری نظیر تنظیم اسمزی، تولید ترکیبات آنتی اکسیدانی نقش مهم‌تری در تحمل گیاه به تنش ایفا کرده‌اند.

زیست توده ریشه

در شرایط حضور کادمیوم هیچ‌یک از اثرات ساده باکتری‌های محرک رشد، قارچ مایکوریزا و EDTA، همچنین اثرات برهم‌کنش

مساحت برگ
بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه، اثر متقابل تیمار باکتری و EDTA بر مساحت برگ در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود، در حالی که اثرات مرتبط با قارچ میکوریزا معنی‌دار نشدند (جدول ۳).

در EDTA خاک‌های آلوده به کادمیوم باعث افزایش جذب عناصر مفید، کاهش تحرک فلزات سنگین و بهبود رشد گیاه ذرت شد (Anwar *et al.*, 2017). در مطالعه‌ای دیگر، اثر مثبت کاربرد توأم باکتری‌های محرک رشد و EDTA را در افزایش ارتفاع بوته گندم تحت تنش فلزات سنگین گزارش کردند (Rizvi *et al.*, 2020).



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر اصلی تیمار EDTA بر ارتفاع بوته سورگوم علوفه‌ای در خاک آلوده به کادمیوم

Control (شاهد: بدون EDTA)، EDTA (S2)

Figure 1- Comparison of the main effect of Na-EDTA treatment on plant height of (*Sorghum bicolor* L.) grown in cadmium-contaminated soil
(Control: No Na-EDTA), S2: Na-EDTA treatment)

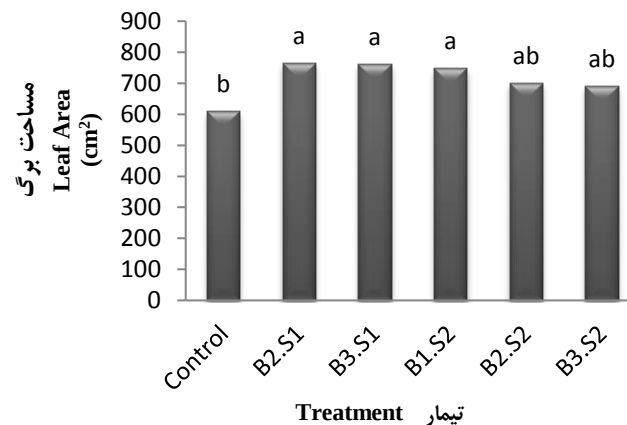
جدول ۳- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی سورگوم علوفه‌ای در خاک آلوده به کادمیوم

Table 3- Analysis of variance (ANOVA) of the effect of experimental treatments on morphological and physiological traits of *Sorghum bicolor* L. in cadmium-contaminated soil

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean squares			
		زیست توده اندام هوایی Shoot biomass	زیست توده ریشه Root biomass	ارتفاع بوته Plant height	سطح برگ Leaf area
باکتری Bacteria	2	0.10192	0.01548	323.6	13926
مایکوریزا Mycorrhiza	1	0.00691	0.00792	4.6	5106
EDTA Na-EDTA	1	0.13700	0.00035	1136.4*	20
باکتری × مایکوریزا Bacteria × Mycorrhiza	2	0.02053	0.03264	3.6	3464
باکتری × EDTA Bacteria × Na-EDTA	2	0.28292	0.01140	424.0	56693*
مایکوریزا × EDTA Mycorrhiza × Na-EDTA	1	0.02400	0.00250	13.3	7001
باکتری × مایکوریزا × EDTA Bacteria × Mycorrhiza × Na-EDTA	2	0.00489	0.01175	298.1	4027
خطا Error	36	0.10013	0.07160	201.0	14725
ضریب تغییرات (%) (%) C.V		10.62000	14.65000	17.4	17.11

بدون علامت، *، ** و *** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵، ۱ و ۰/۰۱ درصد.

ns, *, ** and *** indicate non-significance and significance at the probability level of 5, 1 and 0.01%, respectively.



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر تیمار باکتری $\times$ EDTA بر مساحت برگ سورگوم علوفه ای در خاک آلوده به کادمیوم

شاهد (بدون باکتری و بدون EDTA)، B1 (بدون باکتری)، B2 (پانتوئه آگلومرانس)، B3 (باکتری سودوموناس فلورسنس)، S1 (بدون EDTA)، S2 (با EDTA).

Figure 2- Comparison of the mean effect of bacterial treatment $\times$ Na-EDTA on the leaf area of *Sorghum bicolor* L. in cadmium-contaminated soil

Control (No Bacteria and No Na-EDTA), B1 (No Bacteria), B2 (*Pantoea agglomerans* Bacteria), B3 (*Pseudomonas fluorescens* Bacteria), S1 (No Na-EDTA), S2 (With Na-EDTA).

تیمارهای زیستی و شیمیایی، با وجود تأثیر معنی‌دار بر شاخص‌هایی چون مساحت برگ و ارتفاع بوته، به افزایش آماری معنی‌دار در وزن خشک اندام هوایی منجر نشده است، که این امر می‌تواند ناشی از تفاوت‌های فیزیولوژیکی بین شاخص‌های رشد، نحوه توزیع ماده خشک، و محدودیت زمانی برداشت باشد (Abou Jaoudé et al., 2024).

غلظت کادمیوم در اندام هوایی

اثرات اصلی باکتری، مایکوریزا، EDTA در سطح احتمال ۰/۰۱ درصد و همچنین اثر متقابل باکتری $\times$ EDTA بر غلظت کادمیوم در اندام هوایی گیاه سورگوم در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). در اثر متقابل باکتری و EDTA بیشترین میزان کادمیوم در اندام هوایی در تیمار ترکیبی باکتری سودوموناس فلورسنس $\times$ EDTA مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد (۴۶۷/۲۵ میکروگرم بر کیلوگرم) حدود ۹۱ درصد افزایش داشت و کمترین میزان کادمیوم اندام هوایی از شاهد بدست آمد (شکل ۳، a). این افزایش قابل توجه نشان می‌دهد که استفاده توأم از باکتری سودوموناس و EDTA می‌تواند به طرز مؤثری جذب و انتقال کادمیوم به اندام‌های هوایی را افزایش دهد و در فرآیند گیاه‌پالایی نقش کلیدی ایفا کند. همچنین، تیمارهای حاوی باکتری پانتوئه آگلومرانس با EDTA و بدون EDTA نیز نسبت به شاهد به ترتیب ۷۴/۲۶ درصد و ۱۷/۶ درصد افزایش داشتند که نشان‌دهنده تأثیر مثبت این باکتری در افزایش تحرک فلز سنگین است (شکل ۳، a).

