Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi symbiosis with Several Ornamental Plants on Lead Phytoremediation

Dahham Badri Abdulhadi, Elham Chavoshi* and Hussein Ghitheeth Abed Al-Killabi

Department of Soil Science, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran
* Corresponding author, Email: e_chavoshi@iau.ac.ir

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

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 (Gladiolus (*Gladiolus grandiflorus*), Ornamental cabbage (*Brassica oleracea*), marigold (*Tagetes erecta*)), heavy metal (0, 25, 50, 100 and 200 mg/kg) and fungus (with/without *arbuscular mycorrhizal* fungi) in 3 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 parameters were measured.

Results: The Pb concentration in the roots and shoots of ornamental plants increased significantly due to the increase in soil Pb concentration. The root Pb concentrations were about 2 to 4 times its concentration in the shoots (at different Pb levels). Translocation factor for Pb in all plants were less than one. AMF inoculation significantly increased shoots and root dry weight of *G. grandiflorus* and *B. oleracea* under lead stress. Also, AMF inoculation significantly increased Pb concentration, Pb 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 3 plants.

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

Keywords: Ornamental cabbage, Gladiolus, Arbuscular mycorrhizal, Bioaccumulation, Marigold.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]

نقش همزیستی قارچ میکوریز آربسکولار با چند گیاه زینتی در گیاه‌پالایی سرب

دحام بدری عبدالهادی[۱]، الهام چاوشی*[۲] و حسین غثیث عبد الکلابی[۳]

گروه علوم خاک؛ واحد اصفهان (خوراسگان)؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ اصفهان؛ ایران

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

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

چکیده

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

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

نتایج: با افزایش غلظت سرب در خاک، غلظت این عنصر در ریشه و اندام هوایی گیاهان زینتی افزایش معنی‌داری یافت. غلظت سرب در ریشه حدود ۲ تا ۴ برابر غلظت آن در اندام هوایی گیاهان (در سطوح مختلف سرب) بود. فاکتور انتقال در همه گیاهان کوچک‌تر از یک شد. همزیستی میکوریز باعث افزایش معنی‌دار ماده خشک گیاهی در گلایول و کلم زینتی تحت تنش سرب شد. همچنین همزیستی میکوریز سبب افزایش معنی‌دار غلظت، جذب سرب و BCF سرب در ریشه هر ۳ گیاه زینتی در مقایسه با تیمار بدون میکوریز شد. BCF سرب در ریشه همه گیاهان زینتی بزرگتر از یک بود اما تفاوت معنی‌داری بین مقادیر آن در ۳ گیاه مشاهده نشد.

نتیجه‌گیری کلی: به‌طور کلی نتایج نشان داد که قارچ میکوریز، تجمع فلز و فاکتورهای فیزیولوژیکی را در گیاهان زینتی مورد مطالعه به‌طور متفاوتی تعدیل می‌کند.

واژه‌های کلیدی: کلم زینتی، گلایول، میکوریز آربسکولار، تجمع زیستی، گل جعفری.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]

مقدمه

خاک جزء ضروری محیط زیست است، بنابراین سالم و عاری نگه‌داشتن آن از آلودگی ناشی از ورود آلاینده‌های مختلف آلی و معدنی به یک دغدغه مهم تبدیل شده است. در میان آلاینده‌های معدنی، فلزات سنگین مانند آرسنیک (As)، نیکل (Ni)، کروم (Cr) و سرب (Pb) به‌دلیل دارا بودن ماهیت غیرقابل تجزیه خطرناک هستند (Nagajyoti et al., 2010). سرب یکی از فراوان‌ترین عناصری است که کاربردهای زیادی در معدن، صنعت، ذوب و غیره دارد. این فلز پتانسیل آلوده کردن محیط زیست را از طریق فرآیندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی دارد. آلودگی خاک با سرب باعث مسمومیت گیاهان، کاهش حاصلخیزی، عملکرد و فعالیت میکروبی خاک می‌شود و در نهایت سلامت انسان و جانداران را به مخاطره می‌اندازد. 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 از حد بحرانی، فرآیندهای مختلف مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Kushwaha et al., 2018).

برای پاکسازی فلزات سنگین از خاک، روش‌های شیمیایی و فیزیکی مانند رقیق‌سازی و استخراج اسیدی ایجاد شده‌اند (Cheng et al., 2015). اما این روش‌ها پرهزینه و پیچیده بوده و برای مکان‌های بزرگ مناسب نیستند. روش‌های سنتی دیگری نیز برای پاکسازی خاک آلوده استفاده می‌شود. در فرآیند سنتی، خاک کاملاً آلوده با خاک سالم جایگزین می‌شود. اگرچه این یک راه حل بسیار مؤثر و دائمی برای خاک آلوده به فلزات سنگین است، اما زمان و هزینه زیادی را مصرف می‌کند (Butcher, 2009). بنابراین، بررسی روش‌های جایگزین و طولانی مدت پاکسازی خاک آلوده به سرب ضروری است. گیاه‌پالایی، فرآیند/تکنیکی است که در آن از گیاهان برای پاکسازی فلزات سنگین از خاک استفاده می‌شود.

گیاه‌پالایی یک فناوری سبز مقرون به‌صرفه است که مبتنی بر استفاده از گیاهان برای حذف، متابولیسم یا جذب مواد خطرناک در خاک است (Wu et al., 2015). در روش گیاه‌پالایی از گیاهان سبز برای نجات اکوسیستم از آلودگی به دلیل توانایی آن‌ها در استخراج فلزات سنگین و کاهش سمیت آلاینده‌ها از خاک استفاده می‌شود (Sharma et al., 2023). توانایی گیاهان در جذب فلزات سنگین از خاک‌های آلوده، متفاوت است. تعداد کمی از گونه‌های گیاهی قادر به تجمع زیاد فلزات سنگین در بافت‌های خود و مقاومت در برابر غلظت‌های بالای آن‌ها می‌باشند (Mohammadipour et al., 2012).

مشکل عمده فناوری گیاه‌پالایی، زمان به نسبت طولانی برای انجام این فرآیند است، به‌طوری‌که سال‌ها طول می‌کشد تا سطح آلودگی به مقدار قابل‌قبول و مجاز در خاک برسد (Salehi et al., 2016). ازاین‌رو راهکارهایی برای تقویت و بهبود کارایی فرآیند گیاه‌پالایی مطرح شده است که می‌توان به استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی یا کودهای شیمیایی و استفاده از میکروارگانیسم‌های خاک به‌ویژه قارچ‌های میکوریزی اشاره کرد (Mrnka et al., 2012). قارچ‌های میکوریزی (اندومیکوریز و اکتومیکوریز) از طریق مکانیسم‌های مستقیم و غیرمستقیم می‌توانند با افزایش جذب عناصر غذایی، تغییر دسترسی زیستی فلزات، بهبود فعالیت‌های فیزیولوژیکی و تولید مواد محرک رشد، مقاومت گیاه را در برابر استرس‌های محیطی (خشکی، فلزات سنگین، بیماری‌ها، شوری و پاتوژن‌ها) افزایش دهند (Karlinski et al., 2010) و باعث افزایش کارایی گیاهان در فرآیند شوند (Gohre and Paszkowski., 2006).

قارچ میکوریز آربوسکولار (AMF) از انواع شناخته‌شده قارچ‌های میکوریز است که در اثر همزیستی با گیاهان باعث افزایش رشد و افزایش تحمل آن‌ها به آلودگی‌های آلی، فلزات سمی و تنش‌های محیطی می‌شوند. این قارچ‌ها با بیش از ۹۰ درصد از گیاهان آوندی و بیش از ۸۰ درصد از تمام گیاهان خشکی‌زی رابطه همزیستی دارند (Samanta et al., 2025). میزان اثر تعدیل‌کنندگی این قارچ‌ها در شرایط تنش فلزات سنگین به عوامل متعددی از جمله نوع و غلظت فلز سنگین، گونه گیاه و شرایط رشد گیاه بستگی دارد. به‌علاوه، قارچ‌های میکوریز باعث

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]

افزایش رشد گیاه از طریق تشکیل شبکه‌های هیفی گسترده و تولید مواد بیوشیمیایی مهمی مانند گلومالین می‌گردد. این قابلیت قارچ‌ها می‌تواند باعث افزایش جذب آب و عناصر غذایی و بهبود ساختمان خاک شود (Jahromi et al., 2008). قارچ‌های میکوریز آربوسکولار می‌توانند تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را در راستای خنثی‌کردن اثر رادیکال‌های آزاد اکسیژن که در شرایط شوری و آلودگی فلزات سنگین تولید می‌شوند، افزایش دهند (Miransari, 2010).

