



Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Symbiosis With Three Ornamental Plants on Lead Phytoremediation

Dahham Badri Abdulhadi Mohammed Al-Haidari¹, Elham Chavoshi^{1*} ,
Hussein Ghitheeth Abed Al-Challabi² and Jila Baharlouei¹

1- Department of Soil Science, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

2- Department of Soil Science, College of Agriculture, University of Kufa, Iraq

* Corresponding author, Email: e_chavoshi@iau.ac.ir

(Received: 5 April 2026; Revised: 22 June 2026; Accepted: 30 June 2026)

Abstract

Background and Objective: Due to the low cost in a long-term application and environmental friendliness, the use of biological remediation has gained significant attention in recent decades. This study aimed to investigate the use of ornamental plants and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) for phytoremediation of lead contaminated soil under greenhouse conditions.

Methods: The research was conducted as a factorial in a completely randomized design with three factors of plant type including gladiolus (*Gladiolus grandiflorus*), ornamental cabbage (*Brassica oleracea*), marigold (*Tagetes erecta*), lead concentration (0, 25, 50, 100 and 200 mg kg⁻¹) and fungus (with/without AMF) in three replications. Harvesting was carried out after the plants reached the flowering stage. The concentrations of lead in plant tissues and soil, uptake, bioaccumulation factor (BCF), transfer factor (TF) of lead and plant growth traits were measured.

Results: The Pb concentration in the root and shoot of ornamental plants increased significantly due to the increase in soil Pb concentration. The root Pb concentrations were about 2 to 4 times greater than its shoot concentrations (at different Pb levels). The TF values for Pb in all plants were less than one. The AMF inoculation significantly increased shoot and root dry weights of *G. grandiflorus* and *B. oleracea* under lead stress. Besides, the AMF inoculation significantly increased Pb concentration, uptake and root BCF_s of all three ornamental plants compared to non-inoculated treatments. The root BCF_s of all ornamental plants were greater than one, but no significant difference was observed across its values within the three plants.

Conclusion: Overall, the results showed that arbuscular mycorrhizal fungi modulate metal accumulation and physiological traits differently in the studied ornamental plants.

Keywords: Ornamental cabbage, Gladiolus, Bioaccumulation, Marigold.

How to Cite: Badri Abdulhadi Mohammed Al-Haidari, D., Chavoshi, E., Ghitheeth Abed Al-Challabi, H., Baharlouei, J., 2026. Role of arbuscular mycorrhizal fungi symbiosis with three ornamental plants on lead phytoremediation. J. Soil Plant Interact. 17(3), 55–73 (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jspi.17.3.08885>





نقش همزیستی قارچ میکوریز آربسکولار با سه گیاه زیتنی در گیاه پالایی سرب

دحام بدری عبدالهادی محمد الحیدری^۱، الهام چاوشی^{۱*}، حسین غنث عبد الکلاهی^۲ و ژیلای بهارلویی^۱

۱- گروه علوم خاک، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۲- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کوفه، عراق

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: e_chavoshi@iau.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۱/۱۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۴/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۹)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: استفاده از اصلاح‌کننده‌های بیولوژیک در دهه‌های اخیر با توجه به هزینه کم، در قالب یک برنامه درازمدت و سازگار با محیط زیست، توجه زیادی را به خود معطوف داشته است. این پژوهش با هدف بررسی استفاده از گیاهان زیتنی و قارچ میکوریز آربسکولار (AMF) برای گیاه پالایی خاک آلوده به سرب در شرایط گلخانه‌ای انجام شد.

روش‌ها: پژوهش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ فاکتور نوع گیاه شامل گلابول (*Gladiolus grandiflorus*)، کلم زیتنی (*Brassica oleracea*) و گل جعفری (*Tagetes erecta*)، غلظت سرب (۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) و قارچ (با/بدون AMF) در سه تکرار انجام شد. نشاءهای گلدانی کلم زیتنی، گل جعفری و گلابول در خاک آلوده به سرب کشت شده و پس از رسیدن به مرحله گل‌دهی، برداشت شده و مورد ارزیابی قرار گرفتند. غلظت سرب در بافت‌های گیاهی و خاک، میزان جذب، فاکتور تجمع زیستی (BCF)، فاکتور انتقال (TF) سرب و صفات رشدی گیاه اندازه‌گیری شد.

نتایج: با افزایش غلظت سرب در خاک، غلظت این عنصر در ریشه و شاخساره گیاهان زیتنی افزایش معنی‌داری یافت. غلظت سرب در ریشه حدود ۲ تا ۴ برابر غلظت آن در شاخساره گیاهان (در سطوح مختلف سرب) بود. مقادیر TF در همه گیاهان کوچک‌تر از یک شد. تلقیح AMF باعث افزایش معنی‌دار ماده خشک گیاهی در گلابول و کلم زیتنی تحت تنش سرب شد. همچنین تلقیح AMF سبب افزایش معنی‌دار غلظت، جذب و BCF سرب در ریشه هر سه گیاه زیتنی در مقایسه با تیمار بدون میکوریز شد. مقادیر BCF سرب در ریشه همه گیاهان زیتنی بزرگتر از یک بود اما تفاوت معنی‌داری بین مقادیر آن در سه گیاه مشاهده نشد.

نتیجه‌گیری کلی: به‌طورکلی نتایج نشان داد که قارچ میکوریز آربسکولار، تجمع فلز و صفات فیزیولوژیک را در گیاهان زیتنی مورد بررسی به‌طور متفاوتی تعدیل می‌کند.

واژه‌های کلیدی: کلم زیتنی، گلابول، تجمع زیستی، گل جعفری.



مقدمه

خاک به عنوان یکی از اجزای اساسی اکوسیستم، در معرض آلودگی ناشی از ورود آلاینده‌های آلی و معدنی قرار دارد. در میان آلاینده‌های معدنی، فلزات سنگین از جمله آرسنیک (As)، نیکل (Ni)، کروم (Cr) و سرب (Pb) به دلیل ماهیت غیرقابل تجزیه و ماندگاری زیاد، از آلاینده‌های مهم زیست‌محیطی محسوب می‌شوند (Nagajyoti et al., 2010). سرب، به واسطه کاربرد گسترده در فعالیت‌های معدنی، صنعتی و ذوب، از مهم‌ترین فلزات آلاینده خاک است و تجمع آن می‌تواند موجب اختلال در رشد و سوخت‌وساز گیاه، کاهش حاصلخیزی و فعالیت میکروبی خاک و در نهایت تهدید سلامت انسان و سایر جانداران شود. سطح آستانه سرب برای گیاهان تقریباً ۲ میلی‌گرم در کیلوگرم است، درحالی‌که برای خاک‌های کشاورزی، از ۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر است. افزایش غلظت سرب به بیش از حد بحرانی، فرآیندهای مختلف مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Kushwaha et al., 2018).

روش‌های فیزیکی و شیمیایی متداول، از جمله رقیق‌سازی و استخراج اسیدی، اگرچه در حذف فلزات سنگین مؤثرند، به دلیل هزینه و پیچیدگی زیاد، برای مقیاس‌های وسیع چندان مناسب نیستند (Cheng et al., 2015). همچنین جایگزینی خاک آلوده با خاک سالم، با وجود اثربخشی، نیازمند صرف زمان و هزینه قابل توجه است (Butcher, 2009). از این رو، توسعه روش‌های پایدار و کم‌هزینه برای پالایش خاک‌های آلوده به سرب ضروری است. در این میان، گیاه‌پالایی به عنوان یک فناوری سبز و مقرون به صرفه، از قابلیت گیاهان برای جذب، استخراج، تثبیت یا کاهش سمیت آلاینده‌ها در خاک بهره می‌گیرد (Wu et al., 2015; Sharma et al., 2023). با این حال، گنجایش جذب و تحمل فلزات سنگین در میان گونه‌های گیاهی متفاوت است و تنها تعداد محدودی از گونه‌ها قادر به تجمع مقادیر زیاد فلزات

در بافت‌های خود و حفظ رشد در شرایط آلودگی هستند (Mohammadipour et al., 2012).

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های گیاه‌پالایی، زمان زیاد مورد نیاز برای کاهش غلظت آلاینده تا سطوح قابل قبول است (Salehi et al., 2016). در این راستا، استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد، کودهای شیمیایی و ریزجانداران خاک، به ویژه قارچ‌های میکوریزی (اندومیکوریز و اکتومیکوریز)، به عنوان راهکارهایی برای افزایش کارایی گیاه‌پالایی مورد توجه قرار گرفته است (Mrnka et al., 2012). قارچ‌های میکوریزی با افزایش جذب عناصر غذایی، تغییر فراهمی زیستی فلزات، بهبود فرآیندهای فیزیولوژیک و تولید ترکیبات محرک رشد، می‌توانند تحمل گیاه را در برابر تنش‌های محیطی (خشکی، فلزات سنگین، بیماری‌ها، شوری و پاتوژن‌ها) افزایش داده و در نتیجه کارایی گیاه‌پالایی را بهبود بخشند (Karlinski et al., 2010; Gohre and Paszkowski, 2006).

قارچ‌های میکوریز آربسکولار (AMF) از مهم‌ترین همزیست‌های ریشه‌ای گیاهان هستند که با بخش عمده‌ای از گیاهان آوندی و گیاهان خشکی‌زی رابطه همزیستی برقرار می‌کنند (Samanta et al., 2025). این قارچ‌ها با تشکیل شبکه هیفی گسترده و تولید ترکیباتی مانند گلومالین، جذب آب و عناصر غذایی، رشد گیاه و بهبود ساختمان خاک را افزایش می‌دهند (Jahromi et al., 2008). همچنین، AMF می‌تواند با تقویت سامانه آنتی‌اکسیدانی گیاه، آثار مخرب گونه‌های فعال اکسیژن ناشی از تنش فلزات سنگین را کاهش دهد (Miransari et al., 2010). میزان این آثار تعدیل‌کننده به عواملی مانند نوع و غلظت فلز، گونه گیاهی و شرایط رشد وابسته است.