بیشترین مساحت برگ در تیمار پانتوئه آگلومرانس $\times$ بدون EDTA مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری ۲۵/۵ درصد بیشتر از شاهد (۶۰۹/۴۱ سانتی‌متر مربع) بود، تیمار سودوموناس فلورسنس $\times$ بدون EDTA و تیمار بدون باکتری $\times$ EDTA نیز نسبت به شاهد اختلاف معنی‌داری داشتند، هر چند از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای باکتری $\times$ بدون EDTA و بدون باکتری $\times$ EDTA نبود (شکل ۲). این یافته‌ها نشان می‌دهد که باکتری‌های محرک رشد بدون EDTA، احتمالاً به دلیل تحریک تولید هورمون‌های گیاهی (مانند اکسین و سیس‌توکین)، بهبود جذب عناصر غذایی و افزایش کارایی فتوسنتز در شرایط تنش کادمیوم، مساحت برگ را افزایش می‌دهند. در مقابل، ترکیب EDTA با پانتوئه آگلومرانس یا سودوموناس فلورسنس باعث کاهش مساحت برگ در مقایسه با تیمارهای فاقد EDTA و فاقد باکتری شد، اگرچه همچنان افزایش نسبت به شاهد مشاهده گردید. این کاهش می‌تواند ناشی از رقابت برای جذب عناصر غذایی باشد (Gouda et al., 2018). در شرایط این آزمایش، قارچ مایکوریزا نتوانسته است تأثیر معنی‌داری بر مساحت برگ گیاه سورگوم داشته باشد. احتمالاً این عدم تأثیر می‌تواند به چند دلیل از جمله تنش شدید کادمیوم، یا عدم موفقیت در رقابت با جمعیت‌های باکتریایی باشد (Kchikich et al., 2024).

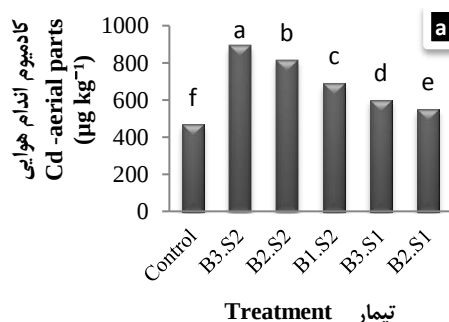
این نتایج با یافته‌های بشیر و همکاران (Bashir et al., 2022) در گندم^۱ تحت تنش کادمیوم و یافته‌های اله و همکاران (Ullah et al., 2024) در آفتابگردان هم‌خوانی دارد که اثرات متناقض ترکیب باکتری‌های محرک رشد و کلاتورها را گزارش کردند. کاربرد ترکیبی

فسفره سودوموناس فلورسنس به تنهایی و به‌ویژه در ترکیب با EDTA، موجب افزایش قابل توجهی در تجمع کادمیوم در ریشه سورگوم علوفه‌ای گردید. این موضوع نشان‌دهنده نقش مؤثر این باکتری در افزایش ظرفیت گیاه برای جذب و تجمع کادمیوم است. مطالعات مشابه نیز گزارش کرده‌اند که استفاده از سودوموناس فلورسنس باعث افزایش معنی‌دار غلظت کادمیوم در ریشه و بخش‌های هوایی ذرت شد (Akhgar et al., 2020). همچنین، نقش همزیستی میکوریزا در تنظیم جذب فلزات سنگین نیز در مطالعات مختلف تأیید شده است این قارچ می‌تواند با افزایش سطح جذب مواد مغذی و بهبود سلامت ریشه، به تعدیل تجمع فلزات کمک کند (Zhao et al., 2024).

غلظت کادمیوم در خاک

در اثر متقابل باکتری و EDTA شاهد بیشترین غلظت کادمیوم قابل جذب خاک را با میانگین ۷۰۱ میکروگرم بر کیلوگرم داشت و تیمار باکتری سودوموناس فلورسنس همراه با EDTA کمترین مقدار را داشت که کاهش ۴۴/۷ درصدی نسبت به شاهد را نشان داد (شکل ۵، a). تیمار باکتری پانتوئه آگلومرانس همراه با EDTA نیز کاهش ۳۶/۶ درصدی نسبت به شاهد داشت.

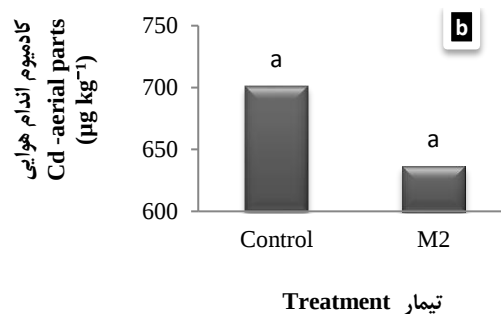
حتی در غیاب EDTA، تیمار باکتری پانتوئه آگلومرانس × بدون EDTA و تیمار سودوموناس فلورسنس × بدون EDTA نسبت به شاهد (بدون باکتری × بدون EDTA) ۸/۶ و ۱۵/۶ درصد کاهش در غلظت کادمیوم در خاک را نشان دادند. در غیاب باکتری نیز، کاهش ۲۲/۹۷ درصدی کادمیوم نسبت به شاهد مشاهده شد. در بررسی اثر میکوریزا، غلظت کادمیوم در خاک در تیمار میکوریزا نیز ۷/۵۳ درصد بیشتر از شاهد (۵۳۱ میکروگرم بر کیلوگرم) بود (شکل ۵، b).



تأثیر میکوریزا گرچه در تجزیه واریانس معنی‌دار بود (جدول ۴)، اما در مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری نبود (شکل ۳، b)، اما روند کاهش نسبی در میانگین‌ها دیده شد که ممکن است به دلیل افزایش تثبیت فلز در ریشه و کاهش انتقال به اندام هوایی باشد. با کاربرد سودوموناس فلورسنس و EDTA افزایش کادمیوم در برگ‌های ذرت گزارش شد (Chen et al., 2017). همچنین با کاربرد سودوموناس و EDTA افزایش ۸۵ درصدی کادمیوم در برگ‌های پنبهک گزارش شد (Chen et al., 2024). در مطالعه‌ای دیگر محققان نقش هم‌افزایی تیمار EDTA و سودوموناس فلورسنس در انتقال کادمیوم به ساقه اسپرس را گزارش کردند (Lambert et al., 2004).