گیاه‌پالایی شامل چندین زیرمجموعه خاص است که در حال حاضر استخراج گیاهی[1] و تجزیه گیاهی[2] برای گیاه‌پالایی فلزات و مواد آلی در خاک‌های آلوده توسعه یافته است (Mani and Kumar, 2014). استخراج گیاهی فرآیند استفاده از گیاهان، به‌ویژه گیاهان بیش‌انباشتگر[3]، برای استخراج یا تغلیظ فلزات یا مواد آلی به یک زیست‌توده قابل برداشت است، درحالی‌که تجزیه گیاهی فرآیند استفاده از ترشحات ریشه گیاهان برای تحریک فعالیت میکروبی است که به موجب آن افزایش معدنی‌شدن در محل تماس ریشه با خاک به‌واسطه میکروارگانیسم‌های مرتبط با سطح ریشه، انجام می‌شود (Mani et al., 2015). استفاده از بیش‌انباشتگرها در حال حاضر یک حوزه تحقیقاتی محبوب در گیاه‌پالایی است. با این‌حال، با توجه به محدودیت سرعت رشد گیاه و بهره‌وری، بسیاری از بیش‌انباشتگرها کمتر مورد استفاه قرار می‌گیرند. برنامه کاربردی برای استفاده تجاری در این زمینه، استفاده از گیاهان زینتی است (Glinska et al., 2014). گیاهان زینتی به‌دلیل توانایی آن‌ها در کاهش آلودگی خاک، در گیاه‌پالایی معرفی شده‌اند. در همین زمینه Nasiri et al., (2023) در پژوهشی به بررسی اثر قارچ میکوریز آربوسکولار بر پتانسیل گیاه‌پالایی تاج خروس و رزماری در خاک آلوده به سرب در ۶ سطح (صفر، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب) و دو سطح قارچ میکوریز آربوسکولار (تلقیح و عدم تلقیح) پرداختند. نتایج این محققین نشان داد قارچ میکوریز آربوسکولار غلظت سرب ریشه و اندام‌های هوایی گیاه رزماری را در مقایسه با تیمار بدون قارچ، افزایش داد. بیشترین غلظت سرب اندام هوایی در گیاه رزماری تلقیح‌شده با قارچ میکوریز و کمترین غلظت سرب اندام هوایی در گیاه تاج خروس تلقیح‌نشده با میکوریز مشاهده گردید. این نتایج نشان‌دهنده مؤثر بودن استفاده از قارچ میکوریز آربوسکولار در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده بود. در پژوهشی دیگر تلقیح قارچ میکوریز آربوسکولار با ریشه گیاه زینتی *Elsholtzia splendens* از تیره نعناعیان، سبب افزایش دوره و 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 گوشتی کاکتوس (*Opuntia humifusa*)، کالانکوئه (*Kalanchoe blossfeldiana*) و بریوفیلوم (*Bryophyllum delagoensis*)، تحت تنش فلزات سنگین (نقره، کادمیوم، سرب و نیکل) را ارزیابی کردند. نتایج این محققین نشان داد بریوفیلوم مقاومت بالایی در برابر فلزات سنگین داشت و فلزات سنگین مورد بررسی تأثیر کمتری بر رشد این گیاه داشتند. در مقابل، کاکتوس پتانسیل بالاتری برای جذب فلزات سنگین در مقایسه با کالانکوئه و بریوفیلوم نشان داد و به‌عنوان یک گیاه‌پالاینده عالی معرفی شد.

گیاهان زینتی علاوه بر کاهش آلودگی خاک، خدمات اکوسیستمی متعددی را ارائه می‌دهند، به حفظ تنوع زیستی کمک می‌کنند و با افزودن ارزش زیبایی شناختی، محیط را زیبا می‌کنند (Deepika and Haritash et al., 2023). با استفاده از گیاهان زینتی می‌توان علاوه بر زیباسازی محیط، آلاینده‌های انباشته‌شده نظیر سرب در گیاهان زینتی را جدا کرد و در نتیجه خطر سلامتی انسان را تا حدودی کاهش داد. بنابراین، می‌توان کاربرد گیاهان زینتی را برای کاهش آلودگی فلزات سنگین خاک بررسی کرد. لذا این پژوهش با هدف بررسی پتانسیل گیاه‌پالایی سه گیاه زینتی گلایول، گل جعفری و کلم زینتی با استفاده از قارچ میکوریز آربوسکولار در غلظت‌های مختلف سرب در خاک انجام شد.

1- phytoextraction
2- phytodegradation
3- Hyperaccumulator

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اولیه

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

ویژگی (Property)	واحد (Unit)	مقدار	ویژگی (Property)	واحد (Unit)	مقدار
pH	–	7.72	رطوبت ظرفیت مزرعه Field Capacity (FC)	%	20
رسانایی الکتریکی Electrical conductivity (EC)	$dS\ m^{-1}$	1.65	ماده آلی Organic matter	%	0.50
جرم مخصوص 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			

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و ویژگی‌های خاک

خاک مورد نظر از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری زمین‌های کشاورزی شهر اصفهان برداشته شد و پس از هوا خشک شدن، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. در ادامه برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک شامل pH به‌وسیله دستگاه pH متر (متروهم ۸۲۷ کمپانی متروهم کشور سوئیس) در گل اشباع، رسانایی الکتریکی به‌وسیله 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 فروآمونیوم 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 اطمینان از عدم آلودگی خاک به سرب، میزان سرب کل خاک به‌وسیله دستگاه جذب اتمی مدل Perkin Elmer 3030 ساخت کشور آمریکا اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

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 ۷۰-۶۰ درصد و دمای ۲۵-۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. گیاهان شامل گل جعفری، کلم زینتی و گلایول و فلز سنگین شامل سرب در ۵ سطح (۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. ۲ سطح قارچ آربوسکولار میکوریز (تلقیح و عدم تلقیح) نیز اعمال شد. در مجموع ۹۰ گلدان وجود داشت. ابتدا خاک در اتوکلاو در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت استریل شد. سپس برای آلوده کردن خاک به سرب از نمک استات سرب استفاده شد. نمک استات سرب در آب مقطر لازم حل شد و روی خاک اسپری شد و برای رسیدن به تعادل، دو هفته در وضعیت رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) و دمای ۲۰±۵ نگهداری شد.

آماده‌سازی تیمارها و کشت گلدانی

بذرهای جعفری زینتی و کلم زینتی تولید شده توسط شرکت

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]

Takii Seed هلندی و پداژه گلایول، در گلدان کاشته شدند. کشت در اواخر زمستان انجام شد. 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) حاوی خاک آلوده به سرب (۶ کیلوگرم خاک در هر گلدان) منتقل شدند. گلدان‌ها به دو دسته تقسیم شدند، یک دسته قارچ میکوریز به خاک به میزان ۱۰۰ گرم در زمان کاشت در اطراف ریشه گیاه اضافه شد و دسته دیگر تلقیح قارچ انجام نشد. گونه‌های قارچ میکوریز به‌کار رفته در این پژوهش از شرکت زیست فناور توران شاهرود تهیه شد. این قارچ‌ها به‌صورت خالص نبوده و به همراه خاک به بازار مصرف عرضه می‌شوند. براساس اعلام شرکت مذکور، خاک حاوی 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 حد رطوبت ظرفیت مزرعه انجام شد. برای این منظور گلدان‌ها در فاصله زمانی هر دو روز یکبار توزین شده و آب از دست‌رفته تا رسیدن وزن نهایی گلدان‌ها به حد رطوبت ظرفیت مزرعه به گلدان‌ها اضافه شد. یک ماه پس از کاشت گیاه، کودهای نیتروژن، پتاسیم و فسفر طبق توصیه کودی 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 گردید.

پس از رسیدن گیاهان به مرحله گلدهی یعنی برای کلم زینتی ۱۱۰ روز، گل جعفری ۱۱۷ روز و گلایول ۱۲۰ روز بعد 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) محاسبه شد. سپس بخش‌های هوایی و ریشه گیاه جدا شده، با آب مقطر شسته و سپس به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شد و سپس وزن خشک نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. برای شستشوی ریشه از محلول ۰/۰۱ درصد کالگون و دستگاه اولتراسوند[4] استفاده گردیده تا تمام ذرات خاک از ریشه جدا گردد. بخش ریشه و اندام هوایی گیاهان بعد از خشک شدن، با آسیاب برقی پودر شد. ۱ گرم از نمونه پودر شده توزین و در بالن ژوژه ۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد. سپس ۱۵ میلی‌لیتر از مخلوط اسیدها (اسید سولفویک (۶۵٪)، اسید پرکلریک (۶۵٪) و اسید نیتریک (۷۰٪) با نسبت 5:1:1) به آن اضافه شد و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد تا شفاف‌شدن نمونه‌ها حرارت داده شد. سپس نمونه‌ها با آب مقطر به حجم رسانده شد و با کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف گردید (Allen et al., 1986). سپس غلظت عنصر سرب در عصاره حاصل توسط دستگاه جذب اتمی مدل Perkin Elmer 3030 ساخت کشور آمریکا قرائت شد. میزان کل سرب در خاک به روش Baker and Amacher (1982) و شکل قابل جذب آن با استفاده از روش Lindsay and Norvell (1987) اندازه‌گیری شد.

