

کارآیی قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در گیاه پالایی خاک‌های آلوده به روی به وسیله گیاه ذرت

مهردی زارعی^{۱*}، ناهید صالح راستین^۲ و غلامرضا ثوابقی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۸/۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۸/۱۰)

چکیده

در یک آزمایش گلخانه‌ای نقش سه گونه از قارچ‌های میکوریز آربوسکولار بومی منشا گرفته از یک خاک آلوده در گیاه پالایی خاک‌های آلوده به روی با استفاده از گیاه میزان ذرت، بررسی شد. این تحقیق به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با فاکتورهای قارچ شامل ۴ سطح (شاهد، گلوموس موسهای، گلوموس ایترارادیسز و گلوموس ورسیفورم) و روی در ۵ سطح (۰، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ میلی-گرم روی در کیلوگرم) در یک خاک غیر استریل با بافت لوم شنی و در سه تکرار انجام شد. گیاهان ذرت مایه‌زنی شده با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار، در مقایسه با گیاهان شاهد مایه‌زنی نشده، جذب روی و فسفر و نیز عملکرد بیولوژیک پیشری داشته و علائم سمیت روی در آنها دیده نشده است. کارایی جذب، انتقال و استخراج گیاهی در گیاهان مایه‌زنی شده با گلوموس ایترارادیسز تا سطح ۱۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم از سایر تیمارها بیشتر ولی در سطح ۵۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم، این مقادیر در گیاهان مایه‌زنی شده با گلوموس موسهای بالاتر بوده است. بالاترین کارایی هر سه گونه قارچی در افزایش جذب روی اندام هوایی و ریشه گیاه در پایین‌ترین سطح روی دیده شد و در بالاترین سطح روی گونه گلوموس ایترارادیسز و گلوموس موسهای به ترتیب کارایی قابل توجهی در افزایش جذب روی ریشه و اندام هوایی گیاه داشته‌اند. گونه گلوموس ورسیفورم در اکثر موارد نسبت به دو گونه قارچی دیگر حالت بینایینی داشته است.

واژه‌های کلیدی: قارچ‌های میکوریز آربوسکولار، گیاه پالایی، روی، ذرت

۱. استادیار علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲. استاد و دانشیار علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mehdizarei20@yahoo.ca

مقدمه

(استخراج گیاهی) را افزایش دهد (۲۹). ذرت یک گیاه زراعی با زیست توده بالاست که می‌تواند مقادیر قابل توجه فلزات سنگین شامل روی (۳۱) و مس (۲۹) را از خاک‌های آلوده استخراج کند. وابستگی شدید ذرت به هم‌زیستی میکوریز و توان تولید زیست توده بالا در صورت هم‌زیستی با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار، سبب شده که این گیاه بتواند نقش مهمی در گیاه‌پالایی فلزات سنگین ایفا کند. قارچ‌های میکوریز آربوسکولار با کاهش سمیت فلزات سنگین و بهبود شرایط رشد گیاه ذرت، کاربرد آن را در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده افزایش می‌دهند. در این زمینه پیدا کردن بهترین سویه‌های قارچی برای تولید زادمانیه به منظور افزایش کارآبی ذرت در گیاه‌پالایی ضرورت دارد. مطالعات زیادی در مورد روابط بین ذرت، قارچ‌های میکوریزی و روی در شرایط کشت متفاوت انجام شده است که نتایج آنها متفاصل بوده‌اند. قارچ‌های میکوریزی جذب روی در اندام هوایی را در شرایط کمبود روی تقویت می‌کند و در شرایط بالای روی کاهش می‌دهند (۶، ۷ و ۲۷ و ۲۹). نتایج مطالعات نشان داده‌اند که نقش قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در گیاه‌پالایی، در صورت حضور چند فلز با هم، به طور دقیق مشخص نمی‌شود (۳۰). ویسن هورن و همکاران (۲۹) جذب فلزات سنگین به وسیله گیاه ذرت میکوریزی را در خاک‌های آلوده به کادمیوم، روی، سرب، مس و منگنز مطالعه کردند، ولی به دلیل این که فلزات با یکدیگر اثر متقابل دارند، نتایج آنها به طور دقیق نقش قارچ‌های میکوریز آربوسکولار را بر جذب هر یک از فلزات، مشخص نکرده است. با توجه به این که در اکثر تحقیقات انجام شده، نقش قارچ‌های میکوریز آربوسکولار غیر بومی مناطق آلوده در گیاه پالایی بررسی شده و هم‌چنین خاک‌ها به چندین فلز سنگین آلوده شده بوده‌اند، بنابراین ما در این تحقیق نقش قارچ‌های میکوریز آربوسکولار جدا شده از خاک‌های اطراف منطقه معدن روی و سرب انگوران را در گیاه پالایی خاک‌های آلوده شده با فلز سنگین روی در شرایط گلخانه‌ای مورد بررسی قرار داده‌ایم.

خاک به عنوان جزئی از بیوسفر، نقش مهمی در تولید غذا و پایداری محیط زیست دارد. افزایش جمعیت و به همراه آن افزایش دانش علمی و فنی و گسترش صنایع بدون رعایت مسائل و استانداردهای زیست محیطی سبب آلودگی محیط و به هم خوردن تعادل اکو سیستم خاک شده است. بنابراین آگاهی در مورد آلاینده‌های خاک و توجه بیشتر به راهکاری مناسب برای کاهش آنها، ضرورتی انکارناپذیر است. روش‌های فیزیکی و شیمیابی متفاوتی برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین به کار برده شده‌اند که اغلب آنها علاوه بر هزینه زیاد، سبب تخریب ساختار فیزیکی و شیمیابی و فعالیت‌های حیاتی خاک شده و کاربری اراضی برای تولید محصول را کاهش داده‌اند. بنابراین بهتر است تا حد ممکن از روش‌های بیولوژیک مناسب، طبیعی، مقرنون به صرفه و در محل استفاده شود. گیاه‌پالایی (Phytoremediation) به عنوان یک روش مورد قبول برای جایه‌جایی و یا غیرفعال کردن فلزات در خاک‌های آلوده توصیه شده است (۱۱ و ۱۳). کارایی گیاهان استفاده شده در این روش در صورت هم‌زیستی آنها با میکروارگانیسم‌های مفید خاکزکی به ویژه قارچ‌های میکوریز آربوسکولار می‌تواند تشدید شود (۱۳ و ۲۶). مطالعات محققین، حضور قارچ‌های میکوریز آربوسکولار و کلینیزه شدن ریشه‌های گیاهان به وسیله آنها را در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین گزارش داده‌اند (۱۱ و ۳۳). محققین زیادی گزارش داده‌اند که اکو تیپ‌های قارچ‌های میکوریز آربوسکولار منشا گرفته از خاک‌های آلوده نسبت به سویه‌های قارچی بومی خاک‌های غیر آلوده، تحمل پذیری و مقاومت بیشتری نسبت به آلودگی فلزات سنگین دارند (۹). گزارش شده است که قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در آلى کردن فلزات در ریزوسفر گیاه موثر هستند و با تجمع فلزات به شکل غیر سمعی در ریشه‌های گیاه و میسلیوم‌های برون ریشه‌ای به ثبت گیاهی کمک می‌کنند (۱۳). هم‌چنین مشخص شده که کلینیزه شدن گیاه به وسیله برخی قارچ‌های میکوریز آربوسکولار می‌تواند جذب و تجمع فلزات سنگین در اندام هوایی گیاه