غلظت کادمیوم در ریشه

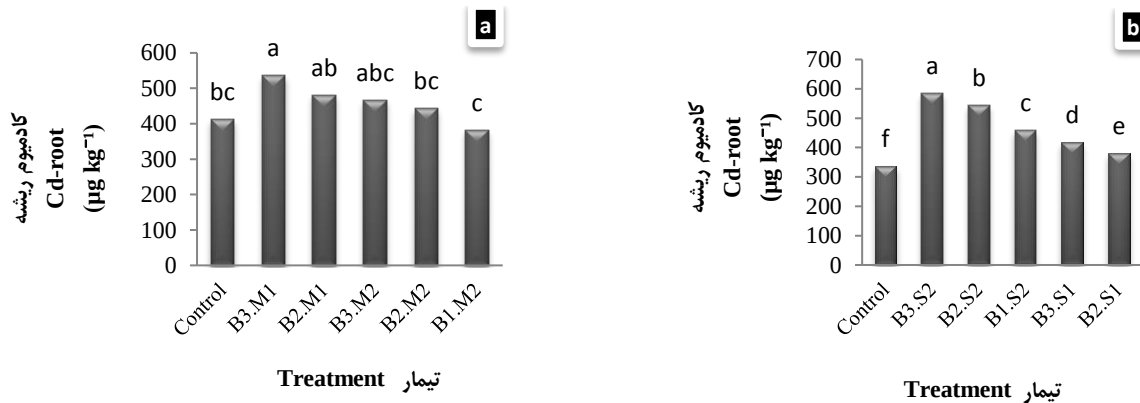
در اثر متقابل باکتری و میکوریزا تیمار باکتری سودوموناس فلورسنس × بدون میکوریزا بیشترین میزان غلظت کادمیوم در ریشه را داشت که ۳۰ درصد افزایش جذب کادمیوم در ریشه نسبت به شاهد را نشان داد، در مقابل، تیمار بدون باکتری × میکوریزا کمترین مقدار را داشت که تقریباً ۷ درصد کمتر از شاهد (بدون باکتری × بدون میکوریزا) که فاقد EDTA و با مقدار (۴۱۲ میکروگرم بر کیلوگرم) بود اگرچه تفاوت آماری معنی‌داری با شاهد نشان نداد (شکل ۴، a). در اثر متقابل باکتری و EDTA، تیمار باکتری سودوموناس فلورسنس × EDTA نیز بیشترین غلظت کادمیوم را در ریشه ثبت کرد که ۷۳/۸۴ درصد بالاتر از شاهد (بدون باکتری × بدون EDTA) که فاقد میکوریزا با مقدار (۳۳۶/۵ میکروگرم بر کیلوگرم) بود، در مقابل، شاهد (بدون باکتری × بدون EDTA) که فاقد میکوریزا بود کمترین مقدار کادمیوم در ریشه را نشان داد (شکل ۴، b). نتایج نشان داد که استفاده از باکتری



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر تیمار باکتری × EDTA و تیمار میکوریزا بر غلظت کادمیوم اندام هوایی سورگوم علوفه‌ای در خاک آلوده به کادمیوم
شکل a شاهد (بدون باکتری و بدون EDTA)، شکل b شاهد (بدون میکوریزا)، B1 (بدون باکتری)، B2 (باکتری پانتوئه آگلومرانس)، B3 (باکتری سودوموناس فلورسنس)، S1 (بدون EDTA)، S2 (با EDTA)، M2 (با میکوریزا).

Figure 3- Comparison of the mean effects of combined treatments of bacteria with sodium EDTA and mycorrhiza on the cadmium concentration in the aerial parts of *Sorghum bicolor* L. in cadmium-contaminated soil

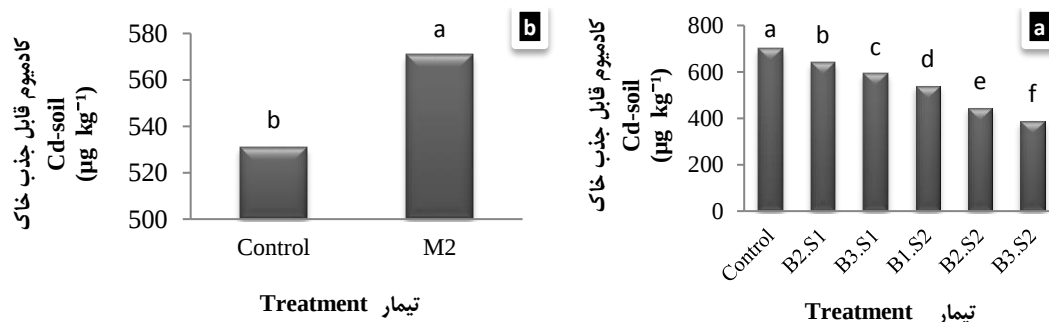
Control in figure a (No bacterial and no Na-EDTA), Control in figure b (No mycorrhizal), B1 (No bacteria), B2 (*Pantoea agglomerans* Bacteria), B3 (*Pseudomonas fluorescens* Bacteria), S1 (No Na-EDTA), S2 (With Na-EDTA), M2 (with mycorrhiza).



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر تیمار باکتری × EDTA و باکتری × میکوریزا بر غلظت کادمیوم در ریشه سورگوم علوفه‌ای در خاک آلوده به کادمیوم
 شکل a شاهد (بدون باکتری و بدون میکوریزا)، شکل b شاهد (بدون باکتری و بدون Na-EDTA)، B1 (بدون باکتری)، B2 (*Pantoea agglomerans* Bacteria)، B3 (*Pseudomonas fluorescens* Bacteria)، S1 (بدون Na-EDTA)، S2 (With Na-EDTA)، M1 (No mycorrhiza)، M2 (با میکوریزا)،
 سودوموناس فلورسنس)، S1، S2 (با Na-EDTA)، M1 (بدون میکوریزا)، M2 (با میکوریزا).

Figure 4- Comparison of the mean effect of bacterial treatment × Na-EDTA and bacterial treatment × mycorrhiza on cadmium concentration in the roots of *Sorghum bicolor* L. in cadmium-contaminated soil

Control in figure a (No bacterial and mycorrhiza), Control in figure b (Bacterial and no Na-EDTA), B1 (No bacteria), B2 (*Pantoea agglomerans* Bacteria), B3 (*Pseudomonas fluorescens* Bacteria), S1 (No Na-EDTA), S2 (With Na-EDTA), M1 (No mycorrhiza), M2 (with mycorrhiza).