مقدار جذب سرب کل زیست توده، فاکتور انتقال (TF[5]) و فاکتور تجمع زیستی (BCF[6]) با استفاده از روابط ۱ تا ۳ به‌دست آمد (Fitz and Wenzel, 2002).

(۱) غلظت سرب × وزن زیست توده خشک = سرب جذب

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

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

غلظت سرب در خاک، ریشه و اندام هوایی بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم، در وزن زیست توده خشک بر حسب کیلوگرم و جذب سرب بر حسب میلی‌گرم است.

برای اندازه‌گیری درصد کلونیزاسیون ریشه از روش Kormanic and McGraw (1982) با استفاده از فوشین اسیدی[7]

4- Ultrasound
5- Translocation factor
6- Bioconcentration factor
7- Acid Fuchsin

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]

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

Table 2. Results of variance analysis of the effect of plant species, mycorrhizal, lead and their interactions on some of soil and plant properties.

میانگین مربعات (Mean square)								
وزن خشک ریشه	وزن خشک اندام هوایی	کلونیزاسیون قارچ ریشه	غلظت سرب قابل جذب خاک	غلظت سرب خاک	غلظت سرب ریشه	غلظت سرب اندام هوایی	درجه آزادی	منبع تغییر
Dry weight (g)		Fungi colonization (%)	Pb available concentration (mg/kg)	Pb concentration (mg/kg)			df	Source of variation
Root	Shoot	Root	Soil	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 (mycorrhizal)
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 (mycorrhizal × Lead)
163.6**	159.7**	205.8**	0.4 ns	2.0 ns	98.54 ns	741.1**	2	گیاه* میکوریز (mycorrhizal × Plant)
1.9 **	13.2**	427.5**	1.5 ns	4.2 ns	462.21 ns	145.2**	8	گیاه *میکوریز* سرب (Plant × mycorrhizal × Lead)
2.2	3.8	15.6	4.6	3.1	287.82	16.0	60	خطا (Error)
0.5	0.4	0.6	1.1	0.99	0.78	1.1		ضریب تغییرات (CV)

ns ،* و ** : به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و یک درصد.

ns, * and ** non/significance in the level of 5 and 1 percent, respectively.

استفاده شد. پس از جمع‌آوری داده‌ها، به منظور محاسبات آماری از نرم‌افزارSPSS ورژن ۲۶ استفاده شد. مقایسه میانگین با آزمون LSD (در سطح احتمال یک درصد) و رسم نمودارها توسط نرم‌افزار EXCEL انجام شد.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) اثر نوع گیاه، میکوریز، غلظت سرب و برهم‌کنش آن‌ها بر برخی ویژگی‌های مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. همانگونه که در جدول مشاهده می‌شود اثرات ساده نوع گیاه بر غلظت سرب در اندام هوایی، وزن خشک

نسخه پیش از انتشار (اصلاح نشده)

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]

ادامه جدول ۲.

Table 2. (Continued)

منبع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	ارتفاع ساقه Stem height (cm)	کلروفیل کل Total chlorophyll (mg/kg)	جذب ریشه Root uptake (mg)	جذب اندام هوایی Shoot uptake (mg)	BCF ریشه Root BCF	BCF اندام هوایی Shoot BCF	فاکتور انتقال Transfer factor
		میانگین مربعات (Mean square)						
گیاه (Plant)	2	266673.1^{ns}	0.56**	6.33**	13.44**	0.05^{ns}	0.02*	0.24^{ns}
سرب (Lead)	4	232433^{ns}	0.33**	10.43**	31.06**	12.00**	1.07**	2.1**
میکوریز (mycorrhizal)	1	208095^{ns}	14.88**	4.42**	1.42**	6.13**	0.008^{ns}	0.36^{ns}
گیاه*سرب (Plant×Lead)	8	228640.1^{ns}	0.45**	0.87**	3.52**	0.07*	0.008^{ns}	0.17^{ns}
میکوریز*سرب (mycorrhizal × Lead)	4	228885.7^{ns}	0.20**	0.39**	0.75**	2.55**	0.003^{ns}	0.05^{ns}
گیاه* میکوریز (mycorrhizal × Plant)	2	238723.1^{ns}	3.64**	1.11**	1.75**	0.01^{ns}	0.2**	0.05^{ns}
گیاه *میکوریز* سرب (Plant × mycorrhizal × Lead)	8	227564.6^{ns}	0.12**	0.13*	0.3**	0.03^{ns}	0.04**	0.27^{ns}
خطا (Error)	60	228026.6	0.04	0.05	0.02	0.03	0.006	0.20
ضریب تغییرات (CV)		0.3	0.29	0.98	1.19	0.73	0.57	0.92

^{ns} ،* و ** : به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و یک درصد.

^{ns}, * and ** non/significance in the level of 5 and 1 percent, respectively.

ریشه و اندام هوایی، میزان کلروفیل کل، جذب سرب در ریشه و اندام هوایی در سطح یک درصد معنی‌دار بود، اما بر سایر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده، معنی‌دار نبود. اثرات ساده غلظت سرب نیز بر همه ویژگی‌های مورد مطالعه (به‌جز ارتفاع ساقه) در سطح یک درصد معنی‌دار بود. اثرات ساده همزیستی میکوریز بر برخی ویژگی‌های مورد مطالعه (به‌جز غلظت سرب در ریشه، ارتفاع ساقه، BCF اندام هوایی و فاکتور انتقال) در سطح یک درصد معنی‌دار بود.

اثرات ساده گیاه، میکوریز و غلظت سرب بر برخی ویژگی‌های خاک و گیاه

مقایسه میانگین اثرات ساده نوع گیاه، قارچ و غلظت سرب بر برخی ویژگی‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش سطح آلودگی، غلظت سرب در خاک و غلظت قابل جذب آن، افزایش معنی‌داری یافته است و به دنبال آن غلظت این عنصر در گیاهان افزایش معنی‌داری را نشان می‌دهد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین تغییرات غلظت سرب در ریشه و اندام هوایی گیاهان نشان داد تغییرات غلظت این عنصر در هر دو بخش گیاه، تحت تأثیر غلظت سرب در خاک است و با افزایش غلظت سرب در خاک، غلظت این عنصر در ریشه و اندام هوایی گیاهان افزایش معنی‌داری یافته است. بیشترین غلظت سرب در ریشه و اندام هوایی گیاهان به‌ترتیب ۱۷۷/۹۴ و ۹۳/۱۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که در تیمار ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب مشاهده شد. جذب سرب نیز در هر

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]

جدول ۳. مقایسه میانگین اثرات ساده نوع گیاه، قارچ و غلظت سرب بر برخی ویژگی‌های مطالعه شده.

Table 3. Mean comparisons of simple effect of plant, mycorrhizal, and lead on some studied properties.

فاکتور انتقال	جذب سرب در اندام هوایی (mg)	غلظت سرب در اندام هوایی (mg/kg)	جذب سرب در ریشه (mg)	غلظت سرب در ریشه (mg/kg)		
Tranlocation Factor (TF)	Pb absorption in shoot (mg)	Pb concentration in shoot (mg/kg)	Pb absorption in root (mg)	Pb concentration in root (mg/kg)		
a 0.5	1.33 b	34.33 b	1.21 a	81.11 a	گل جعفری	گیاه (Plant)
0.67 a	1.85 a	37.25 a	0.39 b	77.06 a	کلم زینتی	
0.56 a	0.52 c	37.20 a	1.17 a	79.24 a	گلایول	
0.51 a	1.10 b	34.80 b	1.15 a	82.42 a	میکوریز	قارچ (Mycorrhizal)
0.64 a	1.36 a	38.44 a	0.7 b	75.85b	بدون میکوریز	
–	–	–	–	–	0	سرب (Pb)
0.34 b	0.33 d	10.85 d	0.44 d	35.89 d	25	
0.31 b	0.74 c	23.34 c	0.93 c	80.72 c	50	
0.54 a	1.67 b	51.05 b	1.12 b	96.83 b	100	
0.54 a	3.32 a	93.11 a	2.06 a	177.94 a	200	

میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند (براساس آزمون LSD).

