فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۴، شماره ۶۹، آذر و دی‌ماه ۱۴۰۴ صفحه: ۱۵۷-۱۷۳
https://doi.org/10.22034/14.69.157

مقاله پژوهشی

بررسی تأثیر باکتری محرک رشد *Pseudomonas fluorescens* و قارچ‌های میکوریزا (*Glomus* spp.) بر جذب سرب و روی در گیاه ذرت (*Zea mays*)

محبوبه رشیدی و احمد مهتدی*

گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۶/۲۶)

چکیده

آلودگی فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین تهدیدات زیست‌محیطی در اکوسیستم‌های کشاورزی است که منجر به اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیک و رشد گیاهان می‌گردد. این پژوهش با هدف بررسی کاربرد باکتری محرک رشد *Pseudomonas fluorescens* و قارچ‌های میکوریزا (*Glomus* spp.) به‌صورت انفرادی و تلفیقی، در جذب عناصر سرب و روی در گیاه ذرت (*Zea mays*) به‌صورت گلدانی در آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهی دانشکده علوم پایه دانشگاه یاسوج اجرا شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. عامل آزمایشی شامل چهار سطح تیماری از کودهای زیستی (شاهد (بدون کود زیستی)، قارچ میکوریزا، باکتری سودوموناس فلورسنس و کاربرد تلفیقی کودهای زیستی) بود. صفات فیزیولوژیک شامل محتوای عناصر سنگین (سرب و روی) در ریشه و اندام هوایی، شاخص کلروفیل برگ، محتوای نسبی آب، درصد نشت الکترولیت و شاخص‌های رشد گیاه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که کاربرد تلفیقی کودهای زیستی موجب افزایش ۲/۰۱ برابری محتوای سرب ریشه و افزایش ۴/۳۱ برابری سرب اندام هوایی گیاه ذرت نسبت به شاهد شد اما استفاده تلفیقی از کودهای زیستی باعث کاهش میزان روی در ریشه و اندام هوایی ذرت شد. کاربرد تلفیقی کودهای زیستی باعث افزایش ۱۷/۸۳ درصدی محتوای نسبی آب گیاه ذرت نسبت به شاهد شد. با توجه به نتایج چنین استنباط می‌شود که کاربرد تلفیقی کودهای زیستی باعث افزایش استخراج گیاهی سرب توسط گیاه ذرت گردید. یافته‌ها تأکید می‌کنند که بهره‌گیری از رویکردهای زیستی، به‌ویژه تلفیقی، می‌تواند گامی مهم در جهت کشاورزی پایدار و مدیریت آلودگی خاک باشد.

واژه‌های کلیدی: صفات فیزیولوژیک، فاکتور انتقال، فلزات سنگین، کود زیستی

مقدمه

رشد فزاینده فعالیت‌های صنعتی، معدنی و کشاورزی موجب ورود مقادیر بالایی از فلزات سنگین مانند سرب و روی به خاک شده است؛ عناصری که به‌دلیل پایداری شیمیایی و زیست‌ماندگاری بالا، موجب برهم خوردن چرخه‌های زیستی و کاهش حاصلخیزی خاک می‌شوند (عظیم‌زاده و شریعتمداری، ۱۳۹۲؛ قادریان و نصوحی، ۱۳۹۳). استفاده از پساب‌ها و فاضلاب‌های خانگی و همچنین استفاده بی‌رویه از برخی کودهای شیمیایی نیز منجر به افزایش محتوای فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی و آلودگی زیست‌محیطی شده است (دستک‌زن و همکاران، ۱۴۰۴). این فلزات با اختلال در جذب عناصر ضروری، تعادل اسمزی و فرآیندهایی مانند فتوسنتز و

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: a.mohtadi@yu.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.157]

تنفس، رشد گیاهان را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند (Bharti and Sharma, 2021). فلزات سنگین سمی‌ترین آلاینده‌های معدنی هستند که وجودشان در خاک یا منشاء طبیعی داشته و یا در نتیجه فعالیت‌های بشری به محیط زیست وارد می‌شوند (رسولی صدقیانی و همکاران، ۱۳۹۲). در بین فلزات سنگین، سرب دارای اهمیت ویژه‌ای است، زیرا به راحتی توسط ریشه‌ای گیاه جذب می‌شود و سمیت آن برای گیاه بین ۲ تا ۲۰ برابر سایر فلزهای سنگین است. سرب یکی از ماندگارترین فلزها است که می‌تواند ۵۰ تا ۱۵۰ سال در خاک باقی بماند. این عنصر با ورود به زنجیره غذایی، در بدن انسان و حیوانات تجمع می‌یابد و با ایجاد جهش، اثرات سرطان‌زایی ایجاد می‌کند (محکمی و همکاران، ۱۳۹۷). فلز روی یک عنصر ضروری برای رشد و نمو گیاهان به‌شمار می‌رود و در تعداد زیادی از واکنش‌های متابولیک گیاه نقش دارد. بیشتر خاک‌های کشاورزی دارای میزان روی در محدوده ۱۰-۳۰۰ میکروگرم روی در گرم خاک هستند (Noulas *et al.*, 2018).

خاک‌های آلوده به فلزات سنگین علاوه بر تأثیرشان بر سلامتی جوامع، نیازمند صرف هزینه‌های زیادی برای حذف و جایگزینی هستند. از این‌رو فناوری‌های مؤثر و ارزان برای بازیابی اراضی آلوده توسعه‌یافته است. گیاه‌پالایی یکی از این فناوری‌ها است که در آن از توانایی گیاهان و همزیستی گیاهان و میکروارگانیسم‌های خاک در جذب و پالایش آلاینده‌های خاک توسط گیاهان استفاده می‌شود (رسولی صدقیانی و همکاران، ۱۳۹۲). برای موفقیت در گیاه‌پالایی استفاده از گیاهان با زیست‌توده بالا پیشنهاد شده است. از جمله گیاهان با زیست‌توده بالا می‌توان به ذرت، پنبه، آفتابگردان، خردل‌هندی و کلزا اشاره نمود (Vassilev *et al.*, 2002). استفاده از هم‌زیستی میان میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه از جمله ریزوباکتری‌های محرک رشد (PGPR) و قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار (AMF) در افزایش جذب فلزات سنگین توسط گیاهان، افزایش تحمل گیاهان به غلظت‌های بالای فلزات سنگین در محیط رشد و بهبود وضعیت رشد و تغذیه‌ای گیاهان یکی از روش‌های مؤثر و مطمئن در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین است (de Andrade *et al.*, 2008; Glick, 2012). این میکروارگانیسم‌ها با بهبود جذب عناصر غذایی، ترشح هورمون‌های رشد و کاهش سمیت فلزات، به تقویت عملکرد گیاهان در خاک‌های آلوده کمک می‌کنند (محکمی و همکاران، ۱۳۹۷). ریسه‌های قارچی می‌توانند چندین سانتی‌متر در داخل خاک رشد کنند و مقادیر زیادی عناصر غذایی از قبیل فلزات سنگین را جذب نموده و به ریشه گیاه میزبان منتقل نمایند (رسولی صدقیانی و همکاران، ۱۳۹۲). ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه، علاوه بر نقشی که در حفاظت از گیاهان در مقابل سمیت فلزات سنگین بر عهده دارند، در بهبود حاصل‌خیزی خاک و افزایش بازدهی گیاهان زراعی نیز نقش دارند (نادری و نادری، ۱۳۹۴).