گیاه‌پالایی شامل سازوکارهای مختلفی از جمله استخراج گیاهی^۱، تجزیه گیاهی^۲ و سایر فرآیندهای مرتبط با جذب، تثبیت و کاهش سمیت آلاینده‌ها است (Mani and Kumar, 2014). در استخراج گیاهی، با استفاده از گیاهان به ویژه گیاهان

1- Phytoextraction

2- Phytodegradation

سنگین در مقایسه با کالانکوئه و بریوفیلوم نشان داد. گیاهان زینتی علاوه بر کاهش آلودگی خاک، کارکردهای اکوسیستمی متعددی ارائه داده، به حفظ تنوع زیستی کمک کرده و با افزودن ارزش زیبایی‌شناختی، محیط را زیبا می‌کنند (Deepika and Haritash, 2023). بنابراین، گیاهان زینتی به عنوان گزینه مناسبی برای کاهش آلودگی فلزات سنگین خاک قابل بررسی هستند. از این رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی پتانسیل گیاه‌پالایی سه گیاه زینتی گلابیول، گل جعفری و کلم زینتی با استفاده از AMF در غلظت‌های مختلف سرب در خاک انجام شد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و ویژگی‌های خاک و تیمارهای آزمایشی

خاک مورد نظر از لایه صفر تا ۲۰ سانتی‌متری زمین‌های کشاورزی شهر اصفهان برداشته شد و پس از هوا-خشک شدن، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. نمونه‌های خاک دست‌نخورده نیز، با استفاده از سلیندرهایی با قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر برداشته شد. در ادامه برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک شامل pH به وسیله دستگاه pH متر (متروهم ۸۲۷ کمپانی متروهم کشور سوئیس) در گل اشباع، رسانایی الکتریکی به وسیله EC متر (مدل ۷۱۲، کشور سوئیس) در عصاره گل اشباع، بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، میزان کربن آلی به روش تیتراسیون با محلول فروآمونوم سولفات (Walkley and Black, 1986)، میزان نیتروژن کل به روش کلدال (Bremner and Mulvaney, 1982)، پتاسیم قابل جذب به روش استات آمونیوم یک نرمال (Sadusky et al., 1987) و فسفر قابل جذب خاک به روش اولسن (Olsen and Sommers, 1982) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری چگالی ظاهری (BD) خاک، نمونه‌های دست‌نخورده درون آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت خشک شد و BD از نسبت جرم

بیش‌انباشتگر^۱، فلزات از خاک جذب شده و در زیست‌توده قابل برداشت تجمع می‌یابند؛ درحالی‌که تجزیه گیاهی عمدتاً از راه ترشحات ریشه و تحریک فعالیت ریزجانداران مرتبط با ریشه موجب افزایش معدنی‌شدن ترکیبات آلاینده می‌شود (Mani et al., 2015). با وجود گنجایش زیاد بیش‌انباشتگرها، سرعت رشد و بهره‌وری زیست‌توده بسیاری از این گونه‌ها محدود است؛ از این رو، استفاده از گیاهان زینتی به عنوان گزینه‌ای کاربردی و دارای قابلیت استفاده تجاری مورد توجه قرار گرفته است (Glinska et al., 2014). پژوهش‌های پیشین نیز بر توان گیاهان زینتی و نقش AMF در پالایش خاک‌های آلوده تأیید کرده‌اند. در همین زمینه Nasiri et al. (2023) در پژوهشی به بررسی اثر AMF بر پتانسیل گیاه‌پالایی تاج خروس و رزماری در خاک آلوده به سرب در ۶ سطح (صفر، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب) و دو سطح AMF (تلقیح و بدون تلقیح) پرداختند. نتایج این پژوهشگران نشان داد تیمار AMF غلظت سرب ریشه و شاخساره گیاه رزماری را در مقایسه با تیمار بدون قارچ، افزایش داد. بیشترین غلظت سرب شاخساره در گیاه رزماری تلقیح‌شده با قارچ میکوریز و کمترین غلظت سرب شاخساره در گیاه تاج خروس تلقیح‌نشده با میکوریز مشاهده شد. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت AMF در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده بود. در پژوهشی دیگر تلقیح AMF با ریشه گیاه زینتی *Elsholtzia splendens* از تیره نعنائیان، سبب افزایش دوره مدت گل‌دهی این گیاه در خاک آلوده به مس در مقایسه با تیمار بدون قارچ شد (Jin et al., 2015). Nedaee Ziabari et al. (2024) نیز توانایی گیاه‌پالایی سه گیاه زینتی کاکتوس (*Opuntia humifusa*)، کالانکوئه (*Kalanchoe blossfeldiana*) و بریوفیلوم (*Bryophyllum delagoensis*)، تحت تنش فلزات سنگین (نقره، کادمیوم، سرب و نیکل) را ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد بریوفیلوم مقاومت زیادی در برابر فلزات سنگین داشته و فلزات سنگین مورد بررسی تأثیر کمتری بر رشد این گیاه داشتند. در مقابل، کاکتوس پتانسیل بیشتری برای جذب فلزات

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی

Table 1. Some Physical and chemical properties of the studied soil

ویژگی (Property)	واحد (Unit)	مقدار	ویژگی (Property)	واحد (Unit)	مقدار
pH	-	7.72	رطوبت گنجایش مزرعه‌ای Field capacity (FC)	%w/w	20
رسانایی الکتریکی Electrical conductivity (EC)	dS m ⁻¹	1.65	کربن آلی Organic carbon (OC)	%	0.29
چگالی ظاهری Bulk density (ρ_b)	g cm ⁻³	1.4	پتاسیم قابل جذب Available K	mg kg ⁻¹	350
شن Sand	%	51	نیتروژن کل Total N	%	0.18
سیلت Silt	%	20	فسفر قابل جذب Available P	mg kg ⁻¹	12
رس Clay	%	29	سرب قابل جذب Available Pb	mg kg ⁻¹	1.3
بافت خاک Soil texture	-	Sandy clay loam			

شد. بنابراین در مجموع ۹۰ گلدان برای این طرح آزمایشی استفاده شد. ابتدا خاک در اتوکلاو با دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس به مدت ۴ ساعت استریل شد. سپس برای آلوده کردن خاک با سرب از نمک استات سرب استفاده شد. نمک استات سرب در آب مقطر حل شد و روی خاک اسپری شد و برای رسیدن به تعادل، دو هفته در رطوبت گنجایش مزرعه‌ای (FC) و دمای ۲۰±۵ سلسیوس نگهداری شد.

آماده‌سازی تیمارها و کشت گلدانی

بذرهای جعفری زینتی و کلم زینتی تولیدشده توسط شرکت Takii Seed هلندی و پدازه گلابول، در اواخر زمستان در گلدان کاشته شدند. پس از گذشت یک ماه از کاشت، گیاهچه‌ها پس از تشکیل ۲ تا ۳ برگ، به گلدان‌های پلاستیکی (قطر ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۲ سانتی‌متر) دارای خاک آلوده به سرب (۶ کیلوگرم خاک در هر گلدان) منتقل شدند. گلدان‌ها به دو دسته تقسیم شدند: یک دسته قارچ میکوریز به میزان ۱۰۰ گرم در زمان کاشت

آون-خشک به حجم کل خاک محاسبه شد (Klute, 1986). برای تعیین رطوبت گنجایش مزرعه‌ای (FC)، مکش ماتریک ۱۰۰ hPa در دستگاه صفحات فشاری بر نمونه‌های خاک دست‌نخورده اعمال شده و پس از رسیدن به تعادل، میانگین رطوبت وزنی نمونه‌های خاک در FC اندازه‌گیری شد (Klute, 1986).

برای اطمینان از نبود آلودگی خاک به سرب، میزان سرب کل خاک به‌وسیله دستگاه جذب اتمی مدل Perkin Elmer 3030 ساخت کشور آمریکا اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های خاک مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است.

این پژوهش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ فاکتور نوع گیاه، غلظت سرب و قارچ در ۳ تکرار در سال ۱۴۰۳ در گلخانه دانشگاه آزاد واحد اصفهان، با رطوبت نسبی ۶۰-۷۰ درصد و دمای ۲۵-۲۰ درجه سلسیوس انجام شد. گیاهان شامل گل جعفری، کلم زینتی و گلابول و غلظت سرب در ۵ سطح (۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) بود. دو سطح قارچ آربوسکولار میکوریز (تلقیح و بدون تلقیح) نیز اعمال

(۶۵٪) و اسید نیتریک (۷۰٪) با نسبت ۵:۱:۱ به آن افزوده شد و در دمای ۸۰ درجه سلسیوس تا شفاف شدن نمونه‌ها گرم شد. در ادامه نمونه‌ها با آب مقطر به حجم رسانده شد و با کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف گردید (Allen et al., 1986). سپس غلظت سرب در عصاره صاف شده توسط دستگاه جذب اتمی مدل Perkin Elmer 3030 ساخت کشور آمریکا اندازه‌گیری شد. غلظت کل سرب در خاک به روش Baker and Amacher (1982) و غلظت قابل جذب آن در خاک با استفاده از روش Lindsay and Norvell (1987) اندازه‌گیری شد.

مقدار جذب سرب زیست‌توده، فاکتور انتقال^۲ (TF) و فاکتور تجمع زیستی^۳ (BCF) با استفاده از روابط ۱ تا ۳ به‌دست آمد (Fitz and Wenzel, 2002):

$$(۱) \quad \text{غلظت سرب} \times \text{وزن زیست‌توده خشک} = \text{جذب سرب}$$

$$(۲) \quad TF = \frac{\text{غلظت سرب در شاخساره}}{\text{غلظت سرب در ریشه}}$$

$$(۳) \quad BCF = \frac{\text{غلظت سرب در ریشه یا شاخساره}}{\text{غلظت سرب در خاک}}$$

غلظت سرب در خاک، ریشه و شاخساره بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم، وزن زیست‌توده خشک بر حسب کیلوگرم در گلدان و جذب سرب بر حسب میلی‌گرم در گلدان است.

برای اندازه‌گیری درصد کلونیزاسیون ریشه از روش Kormanik and McGraw (1982) با استفاده از فوشین اسیدی^۴ استفاده شد. پس از جمع‌آوری داده‌ها، به‌منظور تجزیه آماری از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD (در سطح احتمال پنج درصد) و رسم نمودارها توسط نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) اثر نوع گیاه، میکوریز، غلظت سرب و برهم‌کنش آن‌ها بر ویژگی‌های مورد بررسی در جدول ۲

در اطراف ریشه گیاه افزوده شد و دسته دیگر تلقیح قارچ انجام نشد. گونه‌های قارچ میکوریز به‌کاررفته در این پژوهش از شرکت زیست‌فناور توران شاهرود تهیه شد. این قارچ‌ها به‌صورت خالص نبوده و به همراه خاک به بازار مصرف عرضه می‌شوند. براساس اعلام شرکت مذکور، خاک دارای هیف‌های قارچ میکوریز (۲۰ تا ۵۰ متر در هر گرم خاک) بود. همچنین، تعداد تقریبی اسپور قارچ در هر گرم خاک بین ۵۰ تا ۱۵۰ اسپور بود. طی دوره رشد، آبیاری گلدان‌ها با آب مقطر در حدود رطوبت FC انجام شد. برای این منظور گلدان‌ها در فاصله زمانی دو روز یک‌بار توزین شده و آب از دست‌رفته تا رسیدن وزن نهایی گلدان‌ها به حد FC به گلدان‌ها افزوده شد. یک ماه پس از کاشت گیاه، کودهای نیتروژن، پتاسیم و فسفر بر اساس توصیه کودی به‌میزان ۶۶ گرم کود اوره، ۴۹ گرم سولفات پتاسیم و ۳۵ گرم سوپر فسفات ساده به خاک هر گلدان افزوده شد. لازم به توضیح است که به‌منظور جلوگیری از کاهش عملکرد قارچ میکوریز، مقدار کود توصیه‌شده برای فسفر (یعنی ۷۰ گرم سوپر فسفات ساده به خاک هر گلدان) نصف شد.