با بافت لوم شنی در هر گلدان پلاستیکی ریخته شد. برای انجام تیمار روی، مقدار سولفات‌روی با توجه به سطح مورد نیاز روی ۵۰ ، ۱۰۰ ، ۱۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک، وزن و با خاک هر گلدان کاملاً مخلوط شد. همزمان برای حفظ تعادل گوگرد در تمام گلدان‌ها و حذف تأثیر مقدار سولفات اضافه شده بر عملکرد گیاه، مقدار گوگرد معادل با سولفات روی از منبع سولفات‌پتاسیم به خاک گلدان‌های مربوط، اضافه و کاملاً با آن مخلوط شد (۳۳). برای انجام تیمارهای قارچ میکوریز آربوسکولار، حدود $۵\text{--}۷$ سانتی‌متر از قسمت بالایی خاک هر گلدان برداشته شد و مقدار ۵ گرم زادمایه به صورت یک لایه نازک یکنواخت در سطح خاک پخش شد. برای تیمار شاهد، مقدار معادل از مخلوط دو بار سترون (اتوکلاو شده در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۵ دقیقه) سه زادمایه به خاک هر گلدان اضافه شد. مقدار خاک برداشت شده از هر گلدان روی زادمایه برگردانده شد. بذرهای ضدعفونی سطحی شده ذرت به تعداد ۶ بذر در هر گلدان کشت شد. سوسپانسیون $۱:۱۰$ از مخلوط اتوکلاو شده سه زادمایه با آب مقطر تهیه گردید و از فیلتر عبور داده شد. مقدار ۵ میلی‌لیتر از مواد فیلتر شده به خاک تمام گلدان‌ها افزوده گردید تا ترکیب جامعه میکروبی خاک به جز قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در همه تیمارها یکسان گردد (۵). پس از ظهور گیاهچه‌ها، بذرهای ذرت به ۴ عدد در هر گلدان کاهش داده شد. آبیاری گلدان‌ها تا $۷/۵$ % رطوبت حد طرفیت زراعی با آب مقطر انجام شد. مقدار ۵۰۰ میلی‌گرم اوره در دو تقسیط و ۲۰ میلی‌گرم فسفر از منبع $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ به خاک هر گلدان اضافه شد. گیاهان در گلخانه با ۱۴ ساعت روشناختی، ۱۰ ساعت تاریکی و نور با شدت ۱۸۰۰۰ لوکس به مدت ۴ ماه نگهداری شدند. آزمایش گلخانه‌ای به صورت آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور (۱) قارچ میکوریز آربوسکولار در ۴ سطح Z_4 ، Z_3 ، Z_2 ، Z_1 ، Z_0 (۰) و (۲) روی در ۵ سطح G_1 ، G_2 ، G_3 و G_0 در سه تکرار انجام شد که در مجموع ۶۰ گلدان آماده گردید.

مواد و روش‌ها

زادمایه قارچ‌های میکوریز آربوسکولار

براساس نتایج شناسایی و تنوع قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در منطقه معدن روی و سرب انگوران، در محدوده آلوودگی زیاد، اسپورهای گلوموس موسه‌ای و در محدوده آلوودگی متوسط، اسپورهای گلوموس ایترارادیسز و گلوموس ورسیفورم انتخاب و تکثیر شدند (۱). شناسایی گونه‌های قارچی با روش‌های موپولوژیک و مولکولی انجام شده است (۱ و ۳۲). در پایان مرحله تکثیر، در زادمایه گلوموس ایترارادیسز (G_1)، متوسط کلینیزاسیون ریشه $۷/۵$ درصد و تعداد اسپور در هر گرم بستره ۸ اسپور بود. در زادمایه گلوموس موسه‌ای (G_2) و گلوموس ورسیفورم (G_3)، متوسط کلینیزاسیون ریشه $۶/۵$ درصد بوده و تعداد اسپور در هر گرم بستره ۱۱ اسپور برآورد گردید.

تیمار روی

روی از منبع سولفات‌روی $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ در ۵ سطح مورد استفاده قرار گرفت: Z_0 : شاهد، Z_1 : مقدار ۱۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک، Z_2 : مقدار ۵۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک، Z_3 : مقدار ۱۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک و Z_4 : مقدار ۵۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک.

خاک بسته کشت

برای کشت گیاه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ ، یک خاک لوم شنی با قابلیت هدایت الکتریکی $۲/۵$ دسی‌زیمنس بر متر، پ هاش $۷/۸$ ، کربنات کلسیم $۸/۵$ درصد، ماده آلی $۱/۰$ درصد، فسفر قابل جذب $۴/۵$ میلی‌گرم در کیلوگرم، روی قابل استخراج با $۰/۶۶$ میلی‌گرم در کیلوگرم و نیتروژن کل $۰/۰۳$ درصد، پتاسیم ۱۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، آهن قابل استخراج با $۰/۶$ DTPA میلی‌گرم در کیلوگرم (۱۸، ۲۳) و جمعیت پایین قارچ‌های میکوریز آربوسکولار بومی در نظر گرفته شد.

کشت گیاه و انجام تیمارها

برای کشت گیاه، مقدار ۴ کیلوگرم خاک هوا خشک غیر استریل

شده به صورت زیر است:

کلینیزاسیون ریشه

اثر قارچ‌های میکوریز آربوسکولار و روی بر کلینیزاسیون ریشه معنی دار بوده ولی اثرات متقابل آنها معنی دار نشده است (جدول ۱). در اثر مایه‌زنی ذرت با قارچ میکوریزی درصد کلینیزاسیون ریشه نسبت به شاهد به طور معنی دار ($P < 0.05$) افزایش یافته ولی گونه‌های قارچی از این لحاظ با یکدیگر تفاوت معنی داری نداشته‌اند (جدول ۲). درصد کلینیزاسیون ریشه تا سطح ۱۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم تفاوت معنی داری با سطوح پایین‌تر روی نداشته است، ولی در سطح ۵۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم کلینیزاسیون ریشه به‌طور معنی داری کاهش یافته است (جدول ۲).