در سال‌های اخیر به‌منظور کاهش یا برداشت فلزات سنگین موجود در محیط آلوده، مطالعه زیستی رایزوسفر از جمله میکروارگانیسم‌های مفید خاکزی بسیار مورد توجه قرار گرفته است (ثابتی و همکاران، ۱۴۰۳). با وجود مطالعات متعدد درباره نقش مستقل این میکروارگانیسم‌ها، تأثیر ترکیبی آن‌ها در شرایط واقعی خاک هنوز به‌طور کامل بررسی نشده است (دلاورنیا و همکاران، ۱۴۰۰؛ Miransari, 2017). ذرت (*Zea mays*) به‌عنوان گیاهی زراعی ظرفیت بالایی در پالایش فلزات دارد، اما اطلاعات کافی درباره واکنش آن به کاربرد هم‌زمان کودهای زیستی در دست نیست. بر این اساس، مطالعه حاضر با هدف بررسی اثرات کاربرد انفرادی و تلفیقی باکتری محرک رشد *P. fluorescens* و قارچ میکوریزا آربوسکولار (*Glomus* spp.) بر جذب سرب و روی، و نیز بررسی شاخص‌های رشد و فیزیولوژی در گیاه ذرت انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش گلدانی در سال ۱۴۰۳ به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهی دانشکده علوم پایه دانشگاه یاسوج انجام شد. تیمارهای

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.157]

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

بافت خاک	رس	لای	شن	کربن آلی	اسیدیته
	(درصد)				
لومی شنی	۱۶	۲۰	۶۴	۰/۳۴	۷/۷۶

جدول ۲- مقدار کل فلزات سنگین در خاک و مقدار فلزات سنگین قابل دسترس خاک

	نیکل	کادمیوم	آهن	روی	سرب
	(میکروگرم بر گرم)				
مقدار کل فلزات سنگین در خاک	۸۴/۲۳	۴/۰۹	۲۹۴۹۸	۳۱۴۷۲	۵۱۸۸۶
مقدار فلزات سنگین قابل دسترس خاک	۳۶/۰۹	۱/۸۰	۱۳۲	۵۰۳۹	۵۸۸۵

آزمایش شامل شاهد بدون کاربرد کود زیستی، کاربرد باکتری محرک رشد *P. fluorescens*، کاربرد قارچ میکوریزا آرباسکولار گلوموس (*Glomus* spp.) و کاربرد تلفیقی قارچ و باکتری بود. بذر ذرت رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شد. باکتری محرک رشد *P. fluorescens* از آزمایشگاه بیولوژی خاک مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور واقع در کرج تهیه شد که جمعیت آن در حدود 10^8 باکتری در میلی‌لیتر بود. قارچ میکوریزا آرباسکولار گلوموس (*Glomus* spp.) از شرکت زیست‌فناور پیشتاز واریان کرج تهیه شد. نمونه خاک در این پژوهش از معدن سرب و روی ایرانکوه اصفهان برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد که نتایج آزمون خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و مقدار فلزات سنگین در نمونه‌های خاک مورد بررسی در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. ابتدا گلدان‌هایی به قطر ۱۵ سانتی‌متر تهیه و با ۱/۵ کیلوگرم خاک الک شده معدن ایرانکوه پر شدند. بذرهای ذرت به‌مدت با محلول هیپوکلریت سدیم ۵ درصد ضدعفونی شد. پس از آن، بذرهای مربوط به تیمار باکتری محرک رشد *P. fluorescens* از طریق تلقیح بذر با مقدار ۲۰ میلی‌لیتر از محیط‌کشت مایع حاوی این باکتری به گلدان‌های مورد نظر تلقیح شد. برای تیمار قارچی (قارچ میکوریزا آرباسکولار گلوموس (*Glomus* spp.))، ۶۰ گرم مایه تلقیح با پتانسیل تقریبی ۲۵۰ پروپاگول در سانتی‌متر مکعب به‌صورت لایه‌ای به ضخامت دو سانتی‌متر قبل از کاشت در گلدان‌های مربوطه و در زیر بذرها اضافه شد. تعداد ۱۰ بذر ذرت رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ در هر گلدان کشت شد. پس از استقرار گیاهچه‌ها و در مرحله چهار برگی بوته‌ها در گلدان تنک و در نهایت پنج بوته در هر گلدان نگه داشته شدند. گیاهان به مدت ۴۰ روز با افزودن آب‌مقطر با فاصله سه روز یک‌بار به صورت زیر گلدانی در گلدان‌های ذکرشده رشد داده شدند.

اندازه‌گیری صفات گیاهی: بعد از گذشت ۴۰ روز از سبز شدن و رشد بوته‌ها برای اندازه‌گیری طول و وزن خشک گیاهان، بخش هوایی و ریشه گیاهان به صورت جداگانه برداشت و طول آن‌ها اندازه‌گیری شد. ریشه و بخش هوایی گیاهان مربوط به هر گلدان، درون آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت کاملاً خشک شدند. سپس وزن خشک آن‌ها با ترازوی دیجیتال مدل TE153S برحسب گرم اندازه‌گیری شد.

مقدار کلروفیل گیاهان با دستگاه کلروفیل‌سنج (SPAD-502 Plus) به صورت میانگین سه برگ انتخابی از هر گیاه اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری نشت الکترولیت، از برگ‌های جوان توسعه‌یافته نمونه‌هایی به شکل دیسک دایره‌ای به اندازه یکسان تهیه شد. سپس نمونه‌ها در ۳۰ میلی‌لیتر آب‌مقطر و در دمای اتاق و جای تاریک به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد و بعد از آن هدایت الکتریکی هر نمونه با استفاده از ECمتر (Conductivity Meter-P712, China) اندازه‌گیری شد (EC_1).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.157]

در مرحله بعد نمونه‌ها در حمام آب جوش در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۵ دقیقه گذاشته شد و برای بار دوم EC آن‌ها (EC_2) پس از سردشدن بعد از ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد (McKay, 1992).

رابطه ۱: $EC\ (\%) = (EC_1/EC_2) \times 100$

برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ (RWC)، از روش Mishra و Choudhuri (۱۹۹۹) استفاده شد. در نهایت مقدار محتوای نسبی آب برگ‌ها از رابطه ۲ محاسبه شد:

رابطه ۲:

محتوای نسبی آب برگ (٪) = [(وزن خشک – وزن تر)/ (وزن خشک – وزن آماس)] × ۱۰۰

جهت اندازه‌گیری مقدار فلزات در بافت‌های گیاهی ابتدا برای زدودن فلزات چسبیده به سطح ریشه، ریشه گیاهان برداشت شده به‌مدت ۱۵ دقیقه در محلول ۲۰ میلی‌مولار Na_2EDTA قرار داده شدند و سپس با آب‌مقطر بطور کامل شسته شدند. پس از خشک‌شدن بخش هوایی و ریشه در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت، نمونه‌ها کاملاً مخلوط شده و به قطعات کوچک خرد شدند. از هر نمونه ۰/۵ گرم ماده گیاهی برداشته و ۲ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۶۵ درصد به آن‌ها اضافه شد و به مدت ۱۲ ساعت زیر هود قرار داده شدند. در مرحله بعد به مدت دو ساعت در حمام آب‌گرم در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد هضم شدند. پس از سردشدن، یک میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن به آن‌ها اضافه و مجدداً در حمام آب‌گرم در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار داده شدند. پس از سردشدن در دمای آزمایشگاه، حجم نمونه‌ها با افزودن آب‌مقطر به ۱۰ میلی‌لیتر رسانده شد. در نهایت مقادیر فلزات با استفاده از دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی (مدل iCE 3500, Thermo Scientific) اندازه‌گیری شد.

فاکتور انتقال فلز از ریشه به اندام هوایی (TF) از رابطه ۳ محاسبه شد (Jolly *et al.*, 2013):

رابطه ۳:

فاکتور انتقال فلز از ریشه به اندام هوایی (TF)= (غلظت فلز در اندام هوایی)/ (غلظت فلز در ریشه)

محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ و مقایسه میانگین‌ها به روش LSD در سطح احتمال خطای پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

اثر خاک آلوده به فلزات سنگین (سرب و روی) و کودهای زیستی بر محتوای عناصر و ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاه ذرت: خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و مقدار کل فلزات سنگین در نمونه‌های خاک مورد بررسی در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است. برای ارزیابی آلودگی خاک به فلزات سنگین، مقدار کل فلزات و مقدار فلزات سنگین قابل دسترس از جمله سرب، روی، آهن، کادمیوم و نیکل تعیین شد. نتایج این بررسی‌ها اطلاعات ارزشمندی در خصوص شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین قابلیت دسترسی فلزات سنگین برای گیاهان فراهم کرد. نتایج نشان داد که این خاک حاوی میزان بسیار بالای سرب و روی است.