پس از رسیدن گیاهان به مرحله گل‌دهی (برای کلم زینتی، گل جعفری و گلایل به‌ترتیب برابر ۱۱۰، ۱۱۷ و ۱۲۰ روز پس از کاشت)، عملیات برداشت انجام شد و ارتفاع گیاهان با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شد. میزان کلروفیل برگ نیز با استفاده از روش Arnon (1949) اندازه‌گیری شد. سپس شاخساره و ریشه جدا شده، با آب مقطر شسته شده، به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۵ درجه سلسیوس در آون خشک شده و وزن خشک نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. برای شستشوی ریشه از محلول ۰/۰۱ درصد کالگون و دستگاه اولتراسوند^۱ استفاده گردیده تا تمام ذرات خاک از ریشه جدا گردد. ریشه و شاخساره خشک‌شده گیاهان، با آسیاب برقی پودر شد. یک گرم از نمونه پودر شده توزین شده و در بالن ژوژه ۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد. سپس ۱۵ میلی‌لیتر از مخلوط اسیدها شامل اسید سولفویک (۶۵٪)، اسید پرکلریک

3- Bioconcentration factor
4- Acid Fuchsin

1- Ultrasound
2- Translocation factor

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثر نوع گیاه، میکوریز، سرب و برهم‌کنش آن‌ها بر ویژگی‌های خاک و گیاه

Table 2. Results of variance analysis of the effect of plant species, mycorrhiza, lead and their interactions on soil and plant characteristics

میانگین مربعات (Mean squares)							درجه آزادی	منبع تغییر
وزن خشک		کلونیزاسیون قارچ	غلظت سرب قابل جذب خاک	غلظت سرب				
ریشه	شاخساره			خاک	ریشه	شاخساره		
Dry weight		Root fungal colonization	Soil available Pb concentration	Pb concentration			df	Source of variation
Root	Shoot	Root		Soil	Root	Shoot		
1186**	6553**	18.3 ^{ns}	8.6 ^{ns}	2.1 ^{ns}	122.99 ^{ns}	83.6**	2	گیاه (Plant)
12.9**	51.1**	558.7**	71676**	101523**	78974.14**	24180**	4	سرب (Lead)
474.3**	789.1**	85133.2**	6760**	711.2**	976.65 ^{ns}	427.8**	1	میکوریز (Mycorrhiza)
32.8**	177.1**	199.4**	4.8 ^{ns}	6.1 ^{ns}	81.97 ^{ns}	15.5 ^{ns}	8	گیاه × سرب (Plant × Lead)
1.7 ^{ns}	56.3**	307.4**	1770.5**	79.7**	1211.30**	22.5 ^{ns}	4	میکوریز × سرب (Mycorrhiza × Lead)
163.6**	159.7**	205.8**	0.4 ^{ns}	2.0 ^{ns}	98.54 ^{ns}	741.1**	2	گیاه × میکوریز (Mycorrhiza × Plant)
1.9**	13.2**	427.5**	1.5 ^{ns}	4.2 ^{ns}	462.21 ^{ns}	145.2**	8	گیاه × میکوریز × سرب (Plant × Mycorrhiza ×)
2.2	3.8	15.6	4.6	3.1	287.82	16.0	60	(Lead خطا (Error)
12.49	5.93	7.46	3.70	2.58	21.43	11.02		ضریب تغییرات (Coefficient of) (variation, CV

^{ns}, * و ** به ترتیب اثر غیرمعنی دار، و آثار معنی دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد را نشان می‌دهند.

^{ns}, * and ** indicate non-significant effect, and significant effects at 5 and 1 percent probability levels, respectively.

ارائه شده است. همانگونه که در جدول مشاهده می‌شود آثار ساده نوع گیاه بر غلظت سرب در شاخساره، وزن خشک ریشه و شاخساره، میزان کلروفیل کل، جذب سرب در ریشه و شاخساره در سطح یک درصد معنی دار بود، اما اثر آن‌ها بر سایر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده، معنی دار نبود. اثر ساده غلظت سرب نیز بر همه ویژگی‌های مورد بررسی (به جز ارتفاع ساقه) در سطح یک درصد معنی دار بود. آثار ساده همزیستی میکوریز بر برخی ویژگی‌های مورد بررسی (به جز غلظت سرب در ریشه، ارتفاع ساقه، BCF

شاخساره و فاکتور انتقال یا TF) در سطح یک درصد معنی دار بود.

آثار ساده گیاه، میکوریز و غلظت سرب بر ویژگی‌های خاک و گیاه

مقایسه میانگین آثار ساده نوع گیاه، قارچ و غلظت سرب بر ویژگی‌های گیاهی در جدول ۳ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش سطح آلودگی، غلظت کل و قابل

ادامه جدول ۲.

Table 2. Continued

(Mean squares) میانگین مربعات							درجه آزادی	منبع تغییر
فاکتور انتقال	فاکتور تجمع زیستی (BCF)	جذب شاخساره	جذب ریشه	کلروفیل کل	ارتفاع ساقه	فاکتور انتقال		
Transfer factor (TF)	شاخساره Shoot	ریشه Root	Shoot uptake	Root uptake	Total chlorophyll	Stem height	df	Source of variation
0.24 ^{ns}	0.02 *	0.05 ^{ns}	13.44**	6.33**	0.56**	266673.1 ^{ns}	2	گیاه (Plant)
2.1**	1.07**	12.00**	31.06**	10.43**	0.33**	232433 ^{ns}	4	سرب (Lead)
0.36 ^{ns}	0.008 ^{ns}	6.13 **	1.42**	4.42**	14.88**	208095 ^{ns}	1	میکوریز (Mycorrhiza)
0.17 ^{ns}	0.008 ^{ns}	0.07 *	3.52**	0.87**	0.45**	228640.1 ^{ns}	8	گیاه × سرب (Plant × Lead)
0.05 ^{ns}	0.003 ^{ns}	2.55 **	0.75**	0.39**	0.20**	228885.7 ^{ns}	4	میکوریز × سرب (Mycorrhiza × Lead)
0.05 ^{ns}	0.2 **	0.01 ^{ns}	1.75 **	1.11**	3.64**	238723.1 ^{ns}	2	گیاه × میکوریز (Mycorrhiza × Plant)
0.27 ^{ns}	0.04**	0.03 ^{ns}	0.3 **	0.13*	0.12**	227564.6 ^{ns}	8	گیاه × میکوریز × سرب (Plant × Mycorrhiza × Lead)
0.20	0.006	0.03	0.02	0.05	0.04	228026.6	60	خطا (Error)
78.01	17.65	14.48	11.05	24.28	10.29	3.48		ضریب تغییرات (Coefficient of variation, CV)

ns, * و ** به ترتیب اثر غیرمعنی دار، و آثار معنی دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد را نشان می‌دهند.

ns, * and ** indicate non-significant effect, and significant effects at 5 and 1 percent probability levels, respectively.

غلظت این عنصر در خاک، افزایش معنی داری یافت (جدول ۳). از طرف دیگر مشاهده شد که همزیستی میکوریز، سبب افزایش معنی دار غلظت و جذب سرب در ریشه و کاهش معنی دار غلظت و جذب سرب در شاخساره گیاهان در مقایسه با تیمار بدون میکوریز شد. بیشترین جذب سرب در ریشه و شاخساره، به ترتیب مربوط به گل جعفری و کلم زیتنی بود (جدول ۳).

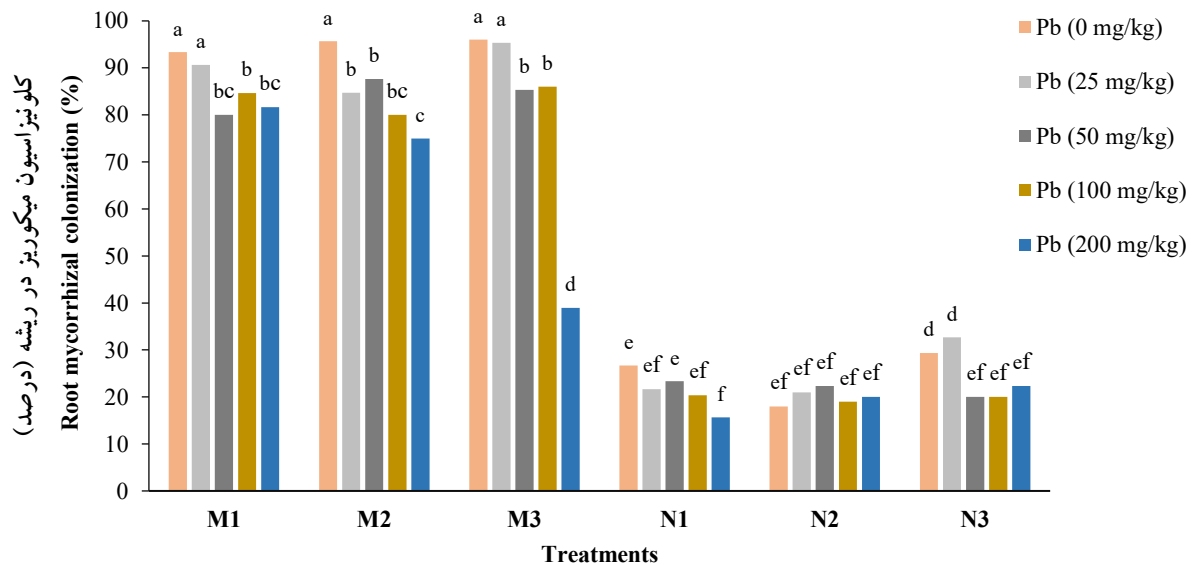
فاکتور انتقال (TF) بیانگر انتقال فلز از ریشه به شاخساره گیاه و فاکتور تجمع زیستی (BCF) بیانگر انتقال فلز از خاک به گیاه است. در بررسی اثر ساده گیاه مشاهده شد مقادیر BCF در