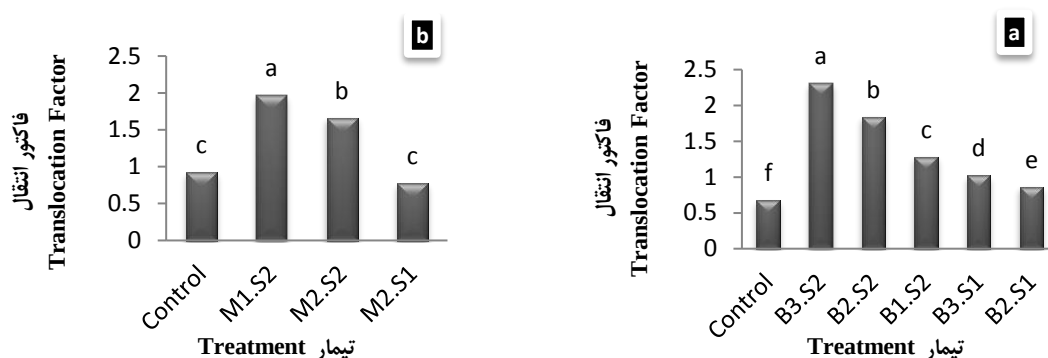
شکل ۵- مقایسه میانگین اثر تیمار باکتری × EDTA و میکوریزا بر غلظت کادمیوم قابل جذب در خاک آلوده به کادمیوم در سورگوم علوفه‌ای
 شکل a شاهد (بدون باکتری و بدون Na-EDTA)، شکل b شاهد (بدون میکوریزا)، B1 (بدون باکتری)، B2 (*Pantoea agglomerans* Bacteria)، B3 (*Pseudomonas fluorescens* Bacteria)، S1 (بدون Na-EDTA)، S2 (With Na-EDTA)، M1 (No mycorrhiza)، M2 (با میکوریزا)،
 فلورسنس)، S1، S2 (با Na-EDTA)، M1 (بدون میکوریزا)، M2 (با میکوریزا).

Figure 5- Comparison of the mean effects of treatments with bacteria, sodium EDTA, and mycorrhiza on the concentration of bioavailable cadmium in cadmium-contaminated soil for *Sorghum bicolor* L.

Control in figure a (No bacterial and no Na-EDTA), Control in figure b (No mycorrhizal), B1 (No bacteria), B2 (*Pantoea agglomerans* Bacteria), B3 (*Pseudomonas fluorescens* Bacteria), S1 (No Na-EDTA), S2 (With Na-EDTA), M1 (No mycorrhiza), M2 (with mycorrhiza).

بر اساس گزارش چن و همکاران (Chen et al., 2017) باکتری سودوموناس فلورسنس موجب افزایش جذب و تجمع کادمیوم در گیاه سدوم آلفردی^۱ می‌شود و همزمان رشد و بیوماس این گیاه را تحت تنش کادمیوم بهبود می‌بخشد، که می‌تواند به‌طور غیرمستقیم تحمل این گیاه در برابر تنش فلزات سنگین را افزایش دهد، در نتیجه کارایی گیاه پالایی بیشتر می‌شود. گونه‌های مختلف باکتری سودوموناس فلورسنس توانایی بالایی در تثبیت و کاهش کادمیوم در خاک دارند (Chellaiah, 2018) در مطالعه ای توسط فانگ و همکاران (Fang

et al., 2024) گزارش شده که کاربرد قارچ‌های میکوریزا به‌تنهایی به دلیل تغییر در ساختار ریز محیط ریشه، افزایش موقتی در دسترسی‌پذیری کادمیوم را ایجاد کرده است. در مطالعه دیگری نتایج نشان دادند که باکتری‌های فسفره همراه با کلاتور EDTA باعث کاهش قابل توجه کادمیوم در خاک و بهبود سلامت آفتابگردان شدند (Rauf et al., 2025).



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر تیمار باکتری EDTA× و مایکوریزا EDTA× بر فاکتور انتقال در سورگوم علوفه‌ای در خاک آلوده به کادمیوم
 شکل a شاهد (بدون باکتری و بدون EDTA)، شکل b شاهد (بدون مایکوریزا و بدون EDTA)، B1 (بدون باکتری)، B2 (باکتری پانتوئه آگلومرانس)، B3 (باکتری سودوموناس فلورسنس)، S1 (بدون EDTA)، S2 (با EDTA)، M1 (بدون مایکوریزا)، M2 (با مایکوریزا).

Figure 6- Comparison of the mean effects of combined treatments of bacteria with sodium EDTA and mycorrhiza with sodium EDTA on the translocation factor in *Sorghum bicolor* L. in cadmium-contaminated soil
 Control in figure a (No bacterial and no Na-EDTA), Control in figure b (No mycorrhizal and no Na-EDTA), B1 (No bacteria), B2 (*Pantoea agglomerans* Bacteria), B3 (*Pseudomonas fluorescens* Bacteria), S1 (No Na-EDTA), S2 (With Na-EDTA), M1 (No mycorrhiza), M2 (with mycorrhiza).

فاکتور انتقال

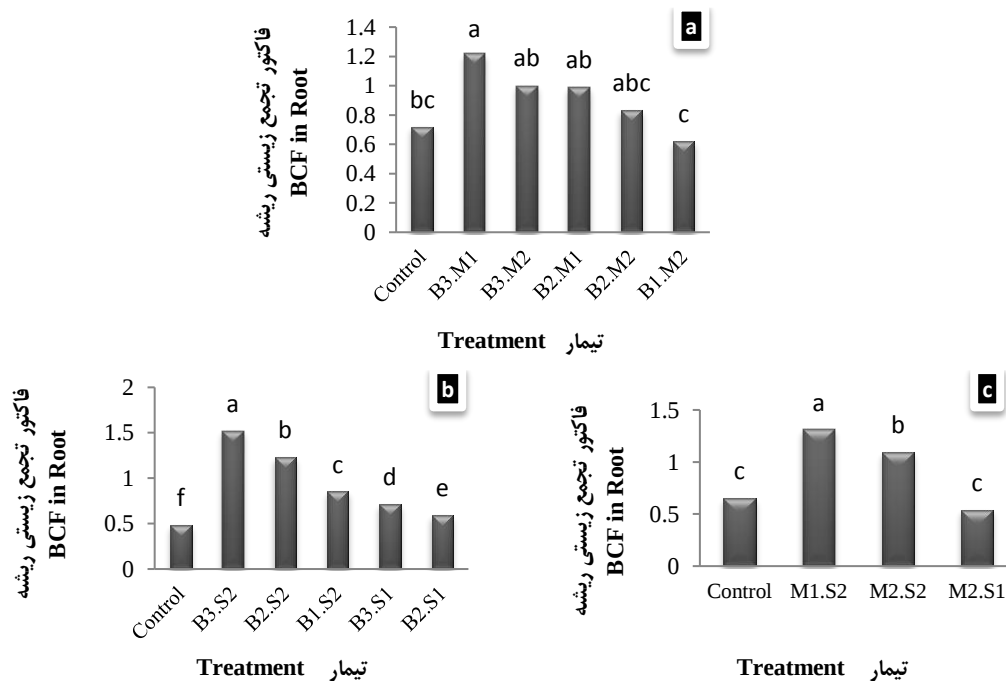
در اثر متقابل تیمار باکتری و EDTA، فاکتور انتقال در تیمار باکتری سودوموناس فلورسنس EDTA× ۲۴۴/۸ درصد بیشتر از شاهد (۰/۶۷) بود (شکل ۶ a). فاکتور انتقال در تیمار باکتری پانتوئه آگلومرانس EDTA× و تیمار بدون باکتری EDTA× به ترتیب ۱۷۴/۶ درصد و ۹۱ درصد بالاتر از شاهد (۰/۶۷) بودند، حضور همزمان سودوموناس فلورسنس و EDTA به شدت انتقال کادمیوم را از ریشه به بخش‌های هوایی افزایش داده و کارایی گیاه‌پالایی سورگوم را بهبود بخشید (شکل ۶ a). فاکتور انتقال در اثر متقابل مایکوریزا و EDTA در تیمار بدون مایکوریزا EDTA× بیشترین مقدار را در این برهم‌کنش نشان داد که ۱۱۴/۱ درصد بالاتر از شاهد (۰/۹۲) بود (شکل ۶ b). تیمار با مایکوریزا EDTA× نسبت به شاهد ۸۰/۴ درصد افزایش داشت. تیمار با مایکوریزا بدون EDTA کمترین مقدار را بدون اختلاف معنی دار با شاهد داشت (شکل ۶ b). این یافته‌ها حاکی از آن است که نقش اصلی در افزایش فاکتور انتقال، به EDTA مربوط می‌شود و اثر مایکوریزا در این میان، نسبتاً محدودتر است.