محتوای سرب گیاه ذرت: بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از جدول ۳، اثر تیمار کود زیستی بر محتوای سرب ریشه، سرب اندام هوایی و فاکتور انتقال سرب ذرت، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید.

محتوای سرب ریشه گیاه ذرت: طبق اطلاعات حاصل از مقایسه میانگین‌ها (شکل ۱)، مشاهده شد با کاربرد کودهای زیستی به مقدار سرب انباشته‌شده در ریشه گیاه ذرت افزوده شد. بیشترین محتوای سرب ریشه (۷۹۸۲ میکروگرم بر گرم) در تیمار کاربرد تلفیقی قارچ و باکتری حاصل شد و کم‌ترین محتوای سرب ریشه (۳۹۵۶ میکروگرم بر گرم) در شرایط شاهد حاصل شد.

محتوای سرب اندام هوایی گیاه ذرت: نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد کاربرد کودهای زیستی اثر افزایشی بر مقدار سرب تجمع‌یافته در اندام هوایی ذرت داشت و کاربرد تلفیقی کودهای زیستی بیشترین محتوای سرب اندام هوایی (۱۶۴ میکروگرم بر گرم) را ایجاد نمود، اما در تیمار شاهد کم‌ترین محتوای سرب اندام هوایی (۳۸ میکروگرم بر گرم)

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.157]

جدول ۳- نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر کودهای زیستی بر محتوای سرب ریشه، سرب اندام هوایی و فاکتور انتقال سرب در گیاه ذرت

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		سرب ریشه	سرب اندام هوایی	فاکتور انتقال سرب
کودزیستی	۳	۸۷۷۱۳۲۴**	۸۹۹۰**	۴۰/۹۶**
خطا	۸	۹/۸۰	۹/۸۰	۰/۰۰۰۰۸
ضریب تغییرات	-	۱۰/۶۸	۱۵/۶۸	۱۶/۲۳

** معنی‌داری در سطح احتمال خطای ۱ درصد را نشان می‌دهد.

جدول ۴- نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر کودهای زیستی بر محتوای روی ریشه، روی اندام هوایی و فاکتور انتقال روی در گیاه ذرت

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		محتوای روی ریشه	محتوای روی اندام هوایی	فاکتور انتقال روی
کود زیستی	۳	۴۴۴۷۸۰۰۳**	۳۴۴۰۰۱۲**	۷/۳۹**
خطا	۸	۳۳۴۱۶۴	۱۷۶۶۳۵	۰/۰۱
ضریب تغییرات	-	۸/۶۸	۶/۵۵	۸/۱۷

** معنی‌داری در سطح احتمال خطای ۱ درصد را نشان می‌دهد.

شکل ۱- مقایسه میانگین اثر کود زیستی (باکتری محرک رشد *P. fluorescens* و قارچ میکوریزا آربوسکولار (*Glomus* spp.)) بر محتوای سرب ریشه در ذرت. میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

ذرت ایجاد شد (شکل ۲).

براساس نتایج حاصل، محتوای سرب ریشه ذرت ۱۰۰ برابر بیشتر از محتوای سرب اندام هوایی ذرت بود. تجمع سرب به میزان زیاد در ریشه‌ها می‌تواند یک نکته مثبت تلقی شود، چون این امر مانعی برای انتقال بیشتر آن به اندام‌های هوایی گیاه است که استفاده غذایی دارد. بطورکلی می‌توان بیان کرد که ریشه ذرت در مقایسه با اندام‌های هوایی تحمل بیشتری به غلظت‌های بالای سرب دارد و مقدار بیشتری از سرب را در خود انباشته کرده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از کودهای زیستی می‌تواند تأثیر چشمگیری در افزایش

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.69.157]

شکل ۲- مقایسه میانگین اثر کود زیستی (باکتری محرک رشد *P. fluorescens* و قارچ میکوریزا آربوسکولار (*Glomus* spp.)) بر محتوای سرب اندام هوایی در ذرت. میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

انباشت سرب در ریشه و اندام‌های هوایی گیاهان داشته باشد. افزایش محتوای سرب در ریشه ذرت در شرایط کاربرد قارچ و باکتری، به‌ویژه کاربرد تلفیقی آن‌ها، به‌طور قابل‌توجهی نشان‌دهنده نقش کودهای زیستی در افزایش توانایی گیاه برای انتقال فلزات سنگین به گیاه است و تیمار کودهای زیستی سبب تثبیت مؤثر سرب در ریشه ذرت گردیده است. این افزایش ممکن است به‌دلیل رقابت ریزجانداران با ریشه گیاه برای جذب یون‌های فلزی، ترشح متابولیت‌های ثانویه یا تغییر در خصوصیات شیمیایی خاک باشد (Chen *et al*., 2018). این نتایج با نتایج بسیاری از پژوهشگران مشابه بود برای مثال رسولی صدقیانی و همکاران (۱۳۹۲) گزارش کردند که تلقیح قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار و باکتری‌های سودوموناس سبب افزایش جذب کادمیوم توسط ذرت می‌شود. همچنین Vivas و همکاران (۲۰۰۳) گزارش کردند تلقیح مشترک قارچ میکوریز گلوموس با باکتری باسیلوس در خاک‌های آلوده به کادمیوم جذب کادمیوم در ریشه گیاه شبدر را افزایش می‌دهد. مطالعات کریمی و همکاران (۱۳۹۲) بر روی گیاه بنگ‌دانه نشان داد که قارچ‌های گلوموس و باکتری‌های سودوموناس، مقدار سرب استخراج‌شده توسط شاخساره را به‌ترتیب بیش از ۲/۷ و ۲ و مقدار سرب تثبیت‌شده در ریشه را به‌ترتیب بیش از ۳/۱ و ۱/۹ برابر نسبت به تیمارهای مشابه در شاهد افزایش دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که میکروب‌های مورد مطالعه عواملی نوید بخش برای کاهش سمیت سرب در بنگ‌دانه و افزایش کارآیی پالایش‌سبز سرب توسط گیاه هستند.

همچنین، مشاهده شد که قارچ میکوریزا به‌تنهایی نسبت به باکتری اثر بیشتری در افزایش جذب سرب داشته است. این موضوع می‌تواند ناشی از تفاوت در سازوکارهای عمل این دو نوع کود زیستی باشد. قارچ‌ها عمدتاً از طریق تشکیل شبکه هیف و جذب یون‌های فلزی در اطراف ریشه عمل می‌کنند و جذب عناصر سنگین را افزایش می‌دهند (Gohre and Paszkowski, 2006). اما باکتری به‌تنهایی توانایی مشابهی نداشت. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از کودهای زیستی، به‌ویژه به‌صورت تلفیقی، می‌تواند راهکار مؤثری برای کاهش آلودگی فلزات سنگین در سامانه‌های زراعی باشد و توانایی گیاه ذرت در کنترل ورود مقادیر زیادی از سرب از طریق ریشه به اندام هوایی می‌تواند به‌عنوان نکته مثبت عملکرد این گیاه در شرایط آلوده تلقی شود.