جذب سرب در خاک افزایش معنی داری یافته و در نتیجه غلظت این عنصر در گیاهان افزایش معنی داری را نشان می‌دهد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد تغییرات غلظت سرب در ریشه و شاخساره تحت تأثیر غلظت آن در خاک بوده و با افزایش غلظت سرب در خاک، غلظت آن در ریشه و شاخساره گیاهان افزایش معنی داری یافته است. بیشترین غلظت سرب در ریشه و شاخساره گیاهان به ترتیب ۱۷۷/۹۴ و ۹۳/۱۱ میلی گرم در کیلوگرم بود که در تیمار ۲۰۰ میلی گرم در کیلوگرم سرب مشاهده شد. جذب سرب نیز در هر دو بخش گیاه با افزایش

جدول ۳. مقايسه ميانگين آثار ساده نوع گياه، قارچ و غلظت سرب بر ويژگي هاي مطالعه شده

Table 3. Mean comparisons of simple effects of plant, mycorrhiza and lead on some studied properties										
غلظت سرب قابل جذب در خاک	غلظت سرب در خاک	فاکتور تجمع زیستی شاخساره	فاکتور تجمع زیستی ریشه	فاکتور انتقال Translocation factor (TF)	جذب سرب در شاخساره	غلظت سرب در شاخساره	جذب سرب در ریشه	غلظت سرب در ریشه	غلظت سرب در ریشه	تیمارها (Treatments)
Available Pb in soil (mg kg ⁻¹)	Pb concentration in soil (mg kg ⁻¹)	Shoot bioconcentration factor (shoot BCF)	Root bioconcentration factor (root BCF)		Pb uptake in shoot (mg kg ⁻¹)	Pb concentration in shoot (mg kg ⁻¹)	Pb uptake in root (mg pot ⁻¹)	Pb concentration in root (mg kg ⁻¹)	Pb concentration in root (mg kg ⁻¹)	
58.57 a	68 a	0.40 a	1.23 a	0.50 a	1.33 b	34.33 b	1.21 a	81.11 a	گل جعفری (Marigold)	
57.57 a	68.53 a	0.44 a	1.16 a	0.67 a	1.85 a	37.25 a	0.39 b	77.06 a	گیاه کلم زینتی (Ornamental cabbage)	
58.40 a	68.23 a	0.45 a	1.17 a	0.56 a	0.52 c	37.20 a	1.17 a	79.24 a	گلادیول (Gladiolus)	
49.51 b	65.44 b	0.42 a	1.45 a	0.51 a	1.10 b	34.80 b	1.15 a	82.42 a	با میکوریز (Mycorrhiza)	
66.84 a	71.07 a	0.44 a	0.92 b	0.64 a	1.36 a	38.44 a	0.7 b	75.85 b	بدون میکوریز (Non-Mycorrhiza)	
0.0 e	0.0 e	-	-	-	-	-	-	-	0	
17.50 d	18.83 d	0.57 a	2.05 a	0.34 b	0.33 d	10.85 d	0.44 d	35.89 d	سرب (Pb)	
38.44 c	44.28 c	0.53 ab	1.85 b	0.31 b	0.74 c	23.34 c	0.93 c	80.72 c	50 (mg kg ⁻¹)	
75.83 b	89.83 b	a 0.57	1.08 c	0.54 a	1.67 b	51.05 b	1.12 b	96.83 b	100	
159.11 a	188.33 a	0.49 b	0.94 d	0.54 a	3.32 a	93.11 a	2.06 a	177.94 a	200	

در هر ستون و هر گروه، ميانگين هاي داراي حروف مشابه در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معني داري ندارند (براساس آزمون LSD).
In each column and each group, means with the same letters are not significantly different at the 5% probability level (LSD test).



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر برهم کنش گیاه، میکوریز و سرب بر درصد کلونیزاسیون میکوریز در ریشه؛ ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی داری ندارند (M1: میکوریز-گل جعفری، M2: میکوریز-کلم زیتنی، M3: میکوریز-گلایول، N1: بدون میکوریز-گل جعفری، N2: بدون میکوریز-کلم زیتنی، N3: بدون میکوریز-گلایول).

Fig. 1. Mean comparisons of interaction effect of plant, mycorrhiza and lead on root mycorrhizal colonization percentage; bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$); M1: Mycorrhiza-Marigold, M2: Mycorrhiza-Ornamental cabbage, M3: Mycorrhiza-Gladiolus, N1: Non-Mycorrhiza-Marigold, N2: Non-Mycorrhiza-Ornamental cabbage, N3: Non-Mycorrhiza-Gladiolus)

آثار برهمکنش گیاه، میکوریز و غلظت سرب بر ویژگی‌های خاک و گیاه

نتایج مقایسه میانگین آثار برهم کنش گیاه، میکوریز و غلظت سرب بر اساس آزمون LSD (سطح احتمال پنج درصد)، نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی دار بین مقادیر برخی ویژگی‌های مورد بررسی در تیمارهای مختلف بود (جدول ۱). مقایسه میانگین آثار برهم کنش گیاه، میکوریز و سرب بر درصد کلونیزاسیون قارچ در ریشه بر اساس آزمون LSD (سطح احتمال پنج درصد)، نشان‌دهنده افزایش معنی دار درصد کلونیزاسیون قارچ در ریشه هر سه گیاه گل جعفری، گلایول و کلم زیتنی، در مقایسه با تیمارهای بدون همزیستی میکوریز بود (شکل ۱). از طرف دیگر مشاهده شد که با افزایش غلظت سرب از صفر به ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، درصد کلونیزاسیون قارچ در ریشه هر سه گیاه کاهش معنی داری یافت. میزان کاهش درصد کلونیزاسیون قارچ با افزایش غلظت سرب از صفر به ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، در گل جعفری به ترتیب ۲/۸، ۱۴/۳، ۹/۳

هر دو بخش (ریشه و شاخساره) در گیاهان مختلف تفاوت معنی دار نداشتند. همزیستی میکوریز نیز بر BCF شاخساره در مقایسه با تیمار بدون همزیستی، اثر معنی داری نداشت؛ در مقابل BCF ریشه در اثر همزیستی میکوریز افزایش معنی داری در مقایسه با تیمار بدون همزیستی نشان داد. از طرف دیگر با افزایش سطح سرب در خاک، کاهش معنی دار مقادیر BCF در هر دو بخش ریشه و شاخساره مشاهده شد، به طوری که کمترین مقادیر BCF ریشه (۰/۹۴) و شاخساره (۰/۴۹) در غلظت ۲۰۰ میلی گرم در کیلوگرم سرب در خاک، ثبت شد (جدول ۳). مقادیر TF در هر سه گیاه گل جعفری، کلم زیتنی و گلایول کوچکتر از یک بوده و تفاوت معنی داری (سطح احتمال پنج درصد) با یکدیگر نداشتند. همزیستی قارچ میکوریز نیز اثر معنی داری بر TF نداشت. در مقابل، مقادیر TF با افزایش غلظت سرب در خاک، افزایش معنی داری یافت و از ۰/۳۱ در تیمار ۵۰ میلی گرم در کیلوگرم سرب خاک، به ۰/۵۴ در تیمار ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم سرب رسید (جدول ۳).

و ۱۲/۵ درصد، در کلم زینتی به ترتیب ۸/۴، ۱۶/۴ و ۲۱/۶ و در گلابول به ترتیب ۵/۷، ۱۱/۱، ۱۰/۴ و ۵۹/۳ درصد بود (شکل ۱).

مقادیر وزن خشک ریشه و شاخساره در تیمارهای مختلف قارچ و سرب تفاوت معنی داری (سطح احتمال پنج درصد) داشتند. در گیاه گلابول، همزیستی قارچ میکوریز سبب افزایش معنی دار وزن خشک ریشه و شاخساره در مقایسه با تیمار بدون همزیستی شد. از طرف دیگر بیشترین وزن خشک ریشه و شاخساره گلابول مربوط به تیمار شاهد بود و با افزایش غلظت سرب، کاهش معنی داری در وزن خشک ریشه و شاخساره مشاهده شد، هرچند میزان این کاهش در ریشه و شاخساره به- ترتیب در غلظت‌های بیشتر از ۵۰ و ۲۵ میلی گرم در کیلوگرم سرب، معنی دار نبود (شکل ۱).

در گیاه کلم زینتی نیز همزیستی قارچ میکوریز سبب افزایش معنی دار وزن خشک ریشه و شاخساره در مقایسه با تیمار بدون همزیستی شد، اما وزن خشک ریشه در غلظت‌های مختلف سرب تفاوت معنی دار داشتند. در مقابل وزن خشک شاخساره کلم زینتی، با افزایش غلظت سرب از صفر به ۲۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، کاهش معنی داری نشان داد. در گل جعفری اگرچه وزن خشک شاخساره با افزایش غلظت سرب، کاهش معنی داری یافت، اما تفاوت معنی داری بین مقادیر وزن خشک ریشه در غلظت‌های مختلف سرب مشاهده نشد. همچنین در این گیاه، همزیستی میکوریز تفاوت معنی داری در وزن خشک ریشه و شاخساره در غلظت‌های مختلف سرب، ایجاد نکرد (شکل ۲).