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

ادامه جدول ۳.

Table 3. (Continued)

غلظت سرب قابل جذب در خاک (mg/kg)	غلظت سرب در خاک (mg/kg)	فاکتور تجمع زیستی اندام هوایی	فاکتور تجمع زیستی ریشه		
Available Pb in soil (mg/kg)	Pb concentration in soil (mg/kg)	Shoot BCF	Root BCF		
58.57 a	68 a	0.40 a	1.23 a	گل جعفری	گیاه (Plant)
57.57 a	68.53 a	0.44 a	1.16 a	کلم زینتی	
58.40 a	68.23 a	0.45 a	1.17 a	گلایول	
49.51 b	65.44 b	0.42 a	1.45 a	میکوریز	قارچ (Mycorrhizal)
66.84 a	71.07 a	0.44 a	0.92 b	بدون میکوریز	
0.0 e	0.0 e	–	–	0	سرب (Pb)
17.50 d	18.83 d	0.57 a	2.05 a	25	
38.44 c	44.28 c	0.53 ab	1.85 b	50	
75.83 b	89.83 b	a 0.57	1.08 c	100	
159.11 a	188.33 a	0.49 b	0.94 d	200	

میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند (براساس آزمون LSD).

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

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]

دو بخش گیاه با افزایش غلظت این عنصر در خاک، افزایش معنی‌داری را نشان داد (جدول ۳). از طرف دیگر مشاهده شد که همزیستی میکوریز، سبب افزایش معنی‌دار غلظت و جذب سرب در ریشه و کاهش معنی‌دار غلظت و جذب سرب در اندام هوایی گیاهان در مقایسه با تیمار بدون میکوریز شده است. بیشترین جذب سرب در ریشه و اندام هوایی، به‌ترتیب مربوط به گل جعفری و کلم زینتی بود (جدول ۳).

فاکتور انتقال بیانگر انتقال فلز از ریشه به اندام هوایی گیاه و فاکتور تجمع زیستی بیانگر انتقال فلز از خاک به گیاه است. در بررسی اثر ساده گیاه بر فاکتور تجمع زیستی مشاهده شد مقادیر BCF در هر دو بخش ریشه و اندام هوایی در گیاهان مختلف فاقد تفاوت معنی‌دار است. همزیستی میکوریز نیز بر BCF اندام هوایی در مقایسه با تیمار بدون همزیستی، اثر معنی‌داری نداشت؛ در مقابل BCF ریشه در اثر همزیستی میکوریز افزایش معنی‌داری در مقایسه با تیمار بدون همزیستی نشان داد. از طرف دیگر با افزایش سطح سرب در خاک، کاهش معنی‌دار مقادیر BCF در هر دو بخش ریشه و اندام هوایی مشاهده شد، به‌طوری‌که کمترین مقادیر BCF ریشه (۰/۹۴) و اندام هوایی (۰/۴۹) در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب در خاک، ثبت شد (جدول ۳). فاکتور انتقال در هر سه گیاه گل جعفری، کلم زینتی و گلایول کوچکتر از یک بوده و فاقد تفاوت معنی‌داری (سطح یک درصد) با یکدیگر بود. همزیستی قارچ میکوریز نیز اثر معنی‌داری بر TF نداشت. در مقابل، مقادیر TF با افزایش غلظت سرب در خاک، افزایش معنی‌داری یافت و از ۰/۳۱ در تیمار ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب خاک، به ۰/۵۴ در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب رسید (جدول ۳).

اثرات متقابل گیاه، میکوریز و غلظت سرب بر برخی ویژگی‌های خاک و گیاه

نتایج مقایسه میانگین اثرات برهم‌کنش گیاه، میکوریز و غلظت سرب بر برخی ویژگی‌های خاک و گیاه به کمک آزمون LSD (سطح احتمال یک درصد)، نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار بین مقادیر برخی ویژگی‌های مورد مطالعه در تیمارهای مختلف بود (جدول ۱). مقایسه میانگین اثرات برهم‌کنش گیاه، میکوریز و سرب بر درصد کلونیزاسیون قارچ روی ریشه به کمک آزمون LSD (سطح احتمال یک درصد)، نشان‌دهنده افزایش معنی‌داری درصد کلونیزاسیون قارچ در ریشه هر سه گیاه گل جعفری، گلایول و کلم زینتی، در مقایسه با تیمارهای فاقد همزیستی میکوریز بود (شکل ۱). از طرف دیگر مشاهده شد که در هر سه گیاه، با افزایش غلظت سرب از صفر به ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، درصد کلونیزاسیون قارچ روی ریشه کاهش معنی‌داری یافته است. میزان کاهش درصد کلونیزاسیون در گل جعفری، با افزایش غلظت سرب از صفر به ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، به‌ترتیب ۲/۸، ۱۴/۳، ۹/۳ و ۱۲/۵ درصد، در کلم زینتی به‌ترتیب ۱۱/۵، ۸/۴، ۱۶/۴ و ۲۱/۶ و در گلایول به‌ترتیب ۰/۷، ۱۱/۱، ۱۰/۴ و ۵۹/۳ درصد بود (شکل ۱).

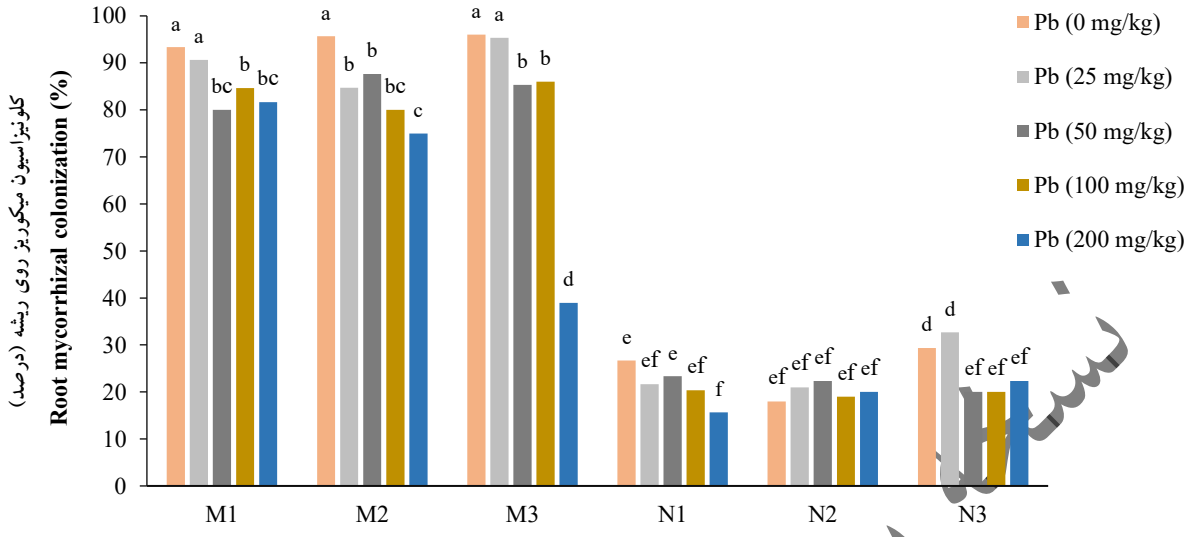
وزن خشک ریشه و اندام هوایی در تیمارهای مختلف قارچ و سرب تفاوت معنی‌داری (سطح یک درصد) را نشان داد. در گیاه گلایول، همزیستی قارچ میکوریز سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک ریشه و اندام هوایی در مقایسه با تیمار بدون همزیستی شد. از طرف دیگر بیشترین وزن خشک ریشه و اندام هوایی گلایول مربوط به تیمار شاهد بود و با افزایش غلظت سرب، کاهش معنی‌داری در وزن خشک ریشه و اندام هوایی مشاهده شد، هرچند میزان این کاهش در ریشه و اندام هوائی به‌ترتیب در غلظت‌های بیشتر از ۵۰ و ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، معنی‌دار نبود (شکل ۱).