فاکتور انتقال (TF) سرب گیاه ذرت: نتایج فاکتور انتقال سرب در ذرت (شکل ۳) نشان داد که کاربرد تلفیقی کودهای زیستی بالاترین مقدار این شاخص (۰/۰۲) را ایجاد کرد و تیمار شاهد کم‌ترین مقدار آن (۰/۰۰۹) را داشته است به‌طوریکه استفاده تلفیقی از کودهای زیستی نسبت به شاهد

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.157]

شکل ۳- مقایسه میانگین اثرات کود زیستی (باکتری محرک رشد *P. fluorescens* و قارچ میکوریزا آربوسکولار (*Glomus* spp.)) بر فاکتور انتقال سرب در ذرت. میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

باعث افزایش ۱/۲۲ برابری فاکتور انتقال سرب در ذرت شد. اختلاف معنی‌داری میان تیمارهای باکتری و قارچ به تنهایی و در ترکیب با یکدیگر مشاهده نشد.

فاکتور انتقال سرب (TF) که از نسبت غلظت این فلز در اندام‌های هوایی به غلظت آن در ریشه محاسبه می‌شود، معیاری برای سنجش تحرک فلز در گیاه است. افزایش TF در تیمار کودهای زیستی می‌تواند به تعامل مثبت قارچ‌های میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد در افزایش جذب و جابه‌جایی سرب در گیاه مرتبط باشد (Smith and Read, 2008). باکتری‌های محرک رشد گیاه رشد ریسه‌ها و میسیلیوم‌های بیرونی قارچ‌های میکوریز را افزایش می‌دهند (رسولی صدقیانی و همکاران، ۱۳۹۲). قارچ‌های میکوریزا از طریق شبکه هیفی گسترده خود، توانایی گیاه در جذب عناصر از خاک را افزایش می‌دهند. ترشح ترکیباتی نظیر اسیدهای آلی و سیدروفورها از سوی این قارچ‌ها، موجب افزایش حلالیت سرب و تبدیل آن به فرم‌های قابل‌دسترس‌تر برای گیاه می‌شود (Glick, 2012). در کنار آن، باکتری‌های محرک رشد گیاه نیز با تولید فیتوهورمون‌هایی مانند اکسین و جیبرلین، رشد ریشه را تحریک کرده و سطح تماس ریشه با فلزات سنگین موجود در خاک را افزایش می‌دهند.

محتوای روی گیاه ذرت: اثر کود زیستی بر محتوای روی ریشه و اندام هوایی و فاکتور انتقال روی در ذرت، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۴).

محتوای روی ریشه گیاه ذرت: طبق اطلاعات حاصل از مقایسه میانگین‌ها (شکل ۴)، مشاهده شد در تیمار شاهد بیشترین محتوای روی ریشه حاصل شد اما با کاربرد باکتری به‌تنهایی کم‌ترین محتوای روی ریشه ایجاد شد که باعث کاهش ۸۷ درصدی محتوای روی ریشه شد. همچنین بین کاربرد قارچ به‌تنهایی و تلفیق کودهای زیستی نیز اختلاف معنی‌داری ایجاد نشد.

محتوای روی اندام هوایی گیاه ذرت: نتایج مقایسه میانگین برای محتوای روی اندام هوایی گیاه ذرت نشان داد بیشترین محتوای روی اندام هوایی (۷۳۷۹ میکروگرم برگرم) در تیمار شاهد حاصل شد که با تیمار کاربرد قارچ در یک گروه آماری قرار گرفت و کم‌ترین آن (۵۴۷۰ میکروگرم بر گرم) در تیمار کاربرد باکتری به‌تنهایی حاصل شد که با ت یمار تلفیق کودهای زیستی نیز اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۵).

نتایج نشان می‌دهد که تیمار شاهد (بدون کاربرد کودهای زیستی) بالاترین محتوای روی در ریشه و اندام هوایی ذرت را داشته است، در حالیکه کاربرد باکتری به‌تنهایی کمترین محتوای روی را در این بخش‌ها ایجاد کرده است. این

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.69.157]

شکل ۴- مقایسه میانگین اثرات کود زیستی (باکتری محرک رشد *P. fluorescens* و قارچ میکوریزا آربوسکولار (*Glomus* spp.)) بر محتوای روی ریشه در ذرت. میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

شکل ۵- مقایسه میانگین اثرات کود زیستی (باکتری محرک رشد *P. fluorescens* و قارچ میکوریزا آربوسکولار (*Glomus* spp.)) بر محتوای روی اندام هوایی در ذرت. میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

تفاوت‌ها را می‌توان با توجه به نقش کودهای زیستی در تغییر جذب و توزیع عناصر غذایی در گیاه و همچنین تأثیر متقابل این عوامل با محیط خاک توضیح داد. در تیمار شاهد، عدم مداخله کودهای زیستی ممکن است به حفظ جذب طبیعی روی توسط ریشه‌ها منجر شده باشد. این موضوع به‌ویژه در شرایطی که خاک دارای منابع کافی روی باشد یا سازوکارهای گیاه برای جذب روی بدون دخالت ریزجاندارانی خارجی فعال باشد، قابل انتظار است (Marschner, 2012). با این حال، این روند در حضور باکتری‌ها تغییر کرده است. کاهش محتوای روی در ریشه و اندام هوایی در تیمار باکتری به‌تنهایی می‌تواند به دلیل تغییرات ایجادشده در ریزوسفر و رقابت بین باکتری‌ها و ریشه برای جذب روی باشد. برخی باکتری‌ها ممکن است روی را از طریق ترشح سیدروفورها یا ترکیبات مشابه در خود ذخیره کنند و دسترسی گیاه به آن را محدود نمایند (Khan *et al.*, 2007). از سوی دیگر، عدم تفاوت معنی‌دار بین کاربرد قارچ به‌تنهایی و کاربرد تلفیقی کودهای زیستی در جذب روی، نشان‌دهنده تأثیر محدود قارچ‌های مورد استفاده در این پژوهش بر جذب این عنصر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.69.157]

است. قارچ‌های میکوریزا معمولاً از طریق افزایش سطح جذب ریشه یا ترشح ترکیباتی که دسترسی به عناصر ریزمغذی را بهبود می‌بخشند، در جذب فلزات سنگین و عناصر کمیاب نقش دارند (Smith and Read, 2008). اما در این مطالعه، احتمالاً شرایط خاک یا ویژگی‌های قارچ استفاده شده به‌گونه‌ای بوده که تأثیر مستقیمی بر افزایش جذب روی نداشته است.

علاوه‌براین، بالاترین محتوای روی در اندام هوایی نیز در تیمار شاهد مشاهده شد، که با تیمار کاربرد قارچ در یک گروه آماری قرار گرفت. این موضوع نشان می‌دهد که قارچ، برخلاف باکتری، تأثیر خاصی بر انتقال روی از ریشه به اندام هوایی نداشته است. با این حال، کمترین محتوای روی در اندام هوایی مربوط به تیمار باکتری به‌تنهایی بود. به‌طورکلی، این نتایج نشان می‌دهد که کاربرد کودهای زیستی باید با توجه به نوع میکروارگانیسم و شرایط خاک تنظیم شود. در حالیکه برخی از ریزجانداران، مانند قارچ‌ها، تأثیر خنثی یا حتی مثبتی بر جذب روی دارند، دیگران، مانند برخی باکتری‌ها، ممکن است در شرایط خاص جذب یا توزیع این عنصر را مختل کنند.

فاکتور انتقال (TF) روی در گیاه ذرت: نتایج فاکتور انتقال روی در ذرت (شکل ۶) نشان داد تیمار باکتری بیشترین (۳/۹۴) و تیمارهای تلفیقی و شاهد کم‌ترین مقدار (۰/۷) این شاخص را دارا بودند. این شاخص نشان‌دهنده توانایی گیاه در انتقال روی از ریشه به اندام‌های هوایی است.

باکتری‌های محرک رشد گیاه با تولید ترکیباتی مانند اسیدهای آلی، سیدروفورها و هورمون‌های گیاهی و از طریق بهبود رشد ریشه و تعرق، انتقال روی به اندام‌های هوایی را تسهیل می‌کنند (Wu *et al.*, 2005). در مقابل، قارچ‌های میکوریزا با انباشت روی در ریشه و کاهش انتقال آن، موجب کاهش فاکتور انتقال می‌شوند و هم‌زمان مقاومت گیاه را در برابر تنش فلزات سنگین افزایش می‌دهند (Mantelin and Touraine, 2004). در تیمار شاهد، تجمع بیشتر روی در ریشه احتمالاً ناشی از نبود فعالیت میکروبی مؤثر بوده است. به‌طور کلی، حضور باکتری‌ها باعث افزایش انتقال روی و قارچ‌ها موجب محدودشدن آن به ریشه می‌شوند (Yang *et al.*, 2009).