زیست توده گیاه

اثر مایه‌زنی با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار و سطوح روی بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه معنی دار بوده ولی آثار متقابل آنها معنی دار نشده است (جدول ۱). تیمارهای مایه‌زنی نشده با قارچ‌های میکوریزی، در تمام سطوح روی کمترین مقدار وزن خشک اندام هوایی و ریشه را نسبت به تیمارهای مایه‌زنی شده داشته‌اند ولی در هر یک از سطوح روی بین گونه‌های قارچ میکوریزی از نظر تأثیر بر زیست توده گیاه، اختلاف معنی داری وجود نداشته است (شکل ۱ A و B). تأثیر منفی کمبود روی (سطح صفر) و یا فراوانی و حالت سمی آن (سطح ۵۰۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم) بر زیست توده گیاهان میکوریزی گرچه مشهود است ولی به سطح معنی دار به لحاظ آماری نمی‌رسد، در حالی که در مورد تیمارهای مایه‌زنی نشده با قارچ‌های میکوریزی این آثار منفی کاملاً معنی دار شده است (شکل ۱).

غلظت فسفر گیاه و مقدار جذب آن

بر اساس جدول تجزیه واریانس، اثر مایه‌زنی با قارچ بر غلظت فسفر اندام هوایی معنی دار بوده ولی اثر سطوح روی و آثار متقابل قارچ و روی معنی دار نبوده است (جدول ۱). قارچ‌های

برداشت، تجزیه گیاه و آنالیزهای آماری

برداشت گیاهان ۴ ماه بعد از کاشت آنها انجام شد. ریشه‌ها از خاک خارج، مقداری از آن برای رنگ‌آمیزی و تعیین درصد کلینیزاسیون ریشه با روش کورمانیک و مک گرو به کار رفت و باقی مانده ریشه همراه با اندام هوایی پس از شستشو با آب مقطر به طور جداگانه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. پس از توزین، به وسیله آسیاب پودر گردید. ریشه و اندام هوایی خاکستر گردیده و پس از افزودن اسید کلریدریک ۲ نرمال و به حجم رساندن، غلظت روی در اندام هوایی و ریشه با دستگاه جذب اتمی مدل Shimadzu, Japan A-670 و غلظت فسفر اندام هوایی با روش رنگ سنجی نیترووانادومولیبدات با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل Shimadzu, Japan UV-3100 (کارآیی Phytoextraction efficiency)، انتقال (Translocation efficiency) و کارآیی قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در جذب روی (AMF feedback on plant HM content (AMF Effectiveness))

با کمک فرمول‌های زیر محاسبه شد (۲ و ۲۸):

$$\begin{aligned} &= (\text{میکروگرم در گرم}) \text{ کارآیی انتقال گیاهی} \\ &\quad \text{مقدار روی جذب شده در اندام هوایی} \\ &\quad \text{وزن خشک ریشه} \end{aligned} \quad [۱]$$

$$\begin{aligned} &= (\text{میکروگرم در گرم}) \text{ کارآیی جذب گیاهی} \\ &\quad \text{مقدار روی جذب شده در اندام گیاه} \\ &\quad \text{وزن خشک ریشه} \end{aligned} \quad [۲]$$

$$\begin{aligned} &= \text{درصد کارآیی قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در جذب روی} \\ &\quad * \frac{(\text{مقدار روی جذب شده در تیمارهای غیر میکوریزی} - \text{مقدار روی} \\ &\quad \text{جذب شده در تیمارهای میکوریزی})}{\text{مقدار روی جذب شده در تیمارهای غیر میکوریزی}} \end{aligned} \quad [۳]$$

کارهای آماری با نرم افزارهای MSTATC و SPSS و رسم نمودارها با Excel انجام گردید.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین پارامترهای اندازه‌گیری

جدول ۱. تجزیه واریانس اثرات فاکتورهای قارچ های میکوریز آربوسکولار و روی و آثار متقابل آنها بر شاخص های اندازه گیری شده گیاه ذرت

ضریب تغییرات (%)	اشتباه آزمایش	منابع تغییرات					میانگین مربعات شاخص های مورد بررسی
		قارچ های میکوریز آربوسکولار × روی	قارچ های میکوریز آربوسکولار	قارچ های میکوریز آربوسکولار	روی		
۹/۷	۱۹/۵	۱۲/۳ ^{ns}	۹۸۵۳/۶ ***	۱۶۹/۶ ***			کلینیزاسیون ریشه
۱۷/۲	۰/۷	۰/۴ ^{ns}	۲۵/۵ ***	۶/۱ ***			وزن خشک اندام هوایی
۱۳/۶	۰/۰۲	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۹۵۹ ***	۰/۰۹۹ **			وزن خشک ریشه
۹/۷	۰/۰۱	۰/۰۰۹ ^{ns}	۰/۵ ***	۰/۰۰۸ ^{ns}			غلاظت فسفر در اندام هوایی
	۱/۹	۰/۷ ^{ns}	۸۱/۰ ***	۹/۴ **			مقدار فسفر جذب شده در اندام هوایی
۱۲/۹	۱۰۱۴/۵	۵۹۱۶/۸ ***	۳۰۵۳/۷ *	۱۹۹۷۷۲/۸ ***			غلاظت روی در اندام هوایی
۱۴/۷	۳۹۴۳/۵۸۷	۴۶۱۰/۳ ^{ns}	۲۸۵۰/۵ ^{ns}	۱۳۱۰۶۵۰/۸ ***			غلاظت روی در ریشه
۱۹/۶	۵۸۸۹۱/۲	۱۷۲۱۹۴/۶۳۹ **	۲۳۱۶۰۰۹/۶ ***	۳۸۴۴۱۲۲/۳ ***			مقدار روی جذب شده در اندام هوایی
۲۴/۱	۱۲۴۹۲/۴	۴۱۲۳/۸ **	۲۱۱۷۴۹/۸ ***	۱۱۶۶۹۷۸/۵ ***			مقدار روی جذب شده در ریشه
۲۹/۵	۱۱۱۲۱۲/۴	۲۱۳۴۶۸/۴ ^{ns}	ns	۱۹۸۴۴۹/۰	۴۴۱۱۶۸۴/۵ ***		کارآبی استخراج گیاهی روی
۲۸/۰	۰/۷	۰/۷ ^{ns}	۳/۰ *	۲/۴ **			کارآبی انتقال روی
۱۸/۰	۸۲۹۵۴/۵	۱۲۴۰۵۸/۲ ^{ns}	۸۰۵۲۵۹/۹ ***	۱۰۰۲۶۴۶۶/۲ ***			کارآبی جذب روی
-	۴۰	۱۲	۳	۴			درجه آزادی