در گیاه کلم زینتی نیز همزیستی قارچ میکوریز سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک ریشه و اندام هوایی در مقایسه با تیمار بدون همزیستی شد، اما وزن خشک ریشه در غلظت‌های مختلف سرب فاقد تفاوت معنی‌دار بود. در مقابل وزن خشک بخش هوایی کلم زینتی، با افزایش غلظت سرب از صفر به ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، کاهش معنی‌داری را نشان داد. در گل جعفری اگرچه وزن خشک اندام هوایی با افزایش غلظت سرب، کاهش معنی‌داری یافت، اما تفاوت معنی‌داری در وزن خشک ریشه در

(الف)

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]



شکل ۱. مقایسه میانگین اثرات برهم‌کنش گیاه، میکوریز و سرب بر درصد کلونیزاسیون؛ ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند (M1: میکوریز- گل جعفری، M2: میکوریز- کلم زینتی، M3: میکوریز- گلایول، N1: بدون میکوریز- گل جعفری،N2 : بدون میکوریز- کلم زینتی،N3 : بدون میکوریز- گلایول).

Fig. 2. Mean comparisons of interaction effect of plant, mycorrhizal, and lead on colonization percentage; bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$) (M1: Mycorrhizal-Marigold, M2: Mycorrhizal-Ornamental cabbage, M3: Mycorrhizal-Gladiolus, N1: Non Mycorrhizal-Marigold, N2: Non Mycorrhizal-Ornamental cabbage, N3: Non Mycorrhizal-Gladiolus).

غلظت‌های مختلف سرب مشاهده نشد. همچنین در این گیاه، همزیستی میکوریز تفاوت معنی‌داری در وزن خشک ریشه و اندام هوایی در غلظت‌های مختلف سرب، ایجاد نکرد (شکل ۲).

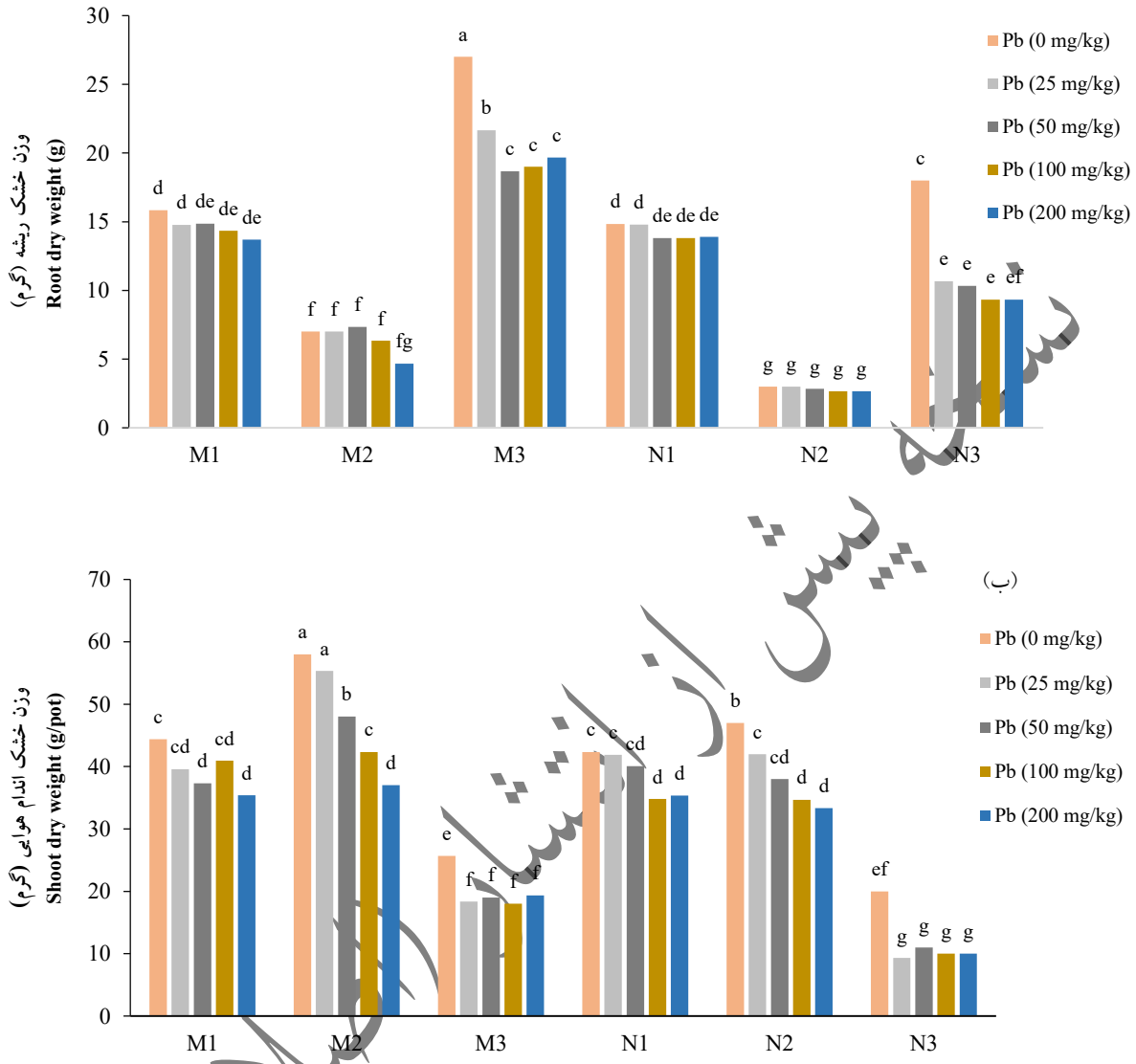
بررسی اثرات برهم‌کنش گیاه، میکوریز و سرب بر غلظت کلروفیل کل نیز نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار (سطح یک درصد) بین مقادیر این ویژگی در تیمارهای مختلف بود (شکل ۳). همزیستی میکوریز با ریشه هر سه گیاه گل جعفری، کلم زینتی و گلایول سبب افزایش معنی‌دار غلظت کلروفیل کل در مقایسه با تیمارهای بدون میکوریز شد (شکل ۳). از طرف دیگر با افزایش غلظت سرب از صفر به ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، غلظت کلروفیل در تمام تیمارها کاهش معنی‌داری یافت. بیشترین غلظت کلروفیل در تیمارهای شاهد گل جعفری و کلم زینتی و کمترین غلظت کلروفیل در تیمارهای مربوط به غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد.

بررسی اثرات برهم‌کنش گیاه، میکوریز و سرب بر میانگین غلظت و جذب سرب در اندام هوایی و جذب سرب در ریشه گیاه، نشان داد با افزایش سطح سرب خاک از صفر به ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، غلظت سرب در اندام هوایی و جذب آن در اندام هوایی و ریشه هر سه گیاه کلم زینتی، گل جعفری و گلایول افزایش معنی‌داری (سطح یک درصد) یافته است (شکل ۴). در گلایول و گل جعفری، همزیستی میکوریز سبب کاهش معنی‌دار غلظت و جذب سرب در اندام هوایی این گیاهان، در مقایسه با شرایط بدون همزیستی میکوریز شد، در مقابل در کلم زینتی، همزیستی میکوریز اثر معنی‌داری بر غلظت و جذب سرب، در اندام هوایی این گیاه نداشت. از طرف دیگر همزیستی میکوریز، سبب افزایش معنی‌دار جذب سرب در ریشه هر سه گیاه در مقایسه با تیمار بدون همزیستی شد (شکل ۴- ج).

بررسی اثرات برهم‌کنش گیاه، میکوریز و سرب بر فاکتور تجمع زیستی سرب در اندام هوایی گیاه نیز نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار (سطح یک درصد) بین مقادیر این ویژگی در تیمارهای مختلف بود (جدول ۴). همزیستی میکوریز با ریشه

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]



شکل ۲. مقایسه میانگین اثرات برهم‌کنش گیاه، میکوریز و سرب بر وزن خشک ریشه (الف) و اندام هوایی (ب)؛ ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند (M1: میکوریز- گل جعفری، M2: میکوریز- کلم زینتی، M3: میکوریز- گلایول، N1: بدون میکوریز- گل جعفری، N2: بدون میکوریز- کلم زینتی، N3: بدون میکوریز- گلایول).