بررسی اثر برهم کنش گیاه، میکوریز و سرب بر غلظت کلروفیل کل نیز نشان دهنده وجود تفاوت معنی دار (سطح احتمال پنج درصد) بین مقادیر این ویژگی در تیمارهای مختلف بود (شکل ۳). همزیستی میکوریز با ریشه هر سه گیاه گل جعفری، کلم زینتی و گلابول سبب افزایش معنی دار غلظت کلروفیل کل در مقایسه با تیمارهای بدون میکوریز شد (شکل ۳). از طرف دیگر با افزایش غلظت سرب از صفر به ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، غلظت کلروفیل در تمام تیمارها کاهش

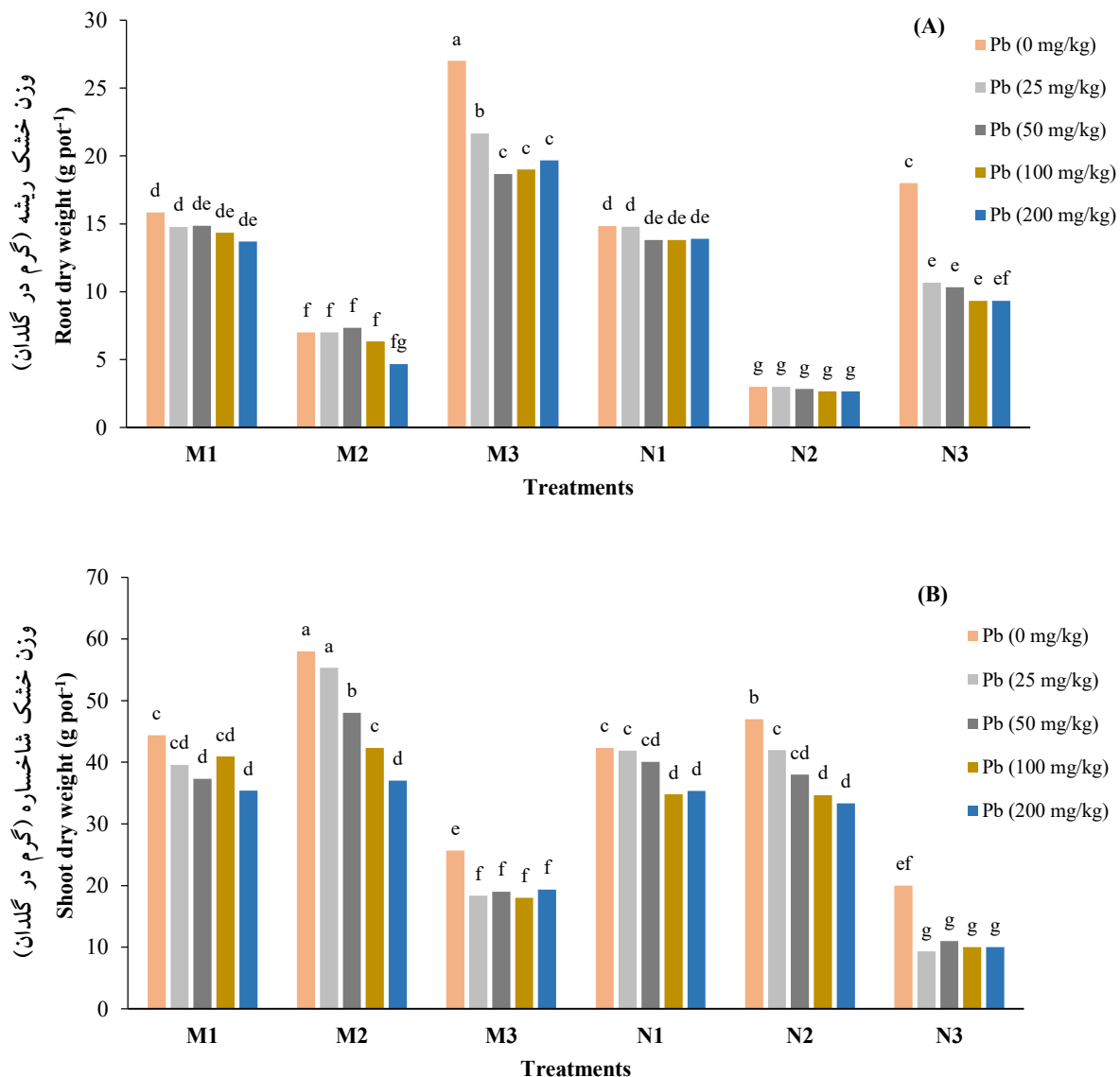
معنی داری یافت. بیشترین غلظت کلروفیل در تیمارهای شاهد گل جعفری و کلم زینتی و کمترین غلظت کلروفیل در تیمارهای مربوط به غلظت ۲۰۰ میلی گرم در کیلوگرم مشاهده شد.

بررسی آثار برهم کنش گیاه، میکوریز و سرب بر میانگین غلظت و جذب سرب در شاخساره و جذب سرب در ریشه گیاه، نشان داد با افزایش سطح سرب خاک از صفر به ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، غلظت سرب در شاخساره و جذب آن در شاخساره و ریشه هر سه گیاه کلم زینتی، گل جعفری و گلابول افزایش معنی داری (سطح احتمال پنج درصد) یافته است (شکل ۴). در گلابول و گل جعفری، همزیستی میکوریز سبب کاهش معنی دار غلظت و جذب سرب در شاخساره، در مقایسه با شرایط بدون همزیستی میکوریز شد، در مقابل در کلم زینتی، همزیستی میکوریز اثر معنی داری بر غلظت و جذب سرب در شاخساره نداشت. از طرف دیگر همزیستی میکوریز، سبب افزایش معنی دار جذب سرب در ریشه هر سه گیاه در مقایسه با تیمار بدون همزیستی شد (شکل ۴-ج).

بررسی اثر برهم کنش گیاه، میکوریز و سرب بر BCF سرب در شاخساره نیز نشان دهنده وجود تفاوت معنی دار (سطح احتمال پنج درصد) بین مقادیر این ویژگی در تیمارهای مختلف بود (جدول ۴). همزیستی میکوریز با ریشه گیاهان گل جعفری و گلابول باعث کاهش BCF سرب در شاخساره آن‌ها شده است. در مقابل همزیستی میکوریز با ریشه کلم زینتی، افزایش معنی دار BCF سرب در شاخساره را به همراه داشته است (جدول ۴).

بحث

توان جذب و انتقال عناصر سنگین در گونه‌های مختلف گیاهی، به دلیل تنوع ژنتیکی آن‌ها، متفاوت است. علاوه بر گونه گیاهی، مدت زمان قرارگیری گیاه در معرض فلزات سنگین نیز بر غلظت آلاینده‌ها در گیاه مؤثر بوده و در نتیجه بر فاکتور انتقال گیاهی این فلزات اثر می‌گذارد (Peris et al., 2007). در این پژوهش نیز تفاوت بین گیاهان در تجمع سرب، در دو بخش ریشه (بیشترین جذب سرب در ریشه گل جعفری با ۱/۲۱ میلی گرم در گلدان و

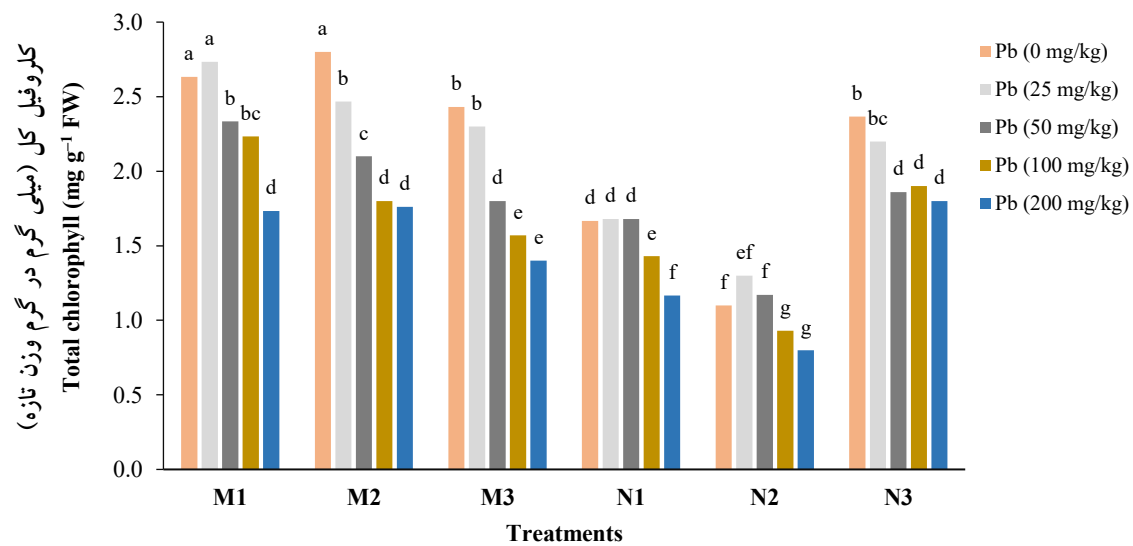


شکل ۲. مقایسه میانگین آثار برهم‌کنش گیاه، میکوریز و سرب بر وزن خشک ریشه (A) و شاخساره (B)؛ ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند (M1: میکوریز-گل جعفری، M2: میکوریز-کلم زیتنی، M3: میکوریز-گلایول، N1: بدون میکوریز-گل جعفری، N2: بدون میکوریز-کلم زیتنی، N3: بدون میکوریز-گلایول).

Fig. 2. Mean comparisons of interaction effects of plant, mycorrhiza and lead on dry weights of root (A) and shoot (B); Bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$); (M1: Mycorrhiza-Marigold, M2: Mycorrhiza-Ornamental cabbage, M3: Mycorrhiza-Gladiolus, N1: Non-Mycorrhiza-Marigold, N2: Non-Mycorrhiza-Ornamental cabbage, N3: Non-Mycorrhiza-Gladiolus).

در خاک، از وجود یک رابطه مستقیم میان بار آلودگی خاک و ورود سرب به گیاه حکایت دارد؛ با این حال، تفاوت الگوی تجمع بین ریشه و شاخساره نشان می‌دهد که جذب سرب لزوماً به انتقال مؤثر آن به شاخساره منجر نمی‌شود. این یافته با نتایج پژوهش Asadi Kapourchal (2021) همخوانی دارد که در آن با

گلایول با ۱/۱۷ میلی گرم در گلدان و شاخساره (بیشترین جذب سرب در شاخساره کلم زیتنی با ۱/۸۵ میلی گرم در گلدان)، نشان‌دهنده آن است که پاسخ گیاه به سرب صرفاً تابع مقدار فلز موجود در خاک نیست، بلکه به نوع گیاه نیز وابسته است. افزایش غلظت سرب در بافت‌های گیاهی در پاسخ به افزایش غلظت آن



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش گیاه، میکوریز و سرب بر میزان کلروفیل کل برگ؛ ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند (M1: میکوریز-گل جعفری، M2: میکوریز-کلم زیتنی، M3: میکوریز-گلایول، N1: بدون میکوریز-گل جعفری، N2: بدون میکوریز-کلم زیتنی، N3: بدون میکوریز-گلایول).