شاخص کلروفیل برگ (SPAD): اطلاعات به دست آمده از جدول تجزیه واریانس (جدول ۵) بیانگر معنی‌دار بودن اثر کود زیستی در سطح احتمال خطای پنج درصد بر شاخص کلروفیل برگ بود.

مقایسه میانگین اثر کودزیستی (شکل ۷) حاکی از افزایش شاخص کلروفیل برگ با کاربرد باکتری بود به‌طوریکه بیشترین مقدار این صفت (۳۴/۹) از تیمار کاربرد باکتری و کم‌ترین مقدار آن (۲۵/۸) از تیمار کاربرد تلفیقی کودهای زیستی به دست آمد.

در شرایطی که گیاه ذرت تحت تنش سرب و روی قرار داشت، افزایش شاخص کلروفیل برگ در تیمار باکتری نشان‌دهنده نقش محافظتی این میکروارگانیسم در کاهش اثرات منفی فلزات سنگین بر فتوسنتز است. فلزات سنگین مانند سرب و روی می‌توانند با جایگزینی عناصر ضروری در ساختار کلروفیل، اختلال در فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی و افزایش تنش اکسیداتیو، باعث کاهش سنتز کلروفیل و در نتیجه افت عملکرد فتوسنتزی گیاه شوند. در مقابل، کاهش شاخص کلروفیل در تیمار تلفیقی ممکن است ناشی از جذب بیشتر سرب و تخصیص منابع به سازوکارهای دفاعی باشد، که با کاهش سنتز کلروفیل همراه است (Demir, 2004). نتایج حاکی از آن است که در شرایط تنش سرب و روی، تیمار باکتری عملکرد بهتری در حفظ فعالیت فتوسنتزی نسبت به تیمار تلفیقی دارد.

محتوای نسبی آب برگ (RWC): نتایج تجزیه واریانس (جدول ۵) نشان داد تیمارهای کود زیستی اثر معنی‌داری در سطح احتمال خطای یک درصد بر محتوای نسبی آب برگ ذرت دارند. بالاترین مقدار این شاخص (۸۸/۵۶ درصد) در تیمار تلفیقی کودهای زیستی و کم‌ترین آن (۷۵/۱۳ درصد) در تیمار شاهد (عدم کاربرد کودهای زیستی) مشاهده شد (شکل ۸) که سبب افزایش ۱۷/۸۳ درصدی محتوای نسبی آب برگ نسبت به گیاهان شاهد گردید.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.157]

شکل ۶- مقایسه میانگین اثرات کود زیستی (باکتری محرک رشد *P. fluorescens* و قارچ میکوریزا آربوسکولار (*Glomus* spp.)) بر فاکتور انتقال روی در ذرت. میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

جدول ۵- نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر کودهای زیستی بر خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه ذرت

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		کلروفیل برگ	محتوای نسبی آب برگ	درصد نشت الکترولیت
کود زیستی	۳	۵۳/۰۲*	۱۰۱/۶۱**	۱۸۶/۰۰**
خطا	۸	۷/۸۰	۹/۲۴	۱۰/۳۹
ضریب تغییرات	-	۹/۲۷	۳/۷۱	۱۳/۹۸

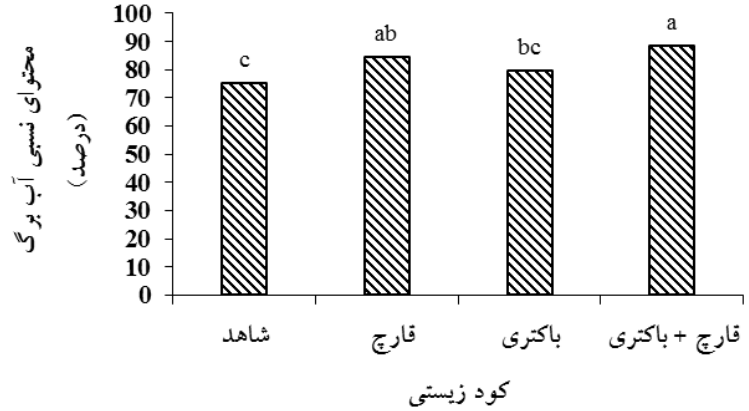
***، ** به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال خطای ۵ و ۱ درصد را نشان می‌دهد.**

شکل ۷- مقایسه میانگین اثرات کود زیستی (باکتری محرک رشد *P. fluorescens* و قارچ میکوریزا آربوسکولار (*Glomus* spp.)) بر شاخص کلروفیل برگ در ذرت. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

محتوای نسبی آب برگ شاخصی مهم برای سنجش وضعیت آبی گیاه و نشان‌دهنده تداوم رشد در شرایط تنش است.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.157]



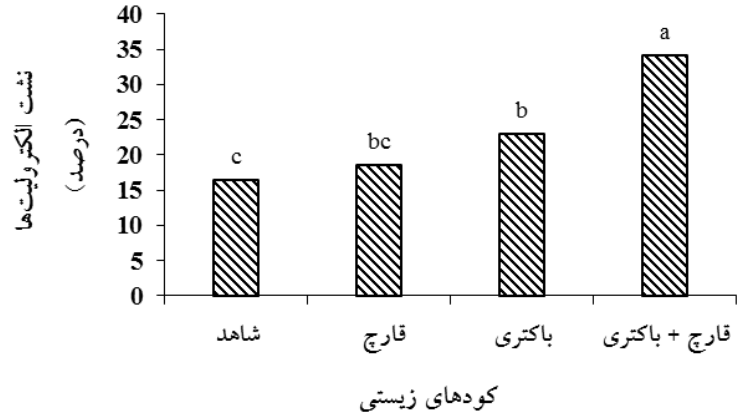
شکل ۸- مقایسه میانگین اثرات کود زیستی (باکتری محرک رشد *P. fluorescens* و قارچ میکوریزا آربوسکولار (*Glomus* spp.)) بر محتوای نسبی آب برگ در ذرت. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

افزایش این شاخص در تیمار تلفیقی نشان می‌دهد که قارچ‌های میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد با توسعه سامانه ریشه‌ای و کاهش تولید اتیلن، توانایی جذب و نگهداری آب در گیاه را تقویت کرده‌اند (محمدی‌فرد و مقدم، ۱۴۰۱). مطالعات پیشین نیز نتایج مشابهی ارائه داده‌اند. مجیدی و امیری (۱۳۹۹) نشان دادند که تلقیح با قارچ‌های میکوریزا باعث افزایش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ در گیاهان مختلف می‌شود. گرگینی شبانکاره و خراسانی‌نژاد (۱۳۹۶) نیز گزارش کردند که کاربرد کودهای زیستی در گیاه دارویی اکلیل کوهی با افزایش رشد ریشه و رطوبت خاک، موجب بهبود وضعیت آبی برگ‌ها می‌شود. همچنین بش و همکاران (۱۳۹۸) اثر مثبت تیمارهای باکتریایی در گیاه سیاهدانه را در شرایط کم‌آبی بر این شاخص تأیید کردند. در مجموع، کاربرد تلفیقی کودهای زیستی توانسته است در شرایط تنش فلزات سنگین، وضعیت آبی مطلوب‌تری در برگ ذرت فراهم کند که نقش مؤثری در تداوم رشد گیاه دارد.

درصد نشت الکترولیت برگ: اثر تیمار کودهای زیستی بر درصد نشت الکترولیت‌های برگ ذرت در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۵). بیشترین مقدار نشت الکترولیت (۳۴/۱۶ درصد) مربوط به تیمار کاربرد تلفیقی کودهای زیستی بود در حالیکه کمترین مقدار آن (۱۶/۵۰ درصد) در تیمار شاهد مشاهده شد (شکل ۹).