در واقع، افزایش فاکتور انتقال به بیش از سه برابر تیمار شاهد در تیمار سودوموناس فلورسنس EDTA× در (شکل ۶ a)، نشانگر عملکرد سینرژیک سودوموناس و EDTA در بهینه‌سازی مکانیسم انتقال فلزات سنگین است. در مطالعه‌ای بر روی گیاه خردل هندی نشان داده شد که کاربرد سودوموناس فلورسنس همراه با EDTA باعث افزایش فاکتور انتقال کادمیوم و بهبود کارایی پالایش فلزات سنگین گردید (Rajkumar et al., 2010). EDTA در ترکیب با باکتری‌های محرک

رشد در گیاه نازبو^۱ نقش مؤثری در افزایش انتقال کادمیوم به بخش هوایی داشت (Alamo-Nole & Estrella-Martinez, 2022). کاربرد سودوموناس و کلاتورها بر روی آفتابگردان منجر به افزایش معنی‌دار انتقال فلز از ریشه به ساقه می‌شود که این امر به دلیل افزایش تحرک فلز در خاک و افزایش فعالیت سیستم انتقال داخلی گیاه است (Randriamamonjy et al., 2021). فاکتور انتقال بیشتر از ۱ نشان‌دهنده توانایی گیاه تحت تیمار در انتقال مؤثر فلزات سنگین از خاک به اندام‌های هوایی و پتانسیل آن برای گیاه‌پالایی است، در حالی که مقداری کمتر از ۱ بیانگر محدودیت در انتقال فلز و عدم کارایی گیاه تحت آن تیمار برای فرآیند گیاه‌پالایی می‌باشد (Sharma et al., 2023).

فاکتور تجمع زیستی ریشه

در اثر متقابل باکتری و مایکوریزا بیشترین فاکتور تجمع زیستی ریشه در تیمار باکتری سودوموناس فلورسنس بدون مایکوریزا مشاهده شد که به طور معنی‌داری ۶۹/۴۴ درصد بالاتر از شاهد (۰/۷۲) بود. سایر تیمارها مانند تیمار باکتری سودوموناس فلورسنس مایکوریزا و تیمار باکتری پانتوئه آگلومرانس بدون مایکوریزا نیز بالاتر از شاهد بودند اما از لحاظ آماری در یک گروه قرار گرفتند، همچنین تیمار باکتری پانتوئه آگلومرانس مایکوریزا و تیمار بدون باکتری مایکوریزا نیز با شاهد اختلاف معنی‌داری نشان ندادند (شکل ۷ a)، کمترین مقدار فاکتور تجمع زیستی نیز در تیمار بدون باکتری مایکوریزا مشاهده شد.



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر تیمار باکتری×مایکوریزا، باکتری×EDTA و مایکوریزا×EDTA بر فاکتور تجمع زیستی ریشه در سورگوم علوفه‌ای در خاک آلوده به کادمیوم

شکل a شاهد (بدون باکتری و بدون مایکوریزا)، شکل b شاهد (بدون باکتری و بدون EDTA)، شکل c شاهد (بدون مایکوریزا و بدون EDTA)، B1 (بدون باکتری)، B2 (باکتری پانتوئا آگلومرانس)، B3 (باکتری سودوموناس فلورسینس)، S1 (بدون EDTA)، S2 (با EDTA)، M1 (بدون مایکوریزا)، M2 (با مایکوریزا).

Figure 7- Comparison of the mean effect of bacterial treatment × mycorrhiza, bacterial treatment × Na-EDTA, and mycorrhizal treatment × Na-EDTA on the root bioaccumulation factor in *Sorghum bicolor* L. in cadmium-contaminated soil. Control in figure a (No bacterial and no mycorrhiza), Control in figure b (No bacterial and no Na-EDTA), Control in figure c (No mycorrhizal and no Na-EDTA), B1 (No bacteria), B2 (*Pantoea agglomerans* Bacteria), B3 (*Pseudomonas fluorescens* Bacteria), S1 (No Na-EDTA), S2 (With Na-EDTA), M1 (No mycorrhiza), M2 (with mycorrhiza).

بخشید (Saini et al., 2024). در پژوهش حاضر در تیمار ترکیبی سودوموناس فلورسینس×EDTA، همزمان فاکتور تجمع زیستی ریشه و فاکتور انتقال به طور معنی‌داری افزایش یافتند؛ به گونه‌ای که تجمع کادمیوم در ریشه بیش از سه برابر و انتقال آن به اندام هوایی نیز بیش از سه برابر شاهد بود. یافته تحقیق حاضر با نتایج پژوهش‌های الحاجی و همکاران (Alhaj Hamoud et al., 2025) همسو است. به طور خاص این اثر هم‌افزایی ناشی از افزایش همزمان زیست‌فراهمی فلز و بهبود عملکرد سیستم ریشه‌ای است (Cao et al., 2025). تیمار EDTA همراه با مایکوریزا کاهش نسبی تجمع کادمیوم را نسبت به تیمار EDTA × بدون مایکوریزا نشان داد که می‌تواند به دلیل آثار بازدارنده و سمی EDTA بر رشد و کارایی قارچ‌های مایکوریزایی و همچنین اختلال در فرآیند هم‌زیستی در حضور غلظت‌های بالای کمپلکس کادمیوم-EDTA باشد (Zhao et al., 2024).

همچنین در اثر متقابل باکتری و EDTA بیشترین فاکتور تجمع زیستی ریشه در تیمار باکتری سودوموناس×با EDTA مشاهده شد که حدود ۳/۱ برابر یا ۲۱۶/۶۶ درصد نسبت به شاهد (۰/۴۸) افزایش نشان داد (شکل ۷، b). کمترین مقدار فاکتور تجمع زیستی ریشه نیز در شاهد مشاهده شد. همچنین در اثر متقابل مایکوریزا و EDTA بیشترین فاکتور تجمع زیستی ریشه مربوط به تیمار بدون مایکوریزا × EDTA بود که حدود ۱۰۱/۵۴ درصد نسبت به شاهد (۰/۶۵) افزایش نشان داد (شکل ۷، c). کمترین مقدار فاکتور تجمع زیستی نیز در تیمار مایکوریزا×بدون EDTA مشاهده شد.