*، ** و ***: به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال ۱/۵ و ۱/۱ درصد ns

وجود نداشته است (جدول ۲). بیشترین مقدار فسفر جذب شده در اندام هوایی تیمارهای مایه زنی نشده با قارچ میکوریزی، در سطح ۱۰ میلی گرم روی در کیلوگرم بوده است. با افزایش سطح روی مقدار فسفر جذب شده در اندام هوایی کاهش یافته و در بالاترین سطح روی (۵۰۰ میلی گرم روی بر کیلوگرم) به حداقل رسیده است. در گیاهان مایه زنی شده با قارچ های میکوریزی، کاهش جذب فسفر در ارتباط با افزایش سطح روی، کمتر است ولی به لحاظ آماری به سطح معنی دار نمی رسد (جدول ۲).

میکوریزی از نظر تأثیر بر غلاظت فسفر اندام هوایی با یکدیگر اختلاف معنی داری نداشته اند ولی نسبت به تیمارهای غیر میکوریزی به طور معنی داری غلاظت فسفر اندام هوایی گیاه را افزایش داده اند (جدول ۲). در تیمارهای مایه زنی نشده با قارچ های میکوریزی، با افزایش مقدار روی، غلاظت فسفر در اندام هوایی کاهش یافته و در سطح ۵۰۰ میلی گرم روی در کیلوگرم این کاهش غلاظت به سطح معنی دار رسیده است، در حالی که چنین کاهشی در تیمارهای معادل میکوریزی دیده نمی شود (جدول ۲). اثر کلی قارچ و روی بر مقدار جذب فسفر در اندام هوایی معنی دار بوده ولی آثار متقابل آنها معنی دار نبوده است. مقدار فسفر جذب شده در ریشه و اندام هوایی در تیمارهای میکوریزی نسبت به شاهد به طور معنی دار بالاتر بوده ولی در بین گونه های قارچی از این نظر اختلاف معنی داری مشاهده نگردیده است (جدول ۲) در تیمارهای میکوریزی، با افزایش سطح روی، اختلاف معنی دار در تیمارهای مختلف

غلاظت روی گیاه

اثر قارچ، روی و آثار متقابل آنها بر غلاظت روی اندام هوایی معنی دار بوده است (جدول ۱). غلاظت روی در اندام هوایی گیاهان مایه زنی شده با گلوموس موسه ای تا سطح ۱۰۰ میلی گرم روی در کیلوگرم، تفاوت قابل توجهی با سایر گونه های قارچی نداشته ولی در سطح ۵۰۰ میلی گرم روی بر

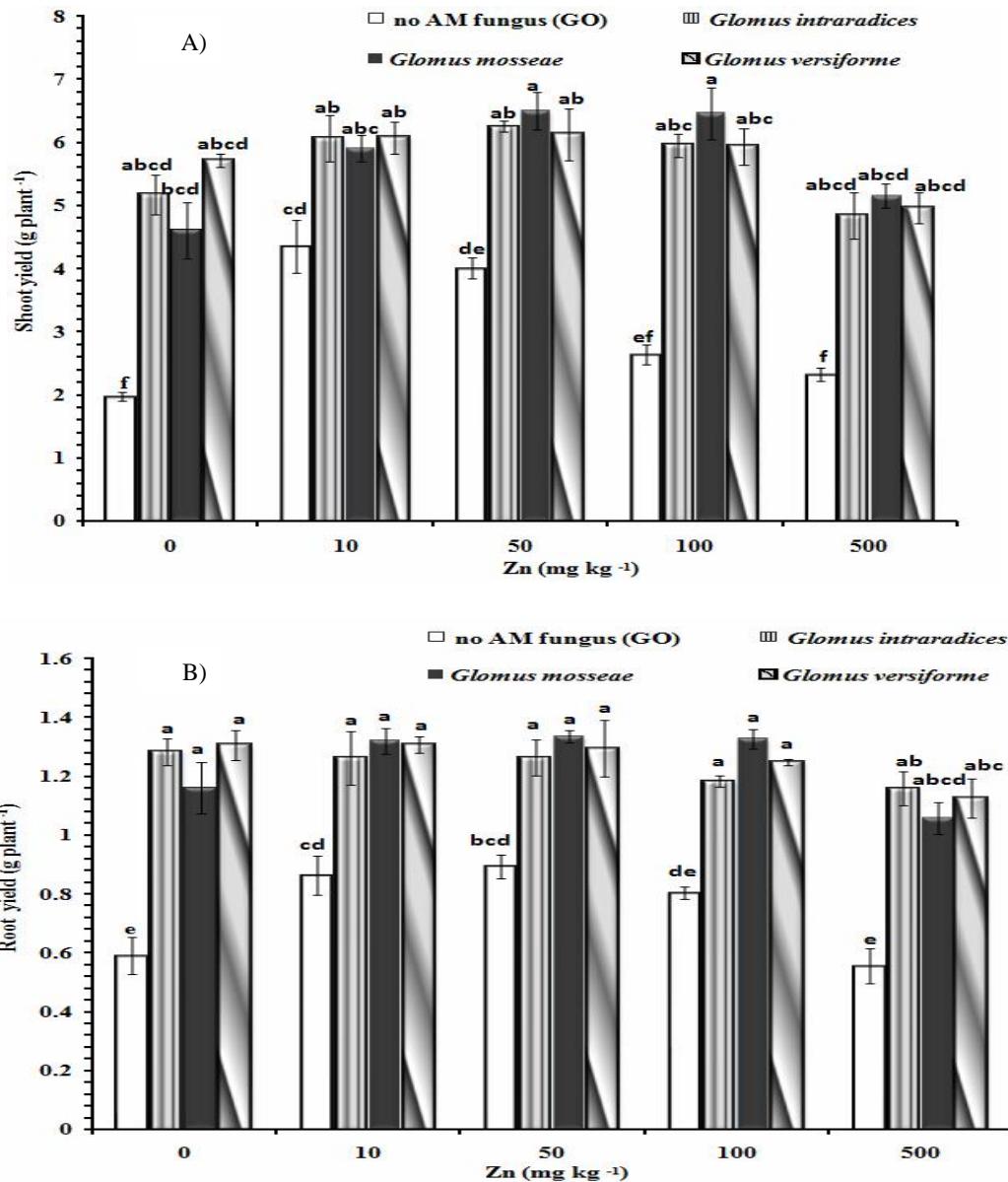
جدول ۲. مقایسه میانگین آثار متقابل گونه‌های قارچ میکوریز آریوسکولار و روی بر صفات اندازه‌گیری شده ذرت