یکی از آسیب‌های که فلزات سنگین به گیاه وارد می‌کند تخریب ساختار غشاء سلولی به علت پراکسیداسیون لیپیدی است. غلظت بالای فلزات سنگین منجر به افزایش نشت یونی می‌شود و دلیلی بر کاهش شاخص پایداری غشاء است (دستک‌زن و همکاران، ۱۴۰۴). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تیمارهای مختلف کودهای زیستی تأثیر متفاوتی بر درصد نشت الکترولیت‌های برگ ذرت در شرایط تنش فلزات سنگین داشتند. افزایش نشت الکترولیت‌ها در تیمار تلفیقی احتمالاً به دلیل افزایش جذب سرب توسط گیاه و متعاقب آن، تخریب بیشتر غشاهای سلولی تحت تأثیر آن بوده است. در تیمار کاربرد تلفیقی، به دلیل تأثیر میکروارگانیسم‌های زیستی بر افزایش جذب فلزات سنگین، احتمالاً میزان تنش اکسیداتیو نیز افزایش یافته و در نهایت منجر به افزایش نشت الکترولیت‌ها شده است. به‌طورکلی، نتایج نشان می‌دهد که کاربرد کودهای زیستی می‌تواند از یک‌سو با افزایش جذب فلزات سنگین، تنش اکسیداتیو را تشدید کرده و باعث افزایش نشت الکترولیت‌ها شود، و از سوی دیگر، در برخی موارد با بهبود سامانه دفاعی گیاه، این اثرات را کاهش دهد. بنابراین، بررسی دقیق‌تر سازوکارهای دخیل در تنظیم پاسخ گیاه به تنش فلزات سنگین در حضور کودهای زیستی، می‌تواند به درک بهتر این

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.69.157]



شکل ۹- مقایسه میانگین اثرات کود زیستی (باکتری محرک رشد *P. fluorescens* و قارچ میکوریزا آربوسکولار (*Glomus* spp.)) بر درصد نشت الکترولیت برگ در ذرت. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

فرآیندها کمک کند.

اثر خاک آلوده به فلزات سنگین (سرب و روی) و کودهای زیستی بر ویژگی‌های رشد گیاه ذرت: اطلاعات به دست آمده از جدول تجزیه واریانس (جدول ۶) بیانگر معنی‌دار بودن اثر کود زیستی در سطح احتمال خطای یک درصد بر طول ریشه و اندام هوایی و وزن خشک ریشه و اندام هوایی گیاه ذرت بود.

طول ریشه و اندام هوایی: مقایسه میانگین اثر کودهای زیستی (شکل ۱۰) حاکی از کاهش طول ریشه ذرت با کاربرد تلفیقی کودهای زیستی بود به طوریکه بیشترین مقدار این صفت (۳۴/۳۳ سانتی‌متر) از تیمار عدم کاربرد کودهای زیستی و کم‌ترین مقدار آن (۱۴/۶۶ سانتی‌متر) از کاربرد تلفیقی کودهای زیستی به دست آمد.

کاربرد تلفیقی کودهای زیستی در خاک سبب کاهش معنی‌دار طول اندام هوایی ذرت شد. تیمار شاهد از بیشترین طول اندام هوایی (۴۲/۰۰ سانتی‌متر) و تیمار کاربرد تلفیقی کودهای زیستی از کم‌ترین طول اندام هوایی (۳۵/۳۳ سانتی‌متر) برخوردار بودند. همچنین مشاهده شد بین عدم کاربرد کودهای زیستی و کاربرد هر یک از آن‌ها به‌تنهایی اختلاف معنی‌داری وجود نداشت.

کاهش طول اندام هوایی و ریشه ذرت در تیمارهای حاوی کودهای زیستی، به‌ویژه در کاربرد تلفیقی، احتمالاً به دلیل افزایش جذب فلزات سنگین، به‌ویژه سرب و در نتیجه ایجاد تنش بیشتر برای گیاه بوده است. فلزات سنگین می‌توانند با ایجاد اختلال در جذب عناصر ضروری مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم، تأثیر منفی بر فرایندهای فیزیولوژیک گیاه بگذارند که یکی از پیامدهای آن کاهش رشد اندام هوایی است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۹). تیمار عدم کاربرد کودهای زیستی نسبت به تیمارهای حاوی این کودها از طول اندام هوایی بیشتری برخوردار بود که این موضوع نشان‌دهنده تأثیر کودهای زیستی در افزایش جذب فلزات سنگین و به دنبال آن کاهش رشد گیاه است (اسدی کپورچال و جلالی، ۱۴۰۰). به‌طورکلی، کاهش رشد اندام هوایی ذرت در تیمارهای حاوی کودهای زیستی نشان می‌دهد که این کودها در شرایط آلودگی فلزات سنگین، با وجود برخی فواید، ممکن است باعث افزایش دسترسی گیاه به این فلزات و متعاقب آن تشدید تنش شوند. این نتایج تأکید می‌کند که در شرایط خاک آلوده، مدیریت دقیق کودهای زیستی و بررسی سازوکارهای آن‌ها در تنظیم جذب عناصر ضروری و فلزات سنگین لازم است.

وزن خشک ریشه و اندام هوایی: مقایسه میانگین اثر کودهای زیستی (شکل ۱۱) نشان داد که بیشترین وزن خشک ریشه ذرت (۱/۱۳ گرم) مربوط به تیمار عدم کاربرد کودهای

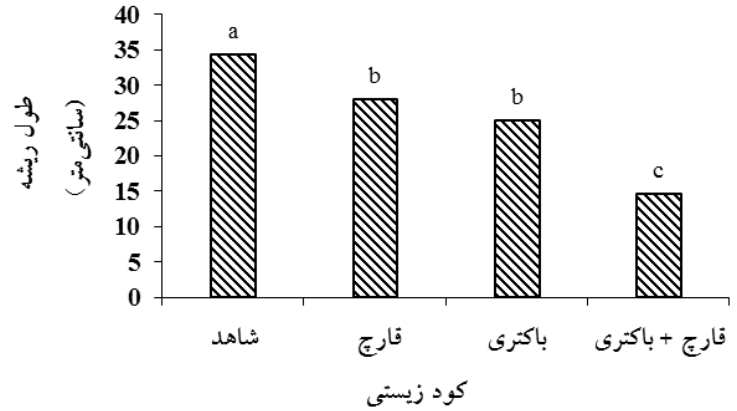
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.157]

جدول ۶- نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر تیمار کودهای زیستی بر شاخص‌های رشد گیاه ذرت

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		طول ریشه	طول اندام هوایی	وزن خشک ریشه	وزن خشک اندام هوایی
کود زیستی	۳	۲۰۱/۸**	۱/۷۷**	۰/۱۸**	۰/۱۳**
خطا	۸	۹/۴۱	۳/۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱
ضریب تغییرات	-	۱۲/۰۳	۴/۵۳	۱۵/۰۲	۱۴/۸۵

**** معنی‌داری در سطح احتمال خطای ۱ درصد را نشان می‌دهد.**



شکل ۱۰- مقایسه میانگین اثرات کود زیستی (باکتری محرک رشد *P. fluorescens* و قارچ میکوریزا آربوسکولار (*Glomus* spp.)) بر طول ریشه در ذرت. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

شکل ۱۱- مقایسه میانگین اثرات کود زیستی (باکتری محرک رشد *P. fluorescens* و قارچ میکوریزا آربوسکولار (*Glomus* spp.)) بر وزن خشک ریشه در ذرت. میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

زیستی (شاهد) و کمترین مقدار آن (۰/۵۲۳ گرم) از تیمار کاربرد تلفیقی کودهای زیستی حاصل شد. کودهای زیستی نتوانستند تأثیری مثبت در بهبود این صفت داشته باشند. همچنین تیمار شاهد و تیمار قارچ میکوریزا به‌تنهایی در یک

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: DOI: 10.22034/14.69.157]

گروه آماری قرار گرفت.