این نتیجه نشان‌دهنده تأثیر مثبت EDTA بر افزایش جذب و تجمع کادمیوم در ریشه است. باکتری سودوموناس با تولید سیدروفورها و اسیدهای آلی، موجب افزایش جذب فلزات سنگین در ریشه می‌شود (Lozano-González et al., 2023). در تحقیقی روی گیاه ماش^۱ باکتری سودوموناس فلورسینس با افزایش انباشت فلزات در ریشه، از انتقال آن‌ها به اندام‌های هوایی جلوگیری کرده و تحمل گیاه را بهبود

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر غلظت کادمیوم و شاخص‌های گیاه پالایی سورگوم علوفه‌ای در خاک آلوده به کادمیوم
Table 4- Analysis of variance (ANOVA) of the effect of experimental treatments on cadmium concentration and phytoremediation indices of *Sorghum bicolor* L. in cadmium-contaminated soil

منابع تغییرات S.o.v	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean squares					شاخص تحمل Tolerance Index
		کادمیوم اندام هوایی Cd-aerial parts	کادمیوم ریشه Cd-root	کادمیوم خاک Cd-soil	فاکتور انتقال Translocation Factor	فاکتور تجمع زیستی ریشه Bioaccumulation factor in root	
باکتری Bacteria	2	43.52***	44165***	69093***	0.3375***	0.2079***	0.01472
مایکوریزا Mycorrhiza	1	19.48***	24752***	19200***	0.1167***	0.0806***	0.00118
EDTA Na-EDTA	1	304.51***	273914***	420376***	2.0980***	1.2162***	0.02105
باکتری×مایکوریزا Bacteria × Mycorrhiza	2	0.09	1776***	290	0.0000	0.0023**	0.00372
باکتری×EDTA Bacteria × Na-EDTA	2	0.55*	2590***	2103***	0.0397***	0.0274***	0.04705
مایکوریزا×EDTA Mycorrhiza × Na-EDTA	1	0.14	7	8	0.0034**	0.0023*	0.00008
باکتری×مایکوریزا×EDTA Bacteria × Mycorrhiza × Na- EDTA	2	0.14	79	204	0.0002	0.0003	0.00092
خطا Error	36	0.11	148	131	0.0004	0.0003	0.01568
ضریب تغییرات (%) (%) C.V		11.59	20.36	20.29	22.4	21.01	11.07

بدون علامت، *، ** و *** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵، ۱ و ۰/۰۱ درصد.

ns, *, ** and *** indicate non-significance and significance at the probability level of 5, 1 and 0.01%, respectively.

شاخص تحمل

هیچ‌یک از اثرات اصلی یا متقابل تیمارها بر شاخص تحمل معنی‌دار نبودند (جدول ۴). این یافته ممکن است ناشی از پایداری نسبی شاخص تحمل تحت شرایط مختلف تیماردهی باشد. همچنین می‌توان احتمال داد که شاخص تحمل در گیاه سورگوم بیش از آن که تحت تأثیر فاکتورهای خارجی قرار گیرد، به‌طور عمده تابع صفات ژنتیکی و سازوکارهای درونی آن در مقاومت به فلزات سنگین است. در مطالعه روی گیاه سویا^۱ نیز مشاهده شده که شاخص تحمل در برخی شرایط تنش، حساسیت کمتری نسبت به تیمارهای زیستی از خود نشان داد (Noor et al., 2024). همچنین، در مطالعه‌ای روی گیاه اسفناج^۲ گزارش شد که شاخص تحمل تنها در سطوح بالای کاربرد EDTA یا آلودگی شدید کادمیوم واکنش معنی‌دار نشان داده است (Javed et al., 2024). پیشنهاد می‌شود در مراحل بعدی، آزمایش‌هایی با سطوح

بالتر تنش یا مدت زمان طولانی‌تر اجرا گردد تا پاسخ‌های تأخیری یا تجمعی در شاخص تحمل بهتر آشکار گردد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که کاربرد ترکیبی باکتری‌های محرک رشد، به‌ویژه سودوموناس فلورسنس و EDTA، کارایی گیاه‌پالایی سورگوم علوفه‌ای را در خاک آلوده به کادمیوم به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد. این ترکیب نه تنها جذب و انتقال کادمیوم به اندام‌های هوایی و ریشه را تقویت کرد، بلکه غلظت کادمیوم قابل جذب خاک را به‌طور مؤثری کاهش داد. استفاده منفرد باکتری‌ها نیز مساحت برگ را بهبود بخشید که نشان‌دهنده تأثیر مثبت آن‌ها بر رشد و کارایی فتوسنتزی گیاه است. مایکوریزا نیز با تثبیت بخشی از کادمیوم در ریزوسفر و ساختارهای هیفی خود نقش مؤثری در کاهش انتقال فلز به اندام‌های هوایی داشت.

این یافته‌ها بر اهمیت استفاده هدفمند از تیمارهای زیستی و شیمیایی برای بهینه‌سازی فرآیند گیاه‌پالایی تأکید دارد. نتایج این مطالعه می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه پروتکل‌های عملی در پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مورد استفاده قرار گیرد و راهکارهای پایداری را برای مدیریت بوم‌سامانه‌های کشاورزی ارائه دهد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، اثرات طولانی‌مدت این تیمارها و سطوح مختلف آلودگی بررسی شود تا کارایی و پایداری این روش‌ها در شرایط واقعی مزرعه

تأیید گردد.