	روی × قارچ میکوریز آریوسکولار	کلینیزاسیون ریشه %	غلظت فسفر در اندام هوایی mg g ⁻¹	مقدار فسفر جذب شده در اندام هوایی mg plant ⁻¹
G ₀ Z ₀	۱۰/۲ ^d	۱/۱ ^b	۲/۱ ^{de}	
G ₀ Z ₁	۱۰/۱ ^d	۱/۱ ^b	۴/۵ ^{cde}	
G ₀ Z ₂	۵/۴ ^d	۱/۰ ^{bc}	۴/۰ ^{cde}	
G ₀ Z ₃	۵/۱۰ ^d	۰/۹ ^{bc}	۲/۴ ^{de}	
G ₀ Z ₄	۴/۱ ^d	۰/۸ ^c	۱/۹ ^e	
G ₁ Z ₀	۶۲/۱ ^a	۱/۴ ^a	۷/۲ ^{ab}	
G ₁ Z ₁	۶۲/۱ ^a	۱/۴ ^a	۸/۵ ^a	
G ₁ Z ₂	۶۲/۱ ^a	۱/۴ ^a	۸/۸ ^a	
G ₁ Z ₃	۶۲/۰ ^a	۱/۴ ^a	۸/۲ ^a	
G ₁ Z ₄	۵۰/۱ ^c	۱/۴ ^a	۶/۷ ^{ab}	
G ₂ Z ₀	۶۰/۲ ^a	۱/۳ ^a	۶/۱ ^{abc}	
G ₂ Z ₁	۶۰/۳ ^a	۱/۳ ^a	۷/۸ ^a	
G ₂ Z ₂	۵۹/۹ ^a	۱/۳ ^a	۸/۳ ^a	
G ₂ Z ₃	۵۹/۲ ^{ab}	۱/۳ ^a	۸/۶ ^a	
G ₂ Z ₄	۵۰/۸ ^c	۱/۳ ^a	۶/۸ ^{ab}	
G ₃ Z ₀	۶۰/۷ ^a	۱/۳ ^a	۶/۸ ^{ab}	
G ₃ Z ₁	۵۹/۵ ^{ab}	۱/۳ ^a	۸/۱ ^a	
G ₃ Z ₂	۵۹/۳ ^{ab}	۱/۳ ^a	۷/۹ ^a	
G ₃ Z ₃	۵۴/۳ ^{abc}	۱/۳ ^a	۷/۸ ^a	
G ₃ Z ₄	۵۱/۵ ^{bc}	۱/۳ ^a	۶/۵ ^{ab}	
LSD value _{α=۰/۰۵}	۷/۳	۰/۲	۲/۳	

میانگین‌های دارای حروف مشترک با یکدیگر اختلاف معنی‌دار ندارند (آزمون چند دامنه‌ای دانکن $a=0/05$).

حروف اختصاری: بدون قارچ (G₀), گلوموس اینترارادیسز (G₁), گلوموس موسه‌ای (G₂), گلوموس ورسیفورم (G₃), (Z₀) سطح صفر روی, (Z₁) سطح ۱۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم, (Z₂) سطح ۵۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم, (Z₃) سطح ۱۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم و (Z₄) سطح ۵۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم.

نداشته‌اند. در سطح ۵۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم، غلظت روی در اندام هوایی گیاهان مایه‌زنی شده با گلوموس موسه‌ای اختلاف معنی‌داری با شاهد نداشته و به بالاترین مقدار رسیده است، در حالی‌که در گیاهان مایه‌زنی شده با گلوموس ورسیفورم و گلوموس اینترارادیسز، افزایش غلظت روی نسبت به مقدار آن در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم بسیار کمتر بوده و به لحاظ آماری معنی‌دار نشده است (شکل ۲A). اثر افزودن روی بر غلظت روی ریشه معنی‌دار بوده ($P<0/001$) ولی اثر قارچ و آثار متقابل قارچ و روی معنی‌دار نبوده است (جدول ۱). با افزایش سطح روی، غلظت روی در کیلوگرم نسبت به آنها افزایش معنی‌داری یافته است (شکل ۲A). در سطح صفر روی، اختلاف معنی‌داری از نظر غلظت روی در اندام هوایی، بین گونه‌های قارچی با یکدیگر و یا با شاهد وجود نداشته است، گرچه مقدار آن در تیمارهای میکوریزی بالاتر بوده است. در سطوح ۱۰ و ۵۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم، قارچ‌های میکوریزی نسبت به شاهد غلظت روی را افزایش داده‌اند و غلظت این عنصر در گیاهان مایه‌زنی شده با گلوموس اینترارادیسز بالاترین بوده است. در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم، تیمارهای مایه‌زنی شده با یکدیگر و همین‌طور با شاهد تفاوت معنی‌داری از نظر غلظت روی