مقایسه میانگین اثر تیمار ها حاکی از کاهش وزن خشک اندام هوایی ذرت با کاربرد تلفیقی کودهای زیستی بود به طوریکه بیشترین مقدار این صفت (۱/۱۳ گرم) از تیمار شاهد و کم‌ترین مقدار آن (۰/۶۰ گرم) از کاربرد تلفیقی کودهای زیستی به دست آمد.

مشاهده کاهش وزن خشک اندام هوایی و ریشه ذرت در تیمارهای دارای کاربرد تلفیقی کودهای زیستی ممکن است به دلیل افزایش جذب سرب و روی در این تیمارها باشد که می‌تواند منجر به ایجاد سمیت در سلول‌های گیاهی و کاهش رشد اندام‌های هوایی و زیرزمینی شود. برخی مطالعات نشان داده‌اند که میکوریزا می‌تواند از طریق افزایش سطح جذب ریشه، ورود فلزات سنگین به گیاه را نیز افزایش دهد (Smith and Read, 2008). این مسئله می‌تواند به انباشت فلزات در بافت‌های گیاهی و در نتیجه کاهش رشد گیاه منجر شود (Gohre and Paszkowski, 2006). به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در شرایط تنش فلزات سنگین، کاربرد تلفیقی کودهای زیستی الزاماً به بهبود رشد گیاه منجر نمی‌شود و سازوکارهای پیچیده‌ای در تعامل میان گیاه، میکروارگانیسم‌ها و فلزات سنگین درگیر هستند که نیاز به بررسی‌های بیشتر دارند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد تلفیقی کودهای زیستی (قارچ و باکتری) باعث افزایش میزان سرب ریشه و اندام هوایی در گیاه ذرت شد که این امر منجر به کاهش برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی گیاه گردید. کاربرد تلفیقی کودهای زیستی موجب کاهش میزان روی در ریشه و اندام هوایی گیاه ذرت شد به‌طوری‌که بیشترین کاهش در میزان روی ریشه در تیمار کاربرد باکتری به‌تنهایی حاصل شد. بیشترین میزان سرب ریشه و اندام هوایی در تیمار تلفیقی کودهای زیستی مشاهده شد که احتمالاً ناشی از تأثیر هم‌افزایی قارچ‌های میکوریزا و باکتری محرک رشد گیاهی در افزایش قابلیت دسترسی و جذب این فلز سنگین بود. قارچ‌های میکوریزا با گسترش شبکه هیفی و افزایش سطح تماس ریشه با خاک، جذب فلز سنگین سرب را افزایش می‌دهند، باکتری‌های محرک رشد گیاه نیز با تولید ترکیبات محرک رشد و سیدروفورها این روند را افزایش می‌دهند. افزایش میزان سرب در گیاه ذرت به دنبال کاربرد تلفیقی کودهای زیستی، اثرات منفی بر ویژگی‌های گیاه داشت و موجب کاهش وزن خشک اندام هوایی و ریشه، کاهش ارتفاع بوته، شاخص کلروفیل برگ و افزایش نشت الکترولیت‌های سلولی شد. به‌طورکلی، یافته‌های این پژوهش نشان داد که اگرچه کاربرد تلفیقی کودهای زیستی باعث افزایش جذب سرب شد، اما همین موضوع منجر به کاهش برخی خصوصیات رشد گیاه گردید. همچنین با توجه به اینکه از میان تیمارهای کود زیستی، تلقیح توأم باکتری و قارچ میکوریزا بیشترین تأثیر را در جذب سرب در ریشه و اندام هوایی داشتند می‌توان گفت که سبب افزایش استخراج گیاهی (Phytoextraction) سرب گردیده است. این افزایش جذب فلزات سنگین در افزایش کارآیی گیاه پالایی بسیار مفید است و می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر در افزایش کارآیی گیاه پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مورد استفاده قرار گیرد. بعلاوه در شرایط خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، مدیریت دقیق میزان و نحوه استفاده از کودهای زیستی ضروری است تا ضمن بهره‌گیری از مزایای آن‌ها، از تجمع بیش از حد عناصر سمی در گیاه جلوگیری شود.

منابع

اسدی کپورچال، صفورا، و جلالی، وحید رضا (۱۴۰۰). گیاه پالایی و تخمین زمان بهینه پاکسازی خاک‌های آلوده به سرب با استفاده از دو گیاه خرفه و تاج خروس وحشی. *محیط زیست و مهندسی آب*، *۷*(۱)، ۲۵-۳۷.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.157]

بش، زینب، دانش‌شهرکی، عبدالرزاق، قبادی‌نیا، مهدی، و سعیدی، کرامت‌الله (۱۳۹۸). اثر باکتری‌های محرک رشد گیاه بر صفات آگرومورفولوژیک سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) تحت تنش کم‌آبی. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۲(۲)، ۵۲۵-۵۳۷. DOI: 10.22077/escs.2018.1347.1282

ثابتی، پریسا، یدوی، علیرضا، صالحی، امین، نقی‌ها، رضا، و ابراهیمی، فاطمه (۱۴۰۳). تأثیر تلقیح قارچ مایکوریزا آربوسکولار و باکتری‌های محرک رشد بر میزان تحمل گاوزبان اروپایی (*Borago officinalis* L.) به سمیت کادمیوم. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۳ (۶۰)، ۱۸۵-۲۰۴. DOI: 10.22034/13.60.185

حیدری، مسلم، رستمی، فاطمه، و گلچین، احمد (۱۳۹۹). تأثیر کاربرد کودهای زیستی بر شاخص‌های رشدی ذرت (*Zea mays* L.) در خاک‌های آلوده به سرب. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۱(۶)، ۱۵۴۳-۱۵۵۴. DOI: 10.22059/ijswr.2020.295921.668474

دستک‌زن، خاطره، موحدی دهنوی، محسن، فرجی، هوشنگ، صالحی، امین، و اله‌دادی، حمید (۱۴۰۴). بهبود خصوصیات فیزیولوژیک و وزن خشک اندام هوایی بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) با تلقیح مایکوریزا تحت سمیت کادمیوم. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۴ (۶۶)، ۱۳۷-۱۵۶. DOI: 10.22034/14.66.137

دلاورنیا، فاطمه، زعفریان، فائزه، حسن‌پور، رقیه، و پیردشتی، همت‌اله (۱۴۰۰). ارزیابی اثرگذاری اصلاح‌کننده آلی و باکتری محرک رشد در فرآیند گیاه‌پالایی گیاه ذرت (*Zea mays* L.) تحت تنش فلز سنگین کادمیم. *دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۳۱(۴)، ۱۴۷-۱۶۲. DOI: 10.22034/saps.2021.43955.2607

رسولی صدقیانی، میرحسن، قره‌ملکی، تورج، بشارتی، حسین، و کریمی، اکبر (۱۳۹۲). تأثیر ریزجانداران مفید خاکزی بر رشد و جذب کادمیوم توسط ذرت. *پژوهش‌های خاک*، ۲۷ (۲)، ۲۰۵-۲۱۵. DOI: 10.22092/ijsr.2013.126245

عظیم‌زاده، یاسر، و شریعتمداری، حسین (۱۳۹۲). بررسی پالایش برخی فلزات سنگین خاک توسط ذرت و کلزا در سیستم کشت منفرد و مخلوط. *آب و خاک*، ۲۷ (۲)، ۴۰۶-۴۱۴. https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.24368

قادریان، سید مجید، و نصوحی، سمانه (۱۳۹۳). قابلیت جذب و پالایش فلزات سمی سنگین از پسماند صنعتی مجتمع فولاد مبارکه از طریق چندین گیاه انباشتگر. *محیط‌شناسی*، ۴۰ (۱)، ۱۶۲-۱۵۳. DOI: 10.22059/jes.2014.50163

کریمی، اکبر، خداوردی لو، حبیب، و رسولی صدقیانی، میرحسن (۱۳۹۲). نقش تحریک‌کنندگی برخی گونه‌های قارچ گلوموس و باکتری سودوموناس در پالایش‌سبز سرب خاک توسط بنگ‌دانه (*Hyoscyamus niger*). *دانش آب و خاک*، ۲۳ (۲)، ۲۲۷-۲۴۳.