سپاسگزاری

از دانشگاه‌های لرستان، رازی و خوارزمی به‌دلیل تأمین امکانات و همکاری لازم جهت انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

References

1. Abou Jaoudé, R., Luziatelli, F., Ficca, A.G., & Ruzzi, M. (2024). A plant's perception of growth-promoting bacteria and their metabolites. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1332864. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1332864>
2. Akhgar, A., Ahmadiania, E., & Shirani, H. (2020). Effect of phosphate solubilizing fluorescent pseudomonads on cadmium uptake by corn in contaminated soil. *Journal of Soil Biology*, 8(1), 1-14. (In Persian). <https://sid.ir/paper/403640/en>
3. Al-Dokhi, O., Mukhtar, A., Al-Dosary, A., & Al-Sadoon, M.K. (2015). Ultrastructural differentiation of sperm tail region in *Diplometopon zarudnyi* (an amphisbaenian reptile). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(4), 448-454. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.05.002>
4. Alhaj Hamoud, Y., Shaghaleh, H., Saleem, M.H., Alshaharni, M.O., Alqurashi, M., Alhelaify, S.S., Alharthy, O.M., Fayad, E., & Rastogi, A. (2025). Eco-friendly role of *Serratia marcescens* and *Pseudomonas fluorescens* in enhancing rice growth and mitigating cadmium toxicity via uptake modulation and antioxidant regulation. *BMC Plant Biology*, 25, 718. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06693-6>
5. Alamo-Nole, L., & Estrella-Martinez, B. (2022). Phytoremediation of CdS/Te quantum dots by *Ocimum basilicum* in the presence of EDTA. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 20, 827-834. <https://doi.org/10.1007/s40201-022-00822-1>
6. Anwar, S., Shafaqat, A., Rizwan, M., Ali, S., Zia-ur-Rehman, M., Ibrahim, M., & Abbas, F. (2017). Impact of chelator-induced phytoextraction of cadmium on yield and ionic uptake of maize. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(6), 5521-5530. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8246-0>
7. Bashir, S., Javed, S., Al-Anazi, K. M., Farah, M.A., & Ali, S. (2022). Bioremediation of cadmium toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.) plants primed with L-proline, *Bacillus subtilis* and *Aspergillus niger*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12683. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912683>
8. Black, C.A. (Ed.). (1965). *Methods of soil analysis: Part 2*. Chemical and microbiological properties. Madison, WI: American Society of Agronomy.
9. Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
10. Cao, X., Dong, Q., Mao, L., Yang, X., Wang, X., & Zou, Q. (2025). Enhanced phytoextraction technologies for the sustainable remediation of cadmium-contaminated soil based on hyperaccumulators—a review. *Plants*, 14(1), 115. <https://doi.org/10.3390/plants14010115>
11. Chapman, H.D., & Kelley, W.P. (1930). The determination of the replaceable bases and the base-exchange capacity of soils. *Soil Science*, 30(5), 391-406. <https://doi.org/10.1097/00010694-193011000-00004>
12. Chellaiah, E.R. (2018). Cadmium (heavy metals) bioremediation by *Pseudomonas aeruginosa*: A minireview. *Applied Water Science*, 8, 154. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0796-5>
13. Chen, B., Luo, S., Wu, Y., Ye, J., Wang, Q., Xu, X., Pan, F., Khan, K.Y., Tian, X., Hu, Y., & Yang, X. (2017). The effects of the endophytic bacterium *Pseudomonas fluorescens* Sasm05 and IAA on the plant growth and cadmium uptake of *Sedum alfredii* Hance. *Frontiers in Microbiology*, 8, 2538. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02538>
14. Chen, Y., Yu, Y., Fang, X., Zhou, Y., & Lu, D. (2024). How *Pseudomonas nitroreducens* passivates cadmium to inhibit plant uptake. *Applied Sciences*, 14(7), 2857. <https://doi.org/10.3390/app14072857>
15. Chen, J., Guo, J., Li, Z., Liang, X., You, Y., Li, M., He, Y., & Zhan, F. (2022). Effects of an arbuscular mycorrhizal fungus on the growth of and cadmium uptake in maize grown on polluted wasteland, farmland and slopeland soils in a lead-zinc mining area. *Toxics*, 10(7), 359. <https://doi.org/10.3390/toxics10070359>
16. Chi, Y., Ma, X., Chu, S., You, Y., Chen, X., Wang, J., Wang, R., Zhang, X., Zhang, D., Zhao, T., Zhang, D., & Zhou, P. (2025). Nitrogen cycle induced by plant growth-promoting rhizobacteria drives “microbial partners” to enhance cadmium phytoremediation. *Microbiome*, 13, 113. <https://doi.org/10.1186/s40168-025-02113-x>
17. Chiranjeevi, M., Goudar, G.D., Krishnaraj, P.U., & Yalavarthi, N. (2024). Study on effect of plant growth promoting rhizobacteria on sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under gnotobiotic conditions. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1374802. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1374802>

18. Dhawi, F., Datta, R., & Ramakrishna, W. (2016). Mycorrhiza and heavy metal resistant bacteria enhance growth, nutrient uptake and alter metabolic profile of sorghum grown in marginal soil. *Chemosphere*, 157, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.112>
19. Fang, X., Lee, X., Twagirayezu, G., Cheng, H., Lu, H., Huang, S., Deng, L., & Ji, B. (2024). A critical review of the effectiveness of biochar coupled with arbuscular mycorrhizal fungi in soil cadmium immobilization. *Journal of Fungi*, 10(3), 182. <https://doi.org/10.3390/jof10030182>
20. Gouda, S., Kerry, R.G., Das, G., Paramithiotis, S., Shin, H.S., & Patra, J.K. (2018). Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture: A review. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1473. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.08.016>
21. Grembecka, M., & Szefer, P. (2013). Comparative assessment of essential and heavy metals in fruits from different geographical origins. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(11), 9139–9160. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3242-z>
22. 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. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111887. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887>
23. Javed, S., Anwaar, N., Zahoor, A.F., Haider, M.Z., Azeem, M., Gul, S., & Aftab, A. (2024). Cadmium stress mitigation in different cultivars of spinach (*Spinacia oleracea*) with foliar application of ascorbic acid. *Russian Journal of Plant Physiology*, 71, 40. <https://doi.org/10.1134/S1021443723603324>
24. Jia, W., Lv, S., Feng, J., Li, J., Li, Y., & Li, S. (2016). Morphophysiological characteristic analysis demonstrated the potential of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) in the phytoremediation of cadmium-contaminated soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(18), 18823–18831. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7083-5>
25. Kchikich, A., Amraoui, B.E., Nhhala, N., Krid, A., Kchikich, A., Kounnoun, A., El Khalloufi, F., El Khalloufi, A., & Nhiri, N. (2025). Mitigating heavy metals toxicity in sorghum using arbuscular mycorrhizal fungi: Enhancing photosynthesis and antioxidant defense. *Protoplasma*, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s00709-025-02095-5>
26. Kchikich, A., Roussi, Z., Krid, A., Nhhala, N., Ennoury, A., Benmrid, B., Kounnoun, A., El Maadoudi, M., Nhiri, N., & Mohamed, N. (2024). Effects of mycorrhizal symbiosis and *Ulva lactuca* seaweed extract on growth, carbon/nitrogen metabolism, and antioxidant response in cadmium-stressed sorghum plant. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 30(4), 605–618. <https://doi.org/10.1007/s12298-024-01446-5>
27. Kumar, A., Dadhwal, M., Mukherjee, G., Srivastava, A., Gupta, S., & Ahuja, V. (2024). Phytoremediation: Sustainable approach for heavy metal pollution. *Scientifica*, 2024(1), 3909400. <https://doi.org/10.1155/2024/3909400>
28. Lambert, R.J.W., Hanlon, G.W., & Denyer, S.P. (2004). The synergistic effect of EDTA/antimicrobial combinations on *Pseudomonas aeruginosa*. *Journal of Applied Microbiology*, 96(2), 244–253. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2004.02135.x>
29. Lozano-González, J.M., Valverde, S., Montoya, M., Martín, M., Rivilla, R., Lucena, J.J., & López-Rayó, S. (2023). Evaluation of siderophores generated by *Pseudomonas* bacteria and their possible application as Fe biofertilizers. *Plants*, 12(23), 4054.
30. Lindsay, W.L., & 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/sssaj1978.03615995004200030009x>
31. Liu, L., Li, J., Yue, F., Yan, X., Wang, F., Bloszies, S., & Wang, Y. (2018). Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation and biochar amendment on maize growth, cadmium uptake and soil cadmium speciation in Cd-contaminated soil. *Chemosphere*, 194, 495–503. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.025>
32. National Research Council, Committee on Long-Range Soil, & Water Conservation Policy. (1993). *Soil and water quality: An agenda for agriculture*. National Academies Press. <https://doi.org/10.2134/jeq1995.00472425002400020029x>
33. Noor, J., Ahmad, I., Ullah, A., Iqbal, B., Anwar, S., Jalal, A., Okla, M.K., Alaraidh, I.A., Abdelgawad, H., & Fahad, S. (2024). Enhancing saline stress tolerance in soybean seedlings through optimal $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratios: A coordinated regulation of ions, hormones, and antioxidant potential. *BMC Plant Biology*, 24, 572. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05294-z>
34. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1980). Total nitrogen analysis of soil and plant tissues. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 63(4), 770–778. <https://doi.org/10.1093/jaoac/63.4.770>
35. Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1982). Phosphorus. In A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties* (2nd ed., pp. 403–430). Madison, WI: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c24>
36. Prokop, Z., Cupr, P., & Zlevorova-Zlamalikova, V. (2003). Mobility, bioavailability, and toxic effects of cadmium in soil samples. *Environmental Research*, 91(2), 119–126. [https://doi.org/10.1016/s0013-9351\(02\)00012-9](https://doi.org/10.1016/s0013-9351(02)00012-9)
37. Qin, H., Wang, Z., Sha, W., Song, S., Qin, F., & Zhang, W. (2024). Role of plant-growth-promoting rhizobacteria in plant machinery for soil heavy metal detoxification. *Microorganisms*, 12(4), 700.