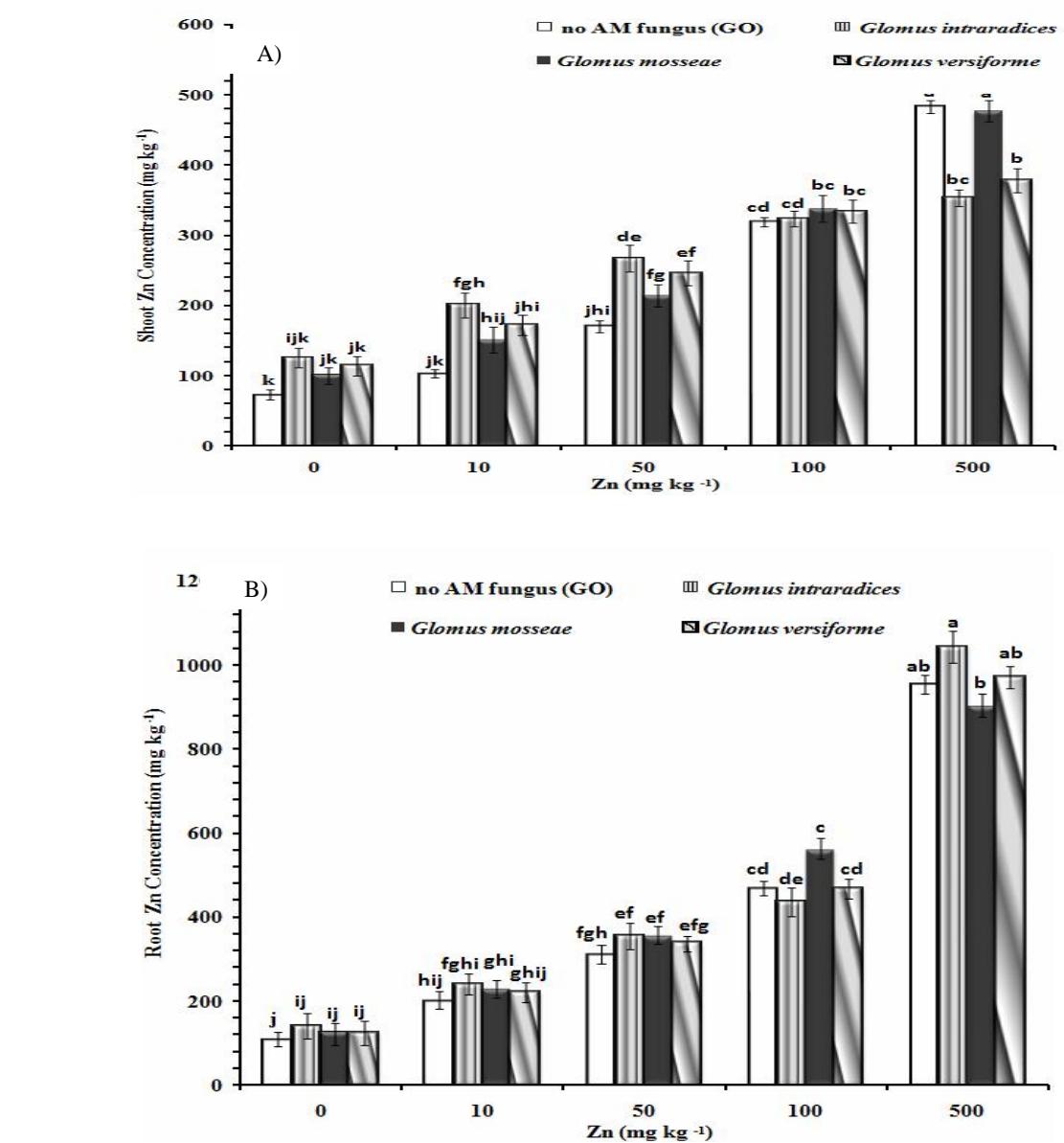


شکل ۱. وزن خشک اندام هوایی (A) و ریشه (B) (\pm SE میانگین) گیاه ذرت مایهزنی شده با گونه‌های قارچ میکوریز آربوسکولار در سطوح مختلف روی

داده‌اند (شکل ۲).

مقدار روی جذب شده در گیاه اثر قارچ، روی و اثر متقابل آنها بر مقدار روی جذب شده در اندام هوایی و ریشه معنی‌دار بوده است (جدول ۱). مقدار روی جذب شده در اندام هوایی، به طور معنی‌داری در تیمارهای

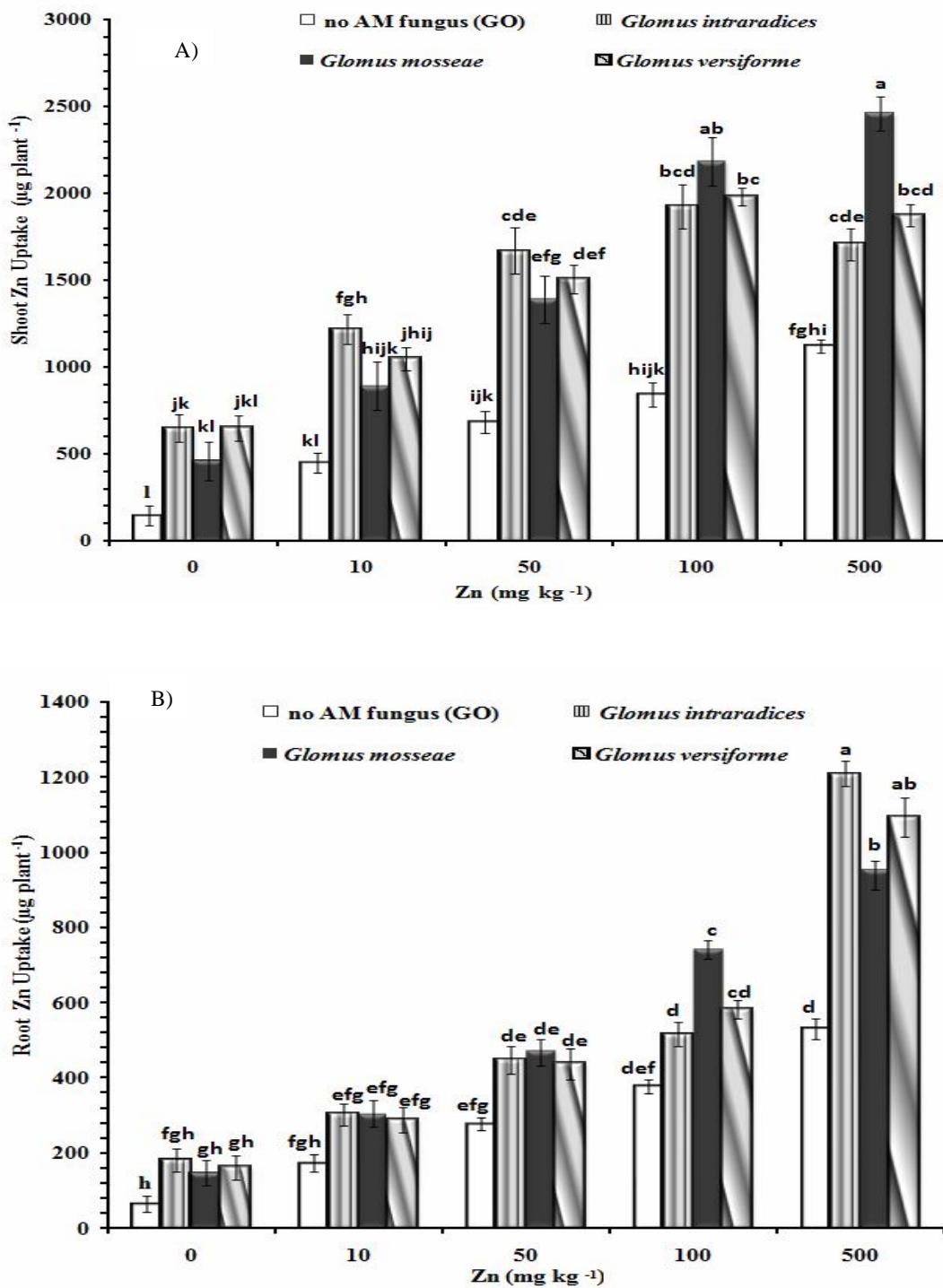
ریشه‌ها به طور معنی‌دار افزایش یافته است (شکل ۲). در هر سطح روی، غلظت روی ریشه‌ها در تیمارهای میکوریزی با شاهد اختلاف معنی‌داری نداشته است. با این حال، در سطح ۵۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم، گیاهان مایهزنی شده با گلوموس اپترارادیسز بالاترین و گیاهان مایهزنی شده با گلوموس موسه‌ای کمترین غلظت روی در ریشه‌ها را نشان