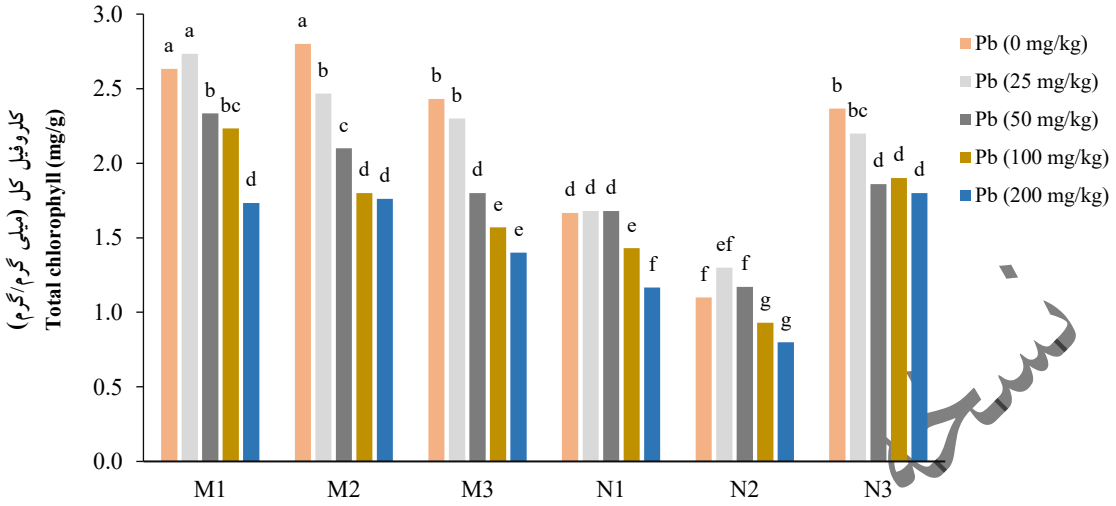
Fig. 1. Mean comparisons of interaction effect of plant, mycorrhizal, and lead on dry weight of root and shoot; Bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$) (M1: Mycorrhizal-Marigold, M2: Mycorrhizal-Ornamental cabbage, M3: Mycorrhizal-Gladiolus, N1: Non Mycorrhizal-Marigold,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

گیاهان گل جعفری و گلایول باعث کاهش فاکتور تجمع زیستی سرب در اندام هوایی این گیاهان شده است. در مقابل همزیستی میکوریز با ریشه کلم زینتی، افزایش معنی‌دار BCF سرب در اندام هوایی این گیاه را به همراه داشته است (جدول ۴).

بحث

توان جذب و انتقال عناصر سنگین در گونه‌های مختلف گیاهی، با توجه به تنوع ژنتیکی گونه‌های گیاهی، متفاوت است. علاوه بر نوع گونه گیاهی، مدت زمان قرارگیری گیاه در معرض فلزات سنگین نیز بر غلظت آلاینده‌ها در گیاه مؤثر بوده و در نتیجه بر

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]



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

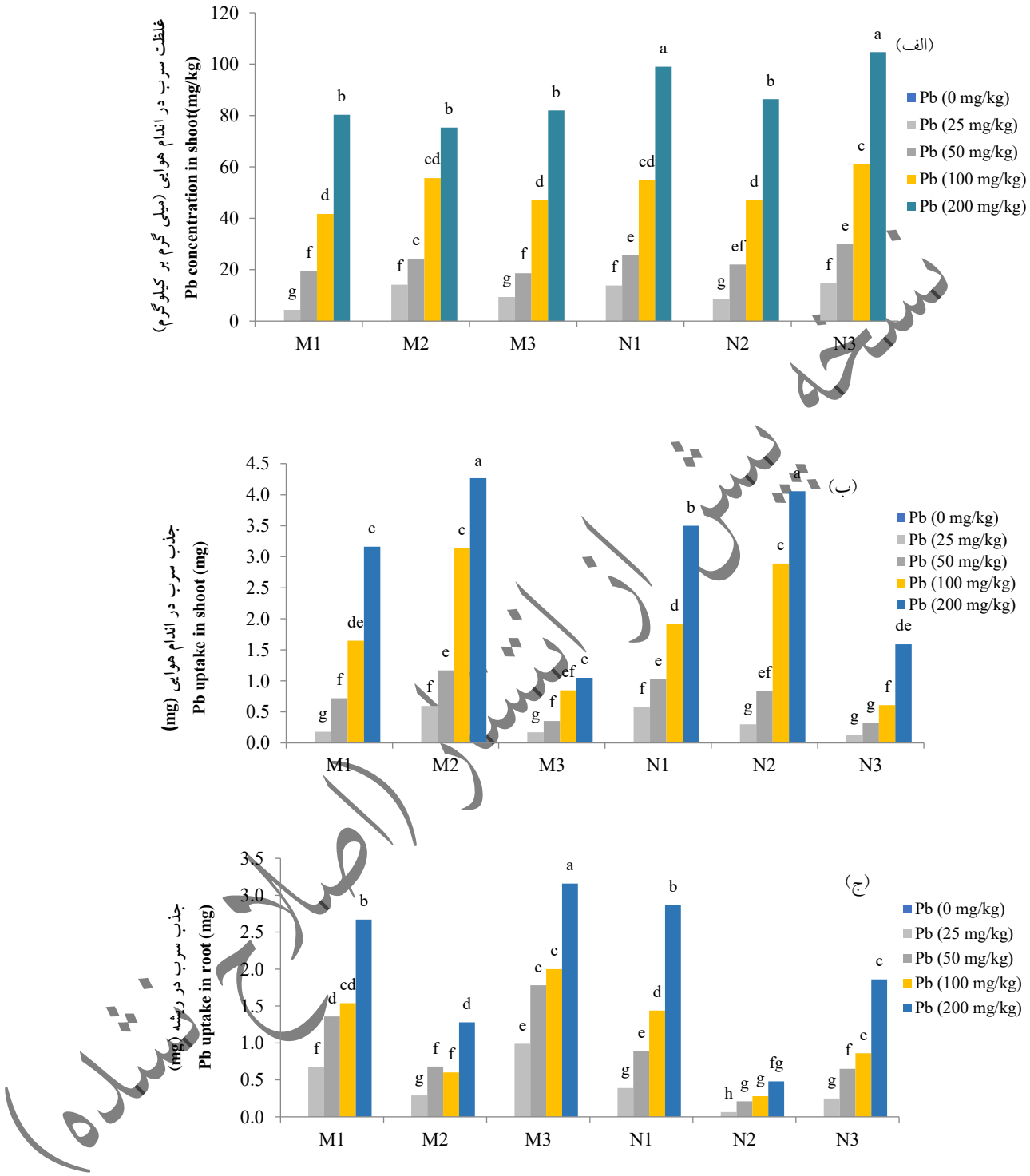
Fig. 5. Mean comparisons of interaction effect of plant, mycorrhizal, and lead on chlorophyll content of plant; Bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$) (M1: Mycorrhizal-Marigold, M2: Mycorrhizal-Ornamental cabbage, M3: Mycorrhizal-Gladiolus, N1: Non Mycorrhizal-Marigold, N2: Non Mycorrhizal-Ornamental cabbage, N3: Non Mycorrhizal-Gladiolus).

فاکتور انتقال گیاهی این فلزات اثر می‌گذارد (Peris et al., 2007). در این پژوهش مقایسه میانگین اثرات ساده نوع گیاه، میکوریز و سرب نشان داد که بیشترین جذب سرب در ریشه گل جعفری و گلایول (به‌ترتیب ۱/۲۱ و ۱/۱۷ میلی‌گرم) و در بخش هوایی کلم زینتی (۱/۸۵ میلی‌گرم) رخ داده است (جدول ۳). همچنین مشاهده شد که غلظت سرب در هر دو بخش ریشه و اندام هوایی گیاهان تابع غلظت آن در خاک است و با افزایش غلظت این عنصر در خاک، افزایش معنی‌داری در غلظت سرب در هر دو بخش گیاه ثبت شد (جدول ۳). همزیستی میکوریز نیز سبب افزایش معنی‌دار جذب سرب در ریشه و کاهش معنی‌دار جذب سرب در اندام هوایی گیاهان در مقایسه با تیمار بدون میکوریز شد (جدول ۳). نتایج پژوهش Asadi Kapourchal (2021) نیز نشان داد با افزایش غلظت سرب در خاک، غلظت این عنصر در داخل گیاه نیز افزایش می‌یابد و به‌طور میانگین غلظت سرب در ریشه ۵ برابر غلظت آن در بخش هوایی ترب سفید است.