- <https://doi.org/10.3390/microorganisms12040700>
38. Rajkumar, M., Ae, N., Prasad, M.N.V., & Freitas, H. (2010). Potential of siderophore-producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(3), 503-510. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.12.002>
39. Randriamamonjy, S., Mouret, A., Metzger, E., Gaudin, P., La, C., Capioux, H., ... & Lebeau, T. (2021). 2D distribution of *Pseudomonas fluorescens* activities at the soil-root interface of sunflower grown on vineyard soils: Effects on copper uptake. *Soil Biology and Biochemistry*, 163, 108462. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108462>
40. Rauf, M., Naveed, M., Munir, M., Ghafoor, A., Sattar, M.N., Ali-Dinar, H., Mohamed, H.A., Bashir, M.A., Asif, M., & Mustafa, A. (2025). Revitalizing cadmium-stressed sunflower: Co-composted biochar improves growth, antioxidant responses, and soil remediation efficiency. *BMC Plant Biology*, 25, 875. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-07098-1>
41. Rizvi, A., Zaidi, A., Ameen, F., Ahmed, B., AlKahtani, M.D.F., & Khan, M.S. (2020). Heavy metal induced stress on wheat: phytotoxicity and microbiological management. *RSC Advances*, 10(64), 38379–38403. <https://doi.org/10.1039/D0RA05610C>
42. Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Ibrahim, M., Tsang, D.C., Zia-ur-Rehman, M., & Ok, Y.S. (2017). A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables. *Chemosphere*, 182, 90–105. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.013>
43. Saini, N., Singh, S., & Chowdhury, P. (2024). Enhancing *Vigna radiata* growth and reducing metal toxicity with *Pseudomonas* spp. in hydroponic systems. *Current World Environment*, 19(3), 1434–1446. <https://doi.org/10.12944/CWE.19.3.32>
44. Saleem, M., Naeem, A.H., Ahmad, Z.Z., & Muhammad, S. (2018). Impact of lead tolerant plant growth promoting rhizobacteria on growth, physiology, antioxidant activities, yield and lead content in sunflower in lead contaminated soil. *Environmental Pollution*, 242, 1268–1277. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.117>
45. Shahid, M., Austruy, A., Echevarria, G., Arshad, M., Sanaullah, M., Aslam, M., Nadeem, M., Nasim, W., & Dumat, C. (2014). EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metals: A Review. *Soil and Sediment Contamination*, 23(4), 389–416. <https://doi.org/10.1080/15320383.2014.831029>
46. Sharma, M., Sharma, S., Paavan, P., Gupta, M., Goyal, S., Talukder, D., Akhtar, M.S., Kumar, R., Umar, A., Alkhanjaf, A.A.M., & Baskoutas, S. (2024). Mechanisms of microbial resistance against cadmium—a review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 22(1), 13-30. <https://doi.org/10.1007/s40201-023-00887-6>
47. Sharma, J.K., Kumar, N., Singh, N.P., & Santal, A.R. (2023). Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1076876. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876>
48. Ullah, S., Ikram, M., Sarfaraz, S., ul Haq, I., Khan, A., Murad, Z., & Munsif, F. (2024). Influence of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on the growth and yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under salt stress. *Journal of Crop Health*, 76, 1221–1234. <https://doi.org/10.1007/s10343-024-01006-7>
49. U.S. Salinity Laboratory Staff. (1954). L.A. Richards (Ed.). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. USDA Handbook No. 60. U.S. Govt. Print. Office, Washington, DC. <https://doi.org/10.2134/agronj1954.00021962004600060019x>
50. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
51. Wilkins, D.A. (1978). The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth. *New Phytologist*, 80(3), 623–634. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1978.tb01595.x>
52. Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q., & Ma, L.Q. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of The Total Environment*, 368(2–3), 456–464. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.01.016>
53. Zayed, A., Gowthaman, S., & Terry, N. (1998). Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: I. Duckweed. *Journal of Environmental Quality*, 27(3), 715–721. <https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700030032x>
54. Zhang, P., Li, J., Li, T., Li, X., Lu, Y., & Wu, J. (2024). Transcriptome analysis of potassium-mediated cadmium accumulation in sweet sorghum. *Plant Physiology and Biochemistry*, 215, 109064. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.109064>
55. Zhao, S., Yan, L., Kamran, M., Liu, S., & Riaz, M. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi-assisted phytoremediation: A promising strategy for cadmium-contaminated soils. *Plants*, 13(23), 3289. <https://doi.org/10.3390/plants13233289>