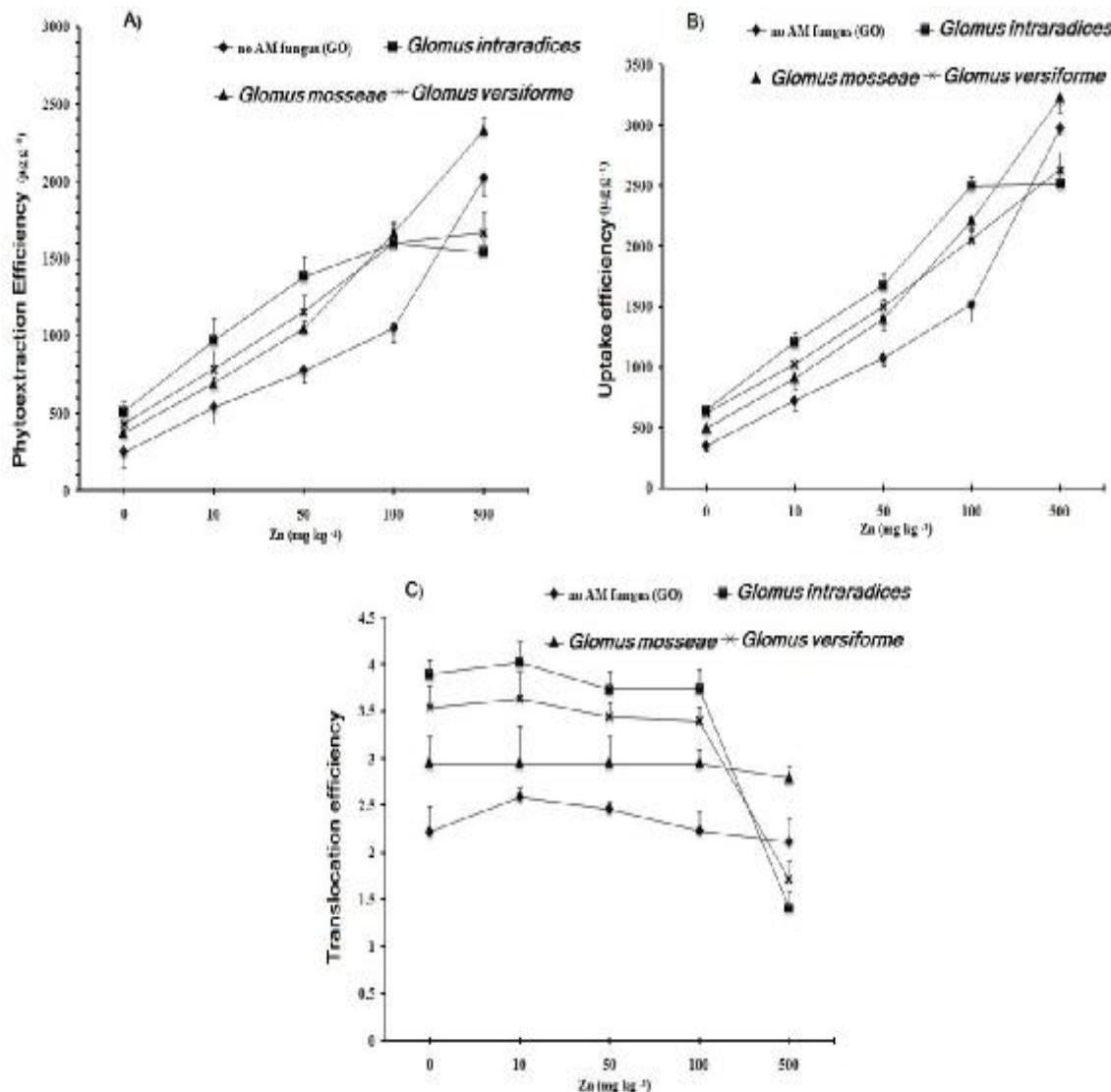
شکل ۲. غلظت روی در اندام هوایی (A) و ریشه (B) (\pm SE) (A) و ریشه (B) (B) میانگین گیاه ذرت مایه‌زنی شده با گونه‌های قارچ میکوریز آربوسکولار در سطوح مختلف روی

گیاهان مایه‌زنی شده با گلوموس موسه‌ای بالاتر بوده است (شکل A^۳). در سطح ۵۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم، مقدار روی جذب شده در اندام هوایی گیاهان مایه‌زنی شده با گلوموس موسه‌ای به طور معنی‌داری در مقایسه با دو گونه دیگر بالاتر بوده است (شکل A^۳). مقدار جذب روی در ریشه گیاهان میکوریزی تا سطح ۵۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم تفاوت معنی‌داری با

میکوریزی نسبت به شاهد بالاتر بوده است (شکل A^۳) در سطح ۰، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم، مقدار روی جذب شده در اندام هوایی گیاهان میکوریزی تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشته است، با این وجود این مقدار تا ۵۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم در گیاهان مایه‌زنی شده با گلوموس ایترارادیسز و در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم در



شکل ۳. مقدار جذب روی در اندام هوایی (A) و ریشه (B) (میانگین \pm SE) گیاه ذرت مایه‌زنی شده با گونه‌های قارچ میکوریز آربوسکولار در سطوح مختلف روی



شکل ۴. کارآیی استخراج گیاهی (A)، جذب (B) و انتقال (C) روی در گیاه ذرت مایهزنی شده با گونه‌های قارچ میکوریز آربوسکولار در سطوح مختلف روی. خطوط عمودی نشان‌دهنده خطای استاندارد سه تکرار هستند.