گرگینی شبانکاره، حسین، و خراسانی‌نژاد، سارا (۱۳۹۶). اثر کودهای زیستی و اسید سالیسیلیک بر عملکرد و ویژگی‌های کیفی گیاه دارویی اکلیل کوهی تحت رژیم‌های کم آبی. *به‌زراعی کشاورزی*، ۱۹ (۲)، ۴۷۵-۴۹۱. DOI: 10.22059/jci.2017.60421

مجیدی، عزیز، و امیری، پرنگ (۱۳۹۹). بررسی تأثیر دو گونه قارچ میکوریزا-آربوسکولار در سطوح مختلف تنش رطوبتی بر برخی ویژگی‌های رشدی ذرت. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۳ (۱)، ۱۲۱-۱۲۹. DOI: 10.22077/escs.2019.1927.1466

محکمی، زینب، بیدرنامنی، فاطمه، غفاری‌مقدم، زهرا، و فروزنده، محمد (۱۳۹۷). تأثیر قارچ‌های میکوریزا بر گیاه‌پالایی سرب و کادمیوم توسط گیاه دارویی آویشن دنایی (*Thymus daenensis* Celak.). *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۵ (۴)، ۲۲۵-۲۴۲. DOI: 10.22069/jwsc.2018.14361.2910

محمدی‌فرد، فریبا، و مقدم، محمد (۱۴۰۱). تأثیر دو گونه قارچ مایکوریزا بر خصوصیات بیوشیمیایی و زیست‌توده خشک اندام هوایی گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) تحت تنش کادمیوم. *تولیدات گیاهی*، ۴۵ (۱)، ۸۱-۹۴.

نادری، محمدرضا، و نادری، رضوان (۱۳۹۴). ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه و نقش آن‌ها در پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین. *انسان و محیط زیست*، ۳۲، ۳۳-۴۸.

Bharti, R, & Sharma, R. (2021). Effect of heavy metals: An overview. *Materials Today: Proceedings*, *51*, 880-885.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.157]

https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.278
Chen, H., Tang, Z., Wang, P., & Zhao, F. (2018). Geographical variations of cadmium and arsenic concentrations and arsenic speciation in Chinese rice. *Environmental Pollution*, *238*, 482-490. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.048
de Andrade, S. A., da Silveira, A. P., Jorge, R. A., & de Abreu, M. F. (2008). Cadmium accumulation in sunflower plants influenced by arbuscular mycorrhiza. *International Journal of Phytoremediation*, *10*(1), 1-13. https://doi.org/10.1080/15226510701827002
Demir, S. (2004). Influence of arbuscular mycorrhiza on some physiological growth parameters of pepper. *Turkish Journal of Biology*, *28*, 85-90.
Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica*, 963401. https://doi.org/10.6064/2012/963401
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
Jolly, Y. N., Islam, A., & Akbar, S. (2013). Transfer of metals from soil to vegetables and possible health risk assessment. *Springer Plus*, *2*(1), 385. https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-385
Khan, M. S., Zaidi, A., & Wani, P. A. (2007). Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture - A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *27*(1), 29-43. https://doi.org/10.1051/agro:2006011
Mantelin, S, & Touraine, B. (2004). Plant growth-promoting bacteria and nitrate availability: Impacts on root development and nitrate uptake. *Journal of Experimental Botany*, *55*(394), 27-34. https://doi.org/10.1093/jxb/erh010
Marschner, H. (2012). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 3rd Ed. Academic Press, London.
McKay, H. M. (1992). Electrolyte leakage from fine roots of conifer seedlings; a rapid index of plant vitality following cold storage. *Canadian Journal of Forest Research*, *22*, 1371-1377. https://doi.org/10.1139/x92-182
Miransari, M. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungi and heavy metal tolerance in plants. In: Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants (ed.Wu, Q. S.) Pp. 147-161. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4115-0_7
Mishra, A, & Choudhuri, M. A. (1999). Effects of salicylic acid on heavy metal-induced membrane deterioration mediated by lipoxygenase in rice. *Biologia Plantarum*, *42*(3), 409-415. https://doi.org/10.1023/A:1002469303670
Noulas, C., Tziouvalekas, M., & Karyotis, T. (2018). Zinc in soils, water, and food crops. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, *49*, 252-260. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.009
Smith, S. E, & Read, D. (2008). Mycorrhizal Symbiosis. 3rd Ed. Academic Press, New York.
Vassilev, A., Vangronsveld, J., & Yordanonov, I. (2002). Reviews: Cadmium phytoextraction: Present state, biological backgrounds and research needs. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, *28*, 68-95.
Vivas, A., Azcon, R., Biro, B., Barea, J. M., & Ruiz-Lozano, J. M. (2003). Influence of bacterial strains isolated from lead-polluted soil and their interactions with arbuscular mycorrhizae on the growth of *Trifolium pratense* L. under lead toxicity. *Canadian Journal of Microbiology*, *49*, 577-588. http://doi.org/10.1139/w03-073
Wu, S. C., Cao, Z. H., Li, Z. G., Cheung, K. C., & Wong, M. H. (2005). Effects of biofertilizer containing N-fixer, P and K solubilizers and AM fungi on maize growth: A greenhouse trial. *Geoderma*, *125*(1-2), 155-166. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.07.003
Yang, J., Kloepper, J. W., & Ryu, C. M. (2009). Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress. *Trends in Plant Science*, *14*(1), 1-4. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.10.004

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.157]

Assessing the impact of plant growth-promoting bacteria *Pseudomonas fluorescens* and mycorrhizal fungi (*Glomus* spp.) on lead and zinc uptake in maize (*Zea mays*)

Mahboubeh Rashidi and Ahmad Mohtadi*

Department of Biology, Faculty of Science, Yasouj University, Yasouj, Iran
(Received: 2025/07/21, Accepted: 2025/09/17)

Abstract

Heavy metal contamination poses a significant environmental threat to agricultural ecosystems, causing substantial disruptions to plant physiological processes and hindering healthy growth. This study aimed to evaluate the effectiveness of growth-promoting bacteria *Pseudomonas fluorescens* and mycorrhizal fungi (*Glomus* spp.), both individually and in combination, on the absorption of lead and zinc in corn (*Zea mays*). The experiments were conducted in pots within the Plant Physiology Laboratory, Faculty of Sciences, Yasouj University. The experiment was conducted as a factorial design in a completely randomized setup with three replications. The experimental factor consisted of four treatment levels of bio-fertilizers: Control (no bio-fertilizer), mycorrhizal fungi, *P. fluorescens* bacteria, and a combined application of both bio-fertilizers. Physiological traits measured included heavy metal content (lead and zinc) in roots and shoots, leaf chlorophyll index, relative water content, electrolyte leakage percentage, and plant growth indices. The results indicated that the combined application of biofertilizers increased the lead content in corn roots by 2.01 times and in the aerial parts by 4.31 times relative to the control. However, this combined use of bio-fertilizers decreased the zinc content in both the roots and aerial parts of the corn plant. The combined application of bio-fertilizers increased the relative water content of corn plants by 17.83% compared to the control. The results conclude that the combined application of bio-fertilizers enhanced the extraction of lead by maize plants. These findings emphasize that biological approaches, particularly integrated ones, are crucial steps towards sustainable agriculture and effective soil pollution management.

Keywords: Bio-fertilizers, Heavy metals, Physiological traits, Phytoremediation

Corresponding author, Email: a.mohtadi@yu.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: DOI: 10.22034/14.69.157]