با افزایش غلظت سرب در خاک از سطح ۲۵ به ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، فاکتور انتقال در گیاه نیز افزایش معنی‌داری یافت و از ۰/۳۱ به ۰/۵۴ رسیده است. از طرف دیگر فاکتور انتقال در گیاهان گل جعفری، کلم زینتی و گلایول در محدوده ۵/۶۷-۰/۰ قرار داشت و فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد، با یکدیگر بود. در همین زمینه Cui et al., (2004) مقادیر TF سرب را برای گیاهان خردل و تاج خروس به‌ترتیب ۰/۰۱۷ و ۰/۰۲۳ به‌دست آورند. Dodangeh et al., (2018) نیز مقادیر TF سرب را برای سه نوع گیاه زینتی بین ۰/۱ تا ۰/۴ گزارش کردند. بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته عنصر سرب دارای کمترین میزان فاکتور انتقال می‌باشد، زیرا انتقال سرب از ریشه به برگ‌های بالایی به‌سختی صورت می‌گیرد. سرب تقریباً با شدت به دیواره سلولی متصل می‌شود و از عناصری است که قابلیت انتقال کمی داشته و به همین دلیل سرب جذب شده از خاک اغلب در ریشه باقی می‌ماند. از مهم‌ترین دلایل تجمع بیشتر سرب در ریشه نسبت به اندام هوایی را می‌توان ممانعت حلقه کاسپاری، تحرک کم و در نتیجه رسوب سرب در دیواره‌های سلولی

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]



شکل ۴. مقایسه میانگین اثرات برهم‌کنش گیاه، میکوریز و سرب بر غلظت (الف) و جذب (ب) سرب در اندام هوایی و جذب سرب در ریشه (ج) گیاه؛ ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند (M1: میکوریز- گل جعفری، M2: میکوریز- کلم زینتی، M3: میکوریز- گلایول، N1: بدون میکوریز- گل جعفری، N2: بدون میکوریز- کلم زینتی، N3: بدون میکوریز- گلایول).

Fig. 3. Mean comparisons of interaction effect of plant, mycorrhizal, and lead on Pb concentration (a) and Pb uptake in plant shoot (b) and Pb uptake in plant roor (c); Bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$) (M1: Mycorrhizal-Marigold, M2: Mycorrhizal-Ornamental cabbage, M3: Mycorrhizal- Gladiolus, N1: Non Mycorrhizal-Marigold, N2: Non Mycorrhizal-Ornamental cabbage, N3: Non Mycorrhizal-Gladiolus).

نسخه پیش از انتشار (اصلاح نشده)

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]

جدول ۴. مقایسه میانگین اثرات برهم‌کنش گیاه، میکوریز و سرب بر BCF سرب در اندام هوایی.

Table 4. Mean comparisons of interaction effect of plant, mycorrhizal, and lead on shoot BCFs of lead.

	سرب (Pb)				
	0 mg/kg	25 mg/kg	50 mg/kg	100 mg/kg	200 mg/kg
گل جعفری- میکوریز	0f	0.30e	0.46c	0.47c	0.44cd
کلم زینتی- میکوریز	0f	0.63a	0.59b	0.63a	0.41d
گلایول- میکوریز	0f	0.57b	0.43cd	0.55b	0.45cd
گل جعفری- بدون میکوریز	0f	0.64a	0.55b	0.50c	0.54b
کلم زینتی- بدون میکوریز	0f	0.39d	0.48c	0.48c	0.45cd
گلایول- بدون میکوریز	0f	0.68a	0.63a	0.67a	0.53b

میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند (براساس آزمون LSD).

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

اندام ریشه دانست (Kabato and Pendias, 1992).

در این مطالعه، هر ۳ گیاه کلم زینتی، گل جعفری و گلایول تحت تیمار میکوریز آربسکولار سطح بالایی از کلونیزاسیون (۹۶-۹۱ درصد) را در تیمارهای شاهد و ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، نشان دادند، درحالی‌که درصد کلونیزاسیون در گیاهان با افزایش سطح سرب در خاک از ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، کاهش یافت (شکل ۱). به‌طور کلی کلونیزاسیون میکوریز آربسکولار در دو گونه گل جعفری و کلم زینتی بسیار مؤثر بود و حتی تحت بالاترین تنش سرب، به‌ترتیب ۸۱/۷ و ۷۵ درصد کلونیزاسیون را حفظ کرد، درصورتی‌که در گلایول درصد کلونیزاسیون در تنش ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، به ۳۹ درصد رسید که ممکن است به‌دلیل کاهش گسترش جانبی ریشه در مقایسه با گل جعفری و کلم زینتی باشد که سبب محدودشدن حجم فضایی تبادل مواد مغذی می‌شود. Gao et al., (2023) تأکید کردند که کلونیزاسیون بالای میکوریز آربسکولار در حضور فلزات سنگین اغلب با بهبود جذب مواد مغذی و کاهش تنش همراه است، درحالی‌که Li et al., (2023) افزایش جذب ریشه و تولید اسید آمینه مرتبط با کلونیزاسیون میکوریز آربسکولار را در گیاهان در معرض کادمیوم گزارش کردند. این یافته‌ها در مجموع تأیید می‌کنند که کلونیزاسیون تحت حمایت میکوریز آربسکولار از طریق بهبود عملکرد زیرزمینی و مدیریت مواد مغذی، تاب‌آوری را در برابر تنش سرب افزایش می‌دهد.

از طرف دیگر در این پژوهش تلقیح قارچ میکوریز آربسکولار به‌طور معنی‌داری وزن خشک بخش هوایی و ریشه گلایول و کلم زینتی را در تمام غلظت‌های سرب افزایش داد (شکل ۲). این افزایش احتمالاً ناشی از افزایش جذب مواد مغذی (مانند فسفر) و آب توسط قارچ میکوریز آربسکولار و افزایش تولید گلومالین است که باعث کاهش تحرک فلزات در ناحیه ریزوسفر شده و فراهمی زیستی آن‌ها را کاهش می‌دهند (Zhipeng et al., 2016; Boorboori and Zhang, 2022). علاوه بر این، هیف‌های قارچ میکوریز آربسکولار با گسترش سطح جذب ریشه، جذب مواد مغذی را تسهیل می‌کنند درحالی‌که فلزات را در ساختارهای قارچی جدا می‌کنند 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 قارچ میکوریز آربسکولار را در افزایش رشد گیاهان آقاقیا (*Robinia pseudoacacia*) و کلم چینی (*Brassica chinensis*) در مقایسه با تیمار بدون تلقیح قارچ میکوریز، در تنش شدید فلز سرب گزارش کردند.

براساس یافته‌های این پژوهش گیاهان تلقیح‌شده میزان کلروفیل کل بالاتری (۲/۸۳-۱/۷۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) نشان دادند (شکل ۳). بالاترین مقادیر در تیمارهای شاهد جعفری

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]

زینتی و کلم زینتی حاوی قارچ میکوریز در غلظت ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب (۲/۷۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد. در مقابل، گیاهان تلقیح‌نشده با قارچ میکوریز آربسکولار سطح کلروفیل پایین‌تری داشتند که از ۲/۳۷ تا ۰/۸۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر متغیر بود. از طرف دیگر با افزایش غلظت سرب از صفر به ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، غلظت کلروفیل در تمام تیمارها کاهش معنی‌داری یافت. به نظر می‌رسد دلیل کاهش میزان کلروفیل برگ در اثر آلودگی سرب، کاهش بیوسنتز کلروفیل از طریق کاهش غلظت عناصر ضروری منیزیم و آهن در برگ‌ها و ایجاد کمپلکس با پروتئین‌های فتوسنتزی و افزایش فعالیت کلروفیلاز جهت 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 گردد (Sharma and Dubey, 2005).