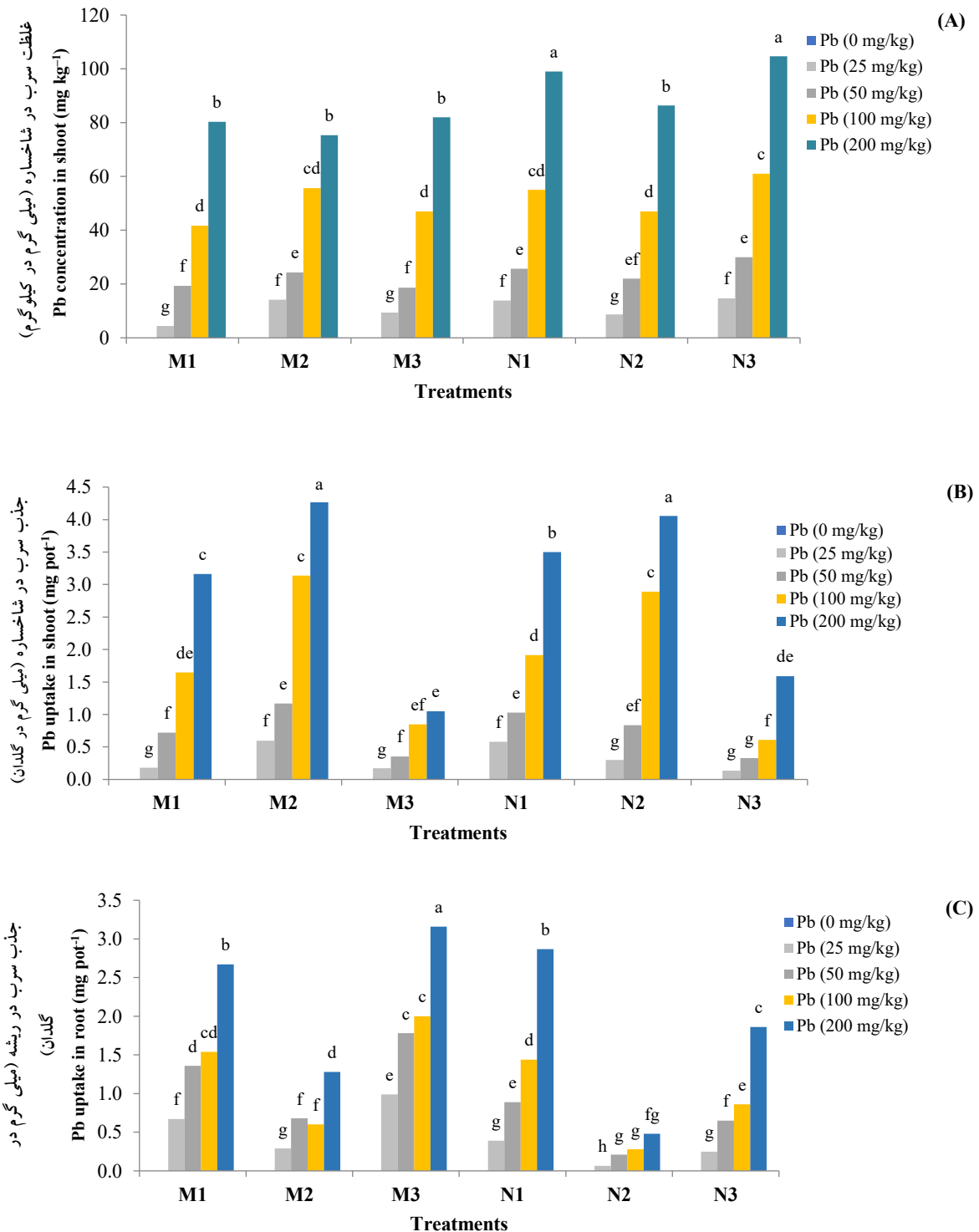
Fig. 3. Mean comparisons of interaction effect of plant, mycorrhiza, and lead on leaf total chlorophyll content; Bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$); (M1: Mycorrhiza-Marigold, M2: Mycorrhiza-Ornamental cabbage, M3: Mycorrhiza-Gladiolus, N1: Non-Mycorrhiza-Marigold, N2: Non-Mycorrhiza-Ornamental cabbage, N3: Non-Mycorrhiza-Gladiolus).

متصل می‌شود و از عناصری است که قابلیت انتقال کمی داشته و به همین دلیل سرب جذب‌شده از خاک اغلب در ریشه باقی می‌ماند. از مهم‌ترین دلایل تجمع بیشتر سرب در ریشه نسبت به شاخساره می‌توان به بازدارندگی حلقه کاسپاری، تحرک کم و در نتیجه رسوب سرب در دیواره‌های سلولی اندام ریشه اشاره کرد (Kabato and Pendias, 1992). تجمع بیشتر سرب در ریشه را می‌توان نه صرفاً به‌عنوان یک ویژگی جذب، بلکه به‌عنوان بخشی از سازوکار تحمل گیاه در برابر تنش فلزی تفسیر کرد.

همزیستی با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار (AMF) نیز به نظر می‌رسد این راهبرد دفاعی را تقویت می‌کند، هرچند شدت و جهت این اثر به گونه گیاهی وابسته است. در این پژوهش، هر سه گیاه کلم زیتنی، گل جعفری و گلایول تحت تیمار AMF سطح بالایی از کلونیزاسیون (۹۱-۹۶ درصد) را در تیمارهای شاهد و ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب نشان دادند، درحالی‌که درصد کلونیزاسیون با افزایش سطح سرب در خاک از ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، کاهش یافت (شکل ۱). به‌طور کلی

افزایش غلظت سرب در خاک، غلظت این عنصر در گیاه نیز افزایش یافت اما میانگین غلظت سرب در ریشه ۵ برابر غلظت آن در شاخساره ترب سفید بود.

مقادیر TF کمتر از یک (محدوده ۰/۵۰-۰/۶۷) در گیاهان مورد بررسی بیانگر آن است که ریشه همچنان به‌عنوان مخزن اصلی سرب عمل کرده و انتقال فلز به شاخساره محدود است. این وضعیت از نظر فیزیولوژیک قابل انتظار است، زیرا سرب در مقایسه با بسیاری از عناصر ضروری، تحرک بسیار محدودی در گیاه دارد. مقادیر کمتر TF گزارش‌شده برای برخی گیاهان از جمله خردل و تاج‌خروس (به ترتیب ۰/۱۷ و ۰/۲۳) توسط Cui et al. (2004) و گیاهان زیتنی (محدوده ۰/۱ تا ۰/۴) توسط Dodangeh et al. (2018) نیز مؤید آن است که محدودیت انتقال سرب از ریشه به شاخساره یک ویژگی نسبتاً عمومی در گیاهان است. بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده، عنصر سرب دارای کمترین میزان TF است، زیرا انتقال سرب از ریشه به برگ‌های بالایی به‌دشواری انجام می‌گیرد. سرب به شدت به دیواره سلولی



شکل ۴. مقایسه میانگین آثار برهم کنش گیاه، میکوریز و سرب بر غلظت (A) و جذب (B) سرب در شاخساره و جذب سرب در ریشه (C) گیاه؛ ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند (M1: میکوریز-گل جعفری، M2: میکوریز-کلم زیتنی، M3: میکوریز-گلایول، N1: بدون میکوریز-گل جعفری، N2: بدون میکوریز-کلم زیتنی، N3: بدون میکوریز-گلایول).

Fig. 4. Mean comparisons of interaction effects of plant, mycorrhiza and lead on Pb concentration (A) and Pb uptake in plant shoot (B) and Pb uptake in plant root (C); Bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$); (M1: Mycorrhiza-Marigold, M2: Mycorrhiza-Ornamental cabbage, M3: Mycorrhiza-Gladiolus, N1: Non-Mycorrhiza-Marigold, N2: Non-Mycorrhiza-Ornamental cabbage, N3: Non-Mycorrhiza-Gladiolus).

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر برهم کنش گیاه، میکوریز و سرب بر فاکتور تجمع زیستی (BCF) سرب در شاخساره

Table 4. Mean comparisons of interaction effect of plant, mycorrhiza and lead on shoot bioaccumulation factor (BCF) of lead

سرب (Pb, mg kg ⁻¹)					تیمارها (Treatments)
200	100	50	25	0	
0.44cd	0.47c	0.46c	0.30e	0f	گل جعفری-میکوریز (Marigold-Mycorrhiza)
0.41d	0.63a	0.59b	0.63a	0f	کلم زیتنی-میکوریز (Ornamental cabbage-Mycorrhiza)
0.45cd	0.55b	0.43cd	0.57b	0f	گلایول-میکوریز (Gladiolus-Mycorrhiza)
0.54b	0.50c	0.55b	0.64a	0f	گل جعفری-بدون میکوریز (Marigold-Non-Mycorrhiza)
0.45cd	0.48c	0.48c	0.39d	0f	کلم زیتنی-بدون میکوریز (Ornamental cabbage-Non-Mycorrhiza)
0.53b	0.67a	0.63a	0.68a	0f	گلایول-بدون میکوریز (Gladiolus-Non-Mycorrhiza)

میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند (براساس آزمون LSD).

Means with the same letters are not significantly different at the 5% probability level (LSD test).

را در محیط ریشه تثبیت کرده و زیست‌فراهمی آن را کاهش دهد (Zhipeng et al., 2016; Boorboori and Zhang, 2022). علاوه بر این، هیف‌های AMF فلزات را در ساختارهای قارچی جدا کرده و در نتیجه سمیت را برای بافت‌های گیاهی کاهش می‌دهند. در همین زمینه Yang et al. (2015) و Zhipeng et al. (2016) اثر مثبت تلقیح AMF را در افزایش رشد گیاهان اقایا (*Robinia pseudoacacia*) و کلم چینی (*Brassica chinensis*) در مقایسه با تیمار بدون تلقیح AMF، در شرایط تنش شدید فلز سرب گزارش کردند.

کاهش کلروفیل را می‌توان یکی از پیامدهای مهم فیزیولوژیک تنش سرب دانست که در نهایت می‌تواند رشد گیاه را محدود کند. در این پژوهش با افزایش غلظت سرب از صفر به ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، غلظت کلروفیل در تمام تیمارها کاهش معنی‌داری یافت. به نظر می‌رسد دلیل کاهش میزان کلروفیل برگ در اثر آلودگی سرب، کاهش بیوستت کلروفیل از راه کاهش غلظت عناصر ضروری منیزیم و آهن در برگ‌ها و ایجاد کمپلکس با پروتئین‌های فتوسنتزی و افزایش فعالیت کلروپلاست برای تجزیه کلروفیل باشد. هم‌چنین سرب می‌تواند جایگزین منیزیم در مولکول کلروفیل شود که این جایگزینی سبب کاهش دریافت نور به وسیله کلروفیل و در نتیجه کاهش فتوسنتز می‌گردد (Sharma and Dubey, 2005). بهبود وضعیت

کلونیزاسیون AMF در دو گونه گل جعفری و کلم زیتنی بسیار مؤثر بود و حتی تحت بالاترین تنش سرب، به ترتیب ۸۱/۷ و ۷۵ درصد کلونیزاسیون را حفظ کرد. در صورتی‌که در گلایول درصد کلونیزاسیون در تنش ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، به ۳۹ درصد رسید که ممکن است به دلیل کاهش گسترش جانبی ریشه در مقایسه با گل جعفری و کلم زیتنی باشد که سبب محدود شدن حجم فضایی تبادل عناصر غذایی می‌شود. (Gao et al. 2023) تأکید کردند که کلونیزاسیون زیاد AMF در حضور فلزات سنگین اغلب با بهبود جذب عناصر غذایی و کاهش تنش همراه است، درحالی‌که Li et al. (2023) افزایش جذب ریشه و تولید اسید آمینه مرتبط با کلونیزاسیون AMF را در گیاهان در معرض کادمیوم گزارش کردند. این یافته‌ها در مجموع تأیید می‌کنند که کلونیزاسیون تحت حمایت AMF با مدیریت عناصر غذایی، تاب‌آوری را در برابر تنش سرب افزایش می‌دهد.