نتایج تجزیه واریانس اثرات برهم‌کنش معنی‌داری از قارچ میکوریز آربسکولار، غلظت سرب و نوع گیاه بر غلظت و جذب سرب در اندام هوایی و جذب سرب در ریشه نشان داد (جدول ۱). با افزایش غلظت سرب در خاک، غلظت و جذب سرب در اندام هوایی و جذب سرب در ریشه همه گیاهان در تمام تیمارها افزایش معنی‌داری یافت (شکل ۴). تلقیح میکوریز در گلایول و گل جعفری منجر به کاهش معنی‌دار غلظت سرب در اندام هوایی این دو گیاه شد، در مقابل در کلم زینتی اثر معنی‌داری مشاهده نشد. اما همزیستی میکوریز در ریشه هر سه گیاه، افزایش جذب سرب در مقایسه با تیمار بدون همزیستی میکوریز را درپی داشت (شکل ۴-ج). جذب سرب در ریشه‌های کلم زینتی تلقیح‌شده با میکوریز آربسکولار، ۱/۲۸-۰/۲۹ میلی‌گرم در تیمارهای مختلف سرب (۲۰۰-۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و در ریشه‌های کلم زینتی تلقیح‌نشده، ۰/۴۸-۰/۰۷ میلی‌گرم بود. بنابراین تلقیح میکوریز آربسکولار سبب افزایش ۴/۱-۲/۶ برابری جذب سرب در ریشه کلم زینتی در مقایسه با تیمار بدون میکوریز، شد. افزایش جذب سرب در ریشه گل جعفری و گلایول نیز در اثر تلقیح میکوریز آربسکولار در تیمارهای مختلف سرب به‌ترتیب ۱/۷-۱ برابر و ۴-۱/۷ برابر بود. Zhipeng et al., (2016) کاهش غلظت سرب در گیاه *B. chinensis* را به‌دلیل تلقیح میکوریز آربسکولار گزارش کردند که در آن تیمار میکوریز آربسکولار، کاهش ۲۰/۶ تا ۶۷/۵ درصدی سطح سرب در این گیاه را به‌همراه داشت. کاهش‌های مشاهده‌شده احتمالاً به‌دلیل مکانیسم‌های مختلفی از جمله بی‌حرکت کردن سرب توسط ساختارهای قارچی، تغییرات در شیمی ریزوسفر و بهبود جذب مواد مغذی و آب است که نفوذپذیری ناشی از تنش را در بافت‌های گیاهی کاهش می‌دهد. میکوریز آربسکولار همچنین ممکن است سرب را در هیف‌های قارچی جدا کند یا ترشحات ریشه را تحریک کند که سرب را کمپلکس کرده و تحرک آن را محدود می‌کند. مطالعه Yang et al., (2015) نشان داد که میکوریز آربسکولار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را افزایش داده و آسیب اکسیداتیو را در گیاهان تحت تنش سرب کاهش می‌دهد که نشان می‌دهد دفع سرب ممکن است با افزایش ظرفیت سم‌زدایی در ریشه‌های کلونیزه شده با میکوریز آربسکولار تکمیل شود. یکی دیگر از دلایل تحمل نسبی گیاهان نسبت به مقادیر زیاد سرب، تشکیل ترکیبات نامحلول پیروفسفات در دیواره سلولی است که مانع از انتقال این عنصر به اندام‌های هوایی و بخش‌های دیگر می‌شود که این 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 کلزا نیز افزایش یافت، به‌علت تحرک کم عناصر سنگین در گیاه، تجمع عناصر در ریشه بیش از سایر اندام‌ها بود.

نتایج این مطالعه نشان داد که گیاه کلم زینتی تلقیح‌شده با میکوریز آربسکولار، الگوهای متمایزی از تجمع فلز را نشان می‌دهد، به‌عبارت دیگر BCF اندام هوایی در تیمار قارچ میکوریز آربسکولار در گیاه کلم زینتی، بیشتر از تیمار بدون تلقیح قارچ بود و به حداکثر ۰/۶۳ در تیمار کلم زینتی در تلقیح با میکوریز آربسکولار رسید (جدول ۴). درحالی‌که در گلایول و گل جعفری BCF اندام هوایی در تیمار قارچ میکوریز آربسکولار کمتر از

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]

تیمار بدون تلقیح قارچ بود. ساختارهای قارچی، مانند آربسکول‌ها و وزیکول‌ها، ممکن است به‌عنوان مخزن‌های فلزی عمل کنند، یون‌های سمی را جدا کرده و حرکت آن‌ها را به بافت‌های حساس گیاه محدود کنند، همان‌طور که در مطالعات 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 می‌دهند و سطح جذب مواد مغذی و فلز را افزایش می‌دهند و در عین‌حال جذب کنترل‌شده را ممکن می‌سازند (Simard et al., 2012). گلومالین که توسط قارچ میکوریز آربسکولار تولید می‌شوند، نیز بیشتر به بی‌حرکت کردن فلزات در ریزوسفر کمک می‌کند (Zhu et al., 2019). اتصال از طریق گروه‌های عاملی مانند گروه‌های فسفات و سولفیدریل نیز، فلزات را به اشکال با زیست‌فراهمی کمتر، مانند کمپلکس‌های اگزالات تبدیل می‌کند (Wang et al., 2012).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی توان گیاه‌پالایی سرب از خاک آلوده توسط گیاهان کلم زینتی، گل جعفری و گلایول در همزیستی با قارچ میکوریز آربسکولار در یک محیط گلخانه‌ای پرداخته شد. نتایج نشان داد در بین سه گیاه مورد مطالعه، همزیستی میکوریز با گلایول، نقش مؤثرتری در میزان جذب سرب از خاک دارد. همزیستی میکوریز در گلایول و گل جعفری تحت تنش سرب، اثرات نسبتاً یکسانی در افزایش میزان کلروفیل، افزایش جذب سرب توسط ریشه، کاهش غلظت و جذب سرب در اندام هوایی و کاهش BCF اندام هوایی این گیاهان در مقایسه با تیمار بدون همزیستی میکوریز داشت. در مقابل، همزیستی میکوریز باعث افزایش وزن خشک ریشه و اندام هوایی در گلایول تحت تنش سرب، در مقایسه با تیمار بدون همزیستی میکوریز شد اما بر وزن خشک ریشه و اندام هوایی گل جعفری اثر معنی‌داری نداشت. در کلم زینتی نیز اثر همزیستی میکوریز بر افزایش وزن خشک ریشه و اندام هوایی، افزایش میزان کلروفیل، افزایش جذب سرب در ریشه همانند گلایول بود، اما BCF اندام هوایی برخلاف گل جعفری و گلایول، افزایش یافت. این مشاهدات تأیید می‌کند که گیاه‌پالایی سرب از خاک با واسطه میکوریز آربسکولار وابسته به گونه است.

این آزمایش تحت شرایط گلخانه‌ای انجام شد که ممکن است به‌طور کامل پیچیدگی محیط‌های مزرعه، از جمله تعامل با جوامع میکروبی بومی، شرایط غیرزیستی متغیر و قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض آلاینده‌ها را درنظر نگیرد. علاوه بر این، تنها از یک گونه قارچ میکوریز استفاده شد که تعمیم‌پذیری یافته‌ها را در گونه‌های مختلف قارچی و زمینه‌های اکولوژیکی محدود می‌کند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده با ترکیب آزمایش‌های چند فصلی و میدانی با استفاده از طیف وسیع‌تری از سویه‌های قارچ میکوریز و گونه‌های گیاهی، انجام شود. همچنین با توجه به این‌که بررسی مکانیسم‌های مولکولی و فیزیولوژیکی تحمل فلزات سنگین ناشی از قارچ میکوریز و همچنین پایداری طولانی‌مدت این اثرات، بینش عمیق‌تری در مورد کاربرد عملی آن‌ها ارائه می‌دهد، پیشنهاد می‌شود مطالعات بیشتری در این زمینه صورت گیرد.

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 منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورد استفاده

References

1. 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.

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]

2. 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.
3. Asadi Kapourchal., 2021. Assessing uptake indices and clean up time of lead in contaminated soil using White Horseradish (*Raphanus sativus* cv. Longipinnatus). Iranian J. Soil Water Res. 52 (12), 3099–3108. https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.333746.669126
4. 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: Chimical and Microbiological Properties. 2nd ed, Agronomy Monograph No. 9, American Socitey of Agronomy, Madison, WI, USA, pp. 323–334.
5. 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.
6. 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
7. 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, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 595–624.
8. 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
9. Cui, Y. J., Zhu, Y. G., Zhai, R. H., Chen, D. Y., Huang, Y. Z., Qiu, Y. and 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
10. Deepika., Haritash, A.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. and 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
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. Agronomy Monograph No. 9, 2nd edn, American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 383–411. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15
15. Glinska, S., Michlewska, S., Gapin ska, 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. Edition, CRC Press, Boca Raton. pp. 365.
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. 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.
22. 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

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]

23. 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
24. 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
25. 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
26. 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
27. 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
28. 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)
29. 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
30. 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
31. 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.
32. Nedaee Ziabari, S.Z., Sedaghathoor, S.H., Kaviani, B., Banisad, 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
33. Olsen, S.R., Sommers, L.E., 1982. Phosphorus.In: Page, A.L. (Ed.), Methods of soil analysis, Agron, No. 9,. (Part 2): Chemical and Microbiological Properties, 2th ed, Society of Agronomy, Madison, WI, USA, pp. 403–430. American https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c2
34. 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
35. Sadusky, M.C., Sparks, D.L., Noll, M.R., Hendricks, G.J., 1987. Kinetics and mechanisms of potassium release from sandy middle AtlanticCoastal plain soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 1460–1465. https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100060011x.
36. Salehi, A., Tabari Kouchaksaraei, M., Mohammadi Goltapeh, E., Shirvany, A., Mirzaei, J., 2016. Effect of mycorrhizal inoculation on black and white poplar in a leadpolluted soil. J. For. Sci. 62, 223–228. (In Persian with English abstract)
37. 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
38. 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)
39. 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.
40. 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
41. 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.
42. 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.
43. 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
44. 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

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]

45. 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.
46. 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.
47. 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/1 0.1016/S1002-0160(15)60018-2.
48. 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.

نسخه پیش از انتشار (اصلاح نشده)

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-07-06]