اثر مثبت AMF بر رشد گیاهان تحت تنش سرب احتمالاً حاصل کارکرد هم‌زمان چندین سازوکار است و نمی‌توان آن را تنها به مدیریت جذب عناصر غذایی نسبت داد. توسعه شبکه هیفی قارچ، عملاً سطح مؤثر جذب ریشه را افزایش داده و امکان دسترسی بهتر گیاه به آب و عناصر غذایی، به‌ویژه فسفر، را فراهم می‌کند. از سوی دیگر، AMF می‌تواند با تغییر شرایط شیمیایی ریزوسفر و افزایش تولید موادی مانند گلومالین، بخشی از سرب

کلروفیل در گیاهان همزیست با AMF را می‌توان به‌طور غیرمستقیم ناشی از نقش قارچ در بهبود جذب آب و عناصر غذایی و کاهش تنش فلزی بر بافت‌های فتوسنتزی دانست. بنابراین، اثر AMF بر رشد گیاه تا حدی به‌دلیل حفظ کارایی دستگاه فتوسنتزی تحت تنش سرب نیز می‌تواند باشد (Sharma and Dubey, 2005).

الگوی تجمع سرب در ریشه و شاخساره و پاسخ آن به AMF، شواهد بیشتری برای نقش قارچ در تغییر سرنوشت سرب در سیستم خاک-گیاه فراهم می‌کند. کاهش غلظت سرب شاخساره در گلابول و گل جعفری تلقیح‌شده با AMF، همراه با افزایش تجمع سرب در ریشه، نشان می‌دهد که AMF ممکن است انتقال سرب از ریشه به شاخساره را محدود نموده و در عوض نگهداری آن در ریشه را تقویت کند. Zhipeng et al. (2016) نیز کاهش غلظت سرب در گیاه *B. chinensis* را به‌دلیل تلقیح AMF گزارش کردند که در آن تیمار AMF، کاهش ۲۰/۶ تا ۶۷/۵ درصدی غلظت سرب در این گیاه را به‌همراه داشت. کاهش‌های مشاهده‌شده احتمالاً به‌دلیل سازوکارهای مختلفی از جمله بی‌حرکت‌نمودن سرب توسط ساختارهای قارچی، تغییرات در شیمی ریزوسفر و بهبود جذب عناصر غذایی و آب است که نفوذپذیری ناشی از تنش را در بافت‌های گیاهی کاهش می‌دهد. همچنین امکان دارد AMF سرب را در هیف‌های قارچی جدا کند یا ترشحات ریشه را تحریک کند که سرب را کمپلکس کرده و تحرک آن را محدود می‌کند. پژوهش Yang et al. (2015) نشان داد که AMF فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را افزایش داده و آسیب اکسیداتیو را در گیاهان تحت تنش سرب کاهش می‌دهد بنابراین ممکن است خروج سرب با افزایش توان سم‌زدایی در ریشه‌های کلونیزه‌شده با AMF تکمیل شود. یکی دیگر از دلایل تحمل نسبی گیاهان در برابر مقادیر زیاد سرب، تشکیل ترکیبات نامحلول پیروفسفات در دیواره سلولی است که مانع از انتقال این عنصر به شاخساره و بخش‌های دیگر می‌شود؛ این موضوع نشان‌دهنده نقش ریشه‌ها در نگهداری سرب اضافی است. Sayad Manesh et al. (1994) با بررسی برخی از عناصر سنگین (کروم،

کادمیوم، نیکل و سرب) در خاک و گیاه گلزا گزارش کردند با افزایش مقدار عناصر سنگین در خاک، جذب این عناصر توسط گلزا نیز افزایش یافت. همچنین به‌دلیل تحرک کم عناصر سنگین در گیاه، تجمع عناصر در ریشه بیش از سایر اندام‌ها گزارش شد. نتایج این پژوهش نشان داد که گیاه کلم زینتی تلقیح‌شده با AMF، الگوهای متمایزی از تجمع فلز را نشان می‌دهد، به‌عبارت دیگر BCF شاخساره در تیمار AMF در گیاه کلم زینتی، بیشتر از تیمار بدون تلقیح قارچ بود و به بیشینه مقدار ۰/۶۳ در تیمار کلم زینتی در تلقیح با AMF رسید (جدول ۴). درحالی‌که در گلابول و گل جعفری، مقادیر BCF شاخساره در تیمار AMF کمتر از تیمار بدون تلقیح قارچ بود. تفاوت پاسخ BCF شاخساره به تیمار AMF در بین گیاهان مورد بررسی، بر تفاوت برهمکنش گیاه-قارچ-فلز تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که AMF لزوماً یک اثر یکنواخت بر انتقال سرب ندارد. به عبارت دیگر، پیامد همزیستی میکوریزی بر سرنوشت سرب می‌تواند تابع ویژگی‌های گیاه میزبان، سیستم ریشه‌ای، توان انتقال درون‌گیاهی و چگونگی توزیع کربن و مواد معدنی بین گیاه و قارچ باشد. در مقیاس سلولی، امکان دارد ساختارهای قارچی مانند آربسکول‌ها و وزیکول‌های AMF به‌عنوان مخزن‌های فلزی عمل کنند، یون‌های سمی را جدا کرده و حرکت آن‌ها را به بافت‌های حساس گیاه محدود کنند. نتایج مشابهی توسط Zhipeng et al. (2016) و Yang et al. (2023) در مورد ذرت و کلم برگ چینی مشاهده شده است. علاوه بر این، هیف‌های AMF شبکه‌های گسترده‌ای را در خاک تشکیل داده و سطح جذب عناصر غذایی و فلزات را افزایش می‌دهند و در عین‌حال جذب کنترل‌شده را ممکن می‌سازند (Simard et al., 2012). گلومالین که توسط AMF تولید می‌شوند، نیز بیشتر به بی‌حرکت‌نمودن فلزات در ریزوسفر کمک می‌کند (Zhu et al., 2019). اتصال به کمک گروه‌های عامل مانند گروه‌های فسفات و سولفیدریل نیز، فلزات را به شکل‌های با زیست‌فراهمی کمتر، مانند کمپلکس‌های اگزالات تبدیل می‌کند (Wang et al., 2012). مجموعه این فرایندها نشان می‌دهد که AMF را باید نه صرفاً یک عامل افزایش‌دهنده جذب عناصر

غذایی، بلکه بخشی از یک سامانه تنظیم‌کننده سرنوشت فلز در سامانه خاک-ریشه-گیاه در نظر گرفت.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که همزیستی با قارچ میکوریز آربسکولار (AMF) می‌تواند کارایی گیاه‌پالایی سرب از خاک را بهبود بخشد، اما میزان این اثر به گونه گیاهی وابسته است. در میان گیاهان مورد بررسی، گلابول در همزیستی با AMF بیشترین توان را در جذب سرب از خاک نشان داد. به‌طور کلی، همزیستی AMF با افزایش جذب سرب در ریشه، بهبود وضعیت کلروفیل و در برخی گیاهان افزایش زیست‌توده، موجب تغییر الگوی تجمع و انتقال سرب در گیاه شد. با این حال، پاسخ گیاهان از نظر تجمع سرب در شاخساره و فاکتور تجمع زیستی متفاوت بود که بیانگر وابستگی اثر AMF به برهم‌کنش گونه گیاهی و قارچی است. بنابراین، استفاده هدفمند از همزیستی گیاه با AMF

می‌تواند به‌عنوان رویکردی مؤثر در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به سرب مطرح باشد. با توجه به انجام این پژوهش در شرایط گلخانه‌ای و استفاده از یک گونه قارچ، انجام پژوهش‌های میدانی و درازمدت با گیاهان و سویه‌های متنوع قارچی و بررسی سازوکارهای فیزیولوژیک و مولکولی این همزیستی برای ارزیابی کاربرد در شرایط مزرعه‌ای و پایداری آن ضروری است.

تشکر و سپاسگزاری

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

تضاد منافع

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

References

منابع مورد استفاده

- Allen, S.E., Grimshaw, H.M., Rowland, A.P., 1986. Chemical analysis. In: Moore, P.D., Chapman, S.B. (Eds.), *Methods in Plant Ecology*. Blackwell Scientific Publication, Oxford, London, pp. 285–344.
- Arnon, D.I., 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.* 24 (1), 1–15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>.
- Asadi Kapourchal, S., 2021. Assessing uptake indices and clean up time of lead in contaminated soil using White Horseradish (*Raphanus sativus* cv. Longipinnatus). *Iran. J. Soil Water Res.* 52 (12), 3099–3108. <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.333746.669126>. (In Persian with English abstract)
- Baker, D.E., Amacher, M.C., 1982. Nickel, copper, zinc and cadmium. In: Page, A.L., Millers, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd ed., Agronomy Monograph No. 9, ASA/SSSA, Madison, WI, USA, pp. 323–334.
- Boorboori, M.R., Zhang, H.Y., 2022. Arbuscular mycorrhizal fungi are an influential factor in improving the phytoremediation of arsenic, cadmium, lead, and chromium. *J. Fungi.* 8 (2), 176. <https://doi.org/10.3390/jof8020176>.
- Butcher, D.J., 2009. Phytoremediation of lead in soil: recent applications and future prospects. *Appl. Spectrosc. Rev.* 44, 123–139. <https://doi.org/10.1080/05704920802352580>.
- Bremner, J.M., Mulvaney, C.S., 1982. Nitrogen-total. In: Page, A.L., Millers, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd ed., Agronomy Monograph No. 9, ASA/SSSA, Madison, WI, USA, pp. 595–624.
- Cheng, S.-F., Huang, C.-Y., Lin, Y.-C., Lin, S.-C., Chen, K.-L., 2015. Phytoremediation of lead using corn in contaminated agricultural land—An *in situ* study and benefit assessment. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 111, 72–77. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.09.024>.
- Cui, Y.J., Zhu, Y.G., Zhai, R.H., Chen, D.Y., Huang, Y.Z., Qiu, Y., Liang, J.Z., 2004. Transfer of metals from soil to vegetables in an area near a smelter in Nanning, China. *Environ. Int.* 30 (6), 785–791. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.01.003>.
- Deepika, A., Haritash, K., 2023. Phytoremediation potential of ornamental plants for heavy metal removal from contaminated soil: a critical review. *Hortic. Environ. Biotech.* 1–26. <https://doi.org/10.1007/s13580-023-00518-x>.

11. Dodangeh, H., Rahimi, G., Fallah, M., Ebrahimi, E., 2018. Investigation of heavy metal uptake by three types of ornamental plants as affected by application of organic and chemical fertilizers in contaminated soils. *Environ. Earth Sci.* 77(12), 473. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.333746.669126>.
12. Fitz, W.J., Wenzel, W.W., 2002. Arsenic transformations in the soil rhizosphere plant system: Fundamentals and potential application to phytoremediation. *J. Biotech.* 99(3), 259–278. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(02\)00218-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(02)00218-3).
13. Gao, Y., An, T., Kuang, Q., Wu, Y., Liu, S., Liang, L., Yu, M., Macrae, A., Chen, Y., 2023. The role of arbuscular mycorrhizal fungi in the alleviation of cadmium stress in cereals: A multilevel meta-analysis. *Sci. Total Environ.* 902, 166091. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166091>.
14. Gee, G.W., Bauder, J.W., 1986. Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed., Agronomy Monograph No. 9, ASA/SSSA, Madison, WI, pp. 383–411. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>.
15. Glinska, S., Michlewska, S., Gapinska, M., Seliger, P., Bartosiewicz, R., 2014. The effect of EDTA and EDDS on lead uptake and localization in hydroponically grown *Pisum sativum* L. *Acta Physiol. Planta.* 36(2), 399–408. <https://doi.org/10.1007/s11738-013-1421-8>.
16. Gohre, V., Paszkowski, U., 2006. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation. *Planta.* 223, 1115–1122. <https://doi.org/10.1007/s00425-006-0225-0>.
17. Jahromi, F., Aroca, R., Porcel, R., Ruiz-Lozano, J.M., 2008. Influence of salinity on the in vitro development of *Glomus intraradices* and on the in vivo physiological and molecular responses of mycorrhizal lettuce plants. *Microb. Ecol.* 55, 45–56. <https://doi.org/10.1007/s00248-007-9249-7>.
18. Jin, Z., Li, J., Li, Y., 2015. Interactive effects of arbuscular mycorrhizal fungi and copper stress on flowering phenology and reproduction of *Elsholtzia splendens*. *Plos One.* 10(12), e0145793. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145793>.
19. Kabato, P., Pendias, A.H., 1992. *Trace Element in Soils and Plants*. 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, 365 pp.
20. Karlinski, L., Rudawska, M., Kieliszewska-Rokicka, B., Leski, T., 2010. Relationship between genotype and soil environment during colonization of poplar roots by mycorrhizal and endophytic fungi. *Mycorrhiza* 20, 315–324. <https://doi.org/10.1007/s00572-009-0284-8>.
21. Klute, A. (Ed.). 1986. *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed. Monograph, ASA/SSSA, Madison, WI, 1188 pp.
22. Kormanic, P.P., McGraw, A.C., 1982. Quantification of vesicular-arbuscular mycorrhizae in plant roots. In: Schenck, N.C. (Ed.), *Methods and Principles of Mycorrhizal Research*. The American Phytopathological Society, St. Paul, MN, pp. 37–45.
23. Kushwaha, A., Hans, N., Kumar, S., Rani, R., 2018. A critical review on speciation, mobilization and toxicity of lead in soil-microbe-plant system and bioremediation strategies. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 147, 1035–1045. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.049>.
24. Li, W., Chen, K., Li, Q., Tang, Y., Jiang, Y., Su, Y., 2023. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on alleviating cadmium stress in *Medicago truncatula* Gaertn. *Plants* 12 (3), 547–561. <https://doi.org/10.3390/plants12030547>.
25. Lindsay, W.L., Norvell, W.A., 1987. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42, 421–428. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1978.03615995004200030009X>.
26. Mani, D., Kumar, C., Patel, N.K., 2015. Integrated micro-biochemical approach for phytoremediation of cadmium and zinc contaminated soils. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 111, 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.11.016>.
27. Mani, D., Kumar, C., 2014. Biotechnological advances in bioremediation of heavy metals contaminated ecosystems: an overview with special reference to phytoremediation. *Int. J. Environ. Sci. Tech.* 11(3), 843–872. <https://doi.org/10.1007/S13762-013-0299-8>.
28. Miransari, M., 2010. Contribution of arbuscular mycorrhizal symbiosis to plant growth under different types of soil stress. *Plant Biol.* 12, 563–569. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2009.00308.x>.
29. Mohammadipour, F., Asadi Kapourchal, S., 2012. Assessing land cress potential for phytoextraction of cadmium from Cd contaminated soils. *J. Soil. Water Res. Conserv.* 2(2), 25–35. (In Persian with English abstract)
30. Mrnka, L., Kuchár, M., Cieslarová, Z., Matějka, P., Száková, J., Tlustoš, P., Vosátka, M., 2012. Effects of endo- and ectomycorrhizal fungi on physiological parameters and heavy metals accumulation of two species from the family salicaceae. *Water Air Soil Pollut.* 223, 399–410. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-0868-8>.
31. Nagajyoti, P.C., Lee, K.D., Sreekanth, T.V.M., 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental chemistry letters.* 8, 199–216. <https://doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8>.
32. Nasiri, K., Babaeinejad, T., Ghanavati, N., Mohsenifar, K., 2023. The effect of mycorrhizal arbuscular fungus on phytoremediation potential of coriander, rosemary and ornamental cabbage in lead-contaminated soil. *J. Env. Sci. Tech.* 24(11), 97–106.
33. Nedaee Ziabari, S.Z., Sedaghathoor, S.H., Kaviani, B., Baniasad, M., 2024. Phytoremediation ability of three succulent ornamental plants; cactus (*Opuntia humifusa*), kalanchoe (*Kalanchoe blossfeldiana*) and bryophyllum

- (*Bryophyllum delagoensis*) under heavy metals pollution. Sci. Total Environ. 974, 174579. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174579>.
34. Olsen, S.R., Sommers, L.E., 1982. Phosphorus. In: Page, A.L. Millers, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. 2nd ed., Agronomy Monograph No. 9, ASA/SSSA, Madison, WI, USA, pp. 403–430. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c2>.
35. Peris, M., Micó, C., Recatalá, L., Sánchez, R. and Sánchez, J., 2007. Heavy metal contents in horticultural crops of a representative area of the European Mediterranean region. Sci. Total Environ, 378(1-2), 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.01.030>.
36. Sadusky, M.C., Sparks, D.L., Noll, M.R., Hendricks, G.J., 1987. Kinetics and mechanisms of potassium release from sandy middle Atlantic Coastal plain soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 1460–1465. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100060011x>.
37. Salehi, A., Tabari Kouchaksaraei, M., Mohammadi Goltapeh, E., Shirvany, A., Mirzaei, J., 2016. Effect of mycorrhizal inoculation on black and white poplar in a lead polluted soil. J. For. Sci. 62, 223–228. (In Persian with English abstract)
38. Samanta, I., Ghosh, K., Saikia, R., Savita, Maity, P. L., Chowdhary G., 2025. Arbuscular mycorrhizal fungi – a natural tool to impart abiotic stress tolerance in plants. Plant Signal. Behav. 20(1), 2525843. <https://doi.org/10.1080/15592324.2025.2525843>.
39. Sayad Manesh, M., Ghajar Sepanlu M., Bahmanyar, M.A., 1994. Evaluation of some heavy metals in soil and plant at filed using Amol Wastewater irrigation. J. Water Res. Agric. 2, 141–155. (In Persian with English abstract)
40. 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. Front. Plant Sci. 14, 1076876. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876>.
41. Sharma, P., Dubey, R.S.H., 2005. Lead toxicity in Plants. Brazilian J. Plant Physiol. 17, 35–52. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100004>.
42. Simard, S.W., Beiler, K.J., Bingham, M.A., Deslippe, J.R., Philip, L.J., Teste, F.P., 2012. Mycorrhizal networks: mechanisms, ecology and modelling. Fungal Biol. Rev. 26(1), 39–60. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2012.01.001>.
43. Walkley, A.J., Black, I.A., 1986. Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. Soil Sci. 37, 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>.
44. Wang, Y., Yan, A., Dai, J., Wang, N., Wu, D., 2012. Accumulation and tolerance characteristics of cadmium in *Chlorophytum comosum*: a popular ornamental plant and potential Cd hyperaccumulator. Environ. Monit. Assess. 184(2), 929–937. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2010-1>.
45. Wu, Z., Bauelos, G.S., Lin, Z.Q., Liu, Y., Yuan, L., Yin, X., Li, M., 2015. Biofortification and phytoremediation of selenium in China. Front. Plant Sci. 6(6), 136–142. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00136>.
46. Yang, Y., Han, X., Liang, Y., Ghosh, A., Chen, J., Tang, M., 2015. The combined effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and lead (Pb) stress on Pb accumulation, plant growth parameters, photosynthesis, and antioxidant enzymes in *Robinia pseudoacacia* L. PloS one, 10 (12), e0145726. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145726>.
47. Yang, Y.S., Sun, C.Y., Ma, J.Q., Qin, S.F., Zhou, X.B., Huang, J.H., 2023. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on maize tolerance to lead (Pb) contaminated soil. J. Ecol. Rural Environ. 39 (10), 1316–1322. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0314>.
48. Zhipeng, W., Weidong, W., Shenglu, Z., Shaohua, W., 2016. Mycorrhizal inoculation affects Pb and Cd accumulation and translocation in Pakchoi (*Brassica chinensis* L.). Pedosphere 26(1), 13–26. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60018-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60018-2).
49. Zhu, R., Zheng, Z., Li, T., He, S., Zhang, X., Wang, Y., Liu, T., 2019. Effect of tea plantation age on the distribution of glomalin-related soil protein in soil water-stable aggregates in southwestern China. Environ. Sci. Pollut. Res. 26, 1973–1982. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3782-4>.