معنی‌دار نشده ولی اثر سطوح روی بر کارآیی استخراج گیاهی معنی‌دار شده است. اثر قارچ و روی بر کارآیی انتقال و جذب این عنصر معنی‌دار بوده ولی آثار متقابل آنها معنی‌دار نبوده است (جدول ۱). کارآیی استخراج و جذب گیاهی، با افزایش سطح روی به طور معنی‌دار، افزایش یافته است (شکل A⁴ و B⁴). به طور کلی تا سطح ۱۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم، میزان استخراج گیاهی در گیاهان مایهزنی شده به صورت گلوموس

یکدیگر و با شاهد نداشته ولی این مقدار در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم در گیاهان مایهزنی شده با گلوموس موسه‌ای و در سطح ۵۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم در گیاهان مایهزنی شده با گلوموس ایترارادیسز بالاتر بوده است (شکل B³).

کارآیی جذب، انتقال و استخراج گیاهی روی در گیاه ذرت اثر قارچ و آثار متقابل قارچ و روی بر کارآیی استخراج گیاهی

در صد، می‌تواند به دلیل حساسیت بسیار زیاد گونه‌های بومی قارچ میکوریز آربوسکولار به سمیت روی در خاک انتخاب شده برای بستر کشت باشد. درصد کلینیزاسیون ریشه گیاهان ذرت مایه‌زنی شده با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار نسبت به تیمارهای مایه‌زنی نشده، به طور معنی داری افزایش یافته و در گیاهان میکوریزی با افزایش سطح روی تا ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم تغییر معنی داری نداشته است (جدول ۲). به طور کلی نتایج حاکی از این است که قارچ‌های انتخاب شده برای انجام این آزمون به خوبی قادر به کلینیزه کردن ریشه‌ها و ایجاد هم‌زیستی با گیاه ذرت بوده‌اند. این گونه‌های قارچی از سطوح آلودگی زیاد و متوسط فلزات سنگین روی و سرب جدا شده‌اند و از این رو ممکن است به عنوان سویه‌های قارچی سازگار و متحمل به تنفس روی محسوب شوند. محققین گزارش داده‌اند که سویه‌های قارچی جدا شده از خاک‌های آلود به فلزات سنگین در مقایسه با سویه‌های موجود در خاک‌های غیر آلود، تحمل بیشتری نسبت به تنفس فلزات سنگین دارند و با شرایط آلودگی خاک، سازگارترند (۱۹ و ۳۰). کاهش کلینیزاسیون ریشه گیاه ذرت در بالاترین سطح روی (۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، می‌تواند به دلایل زیر باشد: ۱- گونه‌های قارچی از خاک‌هایی که در آنها غلظت روی قابل استخراج با DTPA حدود ۴۵ و ۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده، منشأ گرفته‌اند، در حالی که در خاک مورد استفاده در آزمون گلخانه‌ای، در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم، مقدار روی قابل استخراج با DTPA بیشتر از خاک اولیه است (۳۱). ۲- کاهش کلینیزاسیون ریشه ممکن است یک مکانیسم برای محدود کردن جذب اضافی برخی از فلزات سنگین باشد (۲۲). در این مطالعه، در نتیجه کاهش کلینیزاسیون ریشه، غلظت و جذب فسفر و روی کاهش معنی دار پیدا نکرده است (جدول ۲). ۳- بعضی محققین کاهش کلینیزاسیون ریشه را، در نتیجه آثار سمی فلزات سنگین بر روی اندام‌های قارچ میکوریز آربوسکولار بیان نموده‌اند (۱۲).

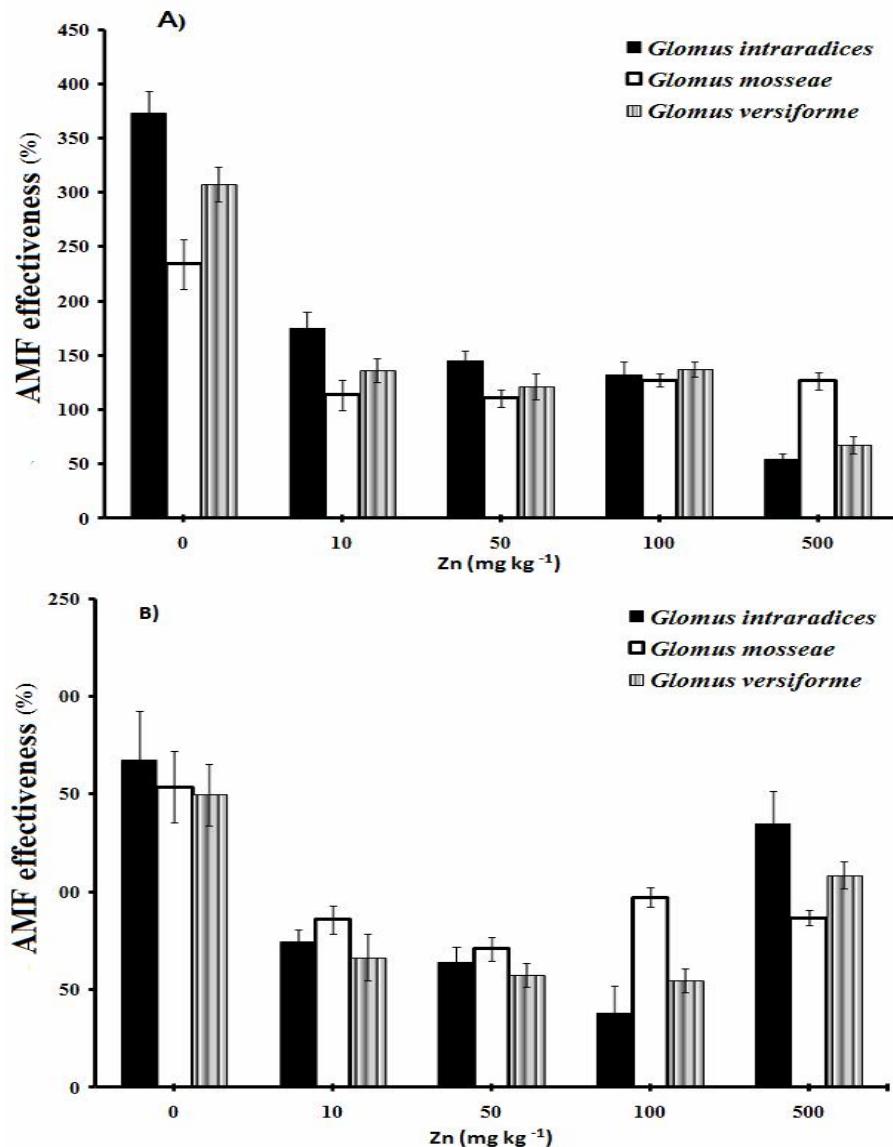
در گیاهان مایه‌زنی نشده، با افزایش سطح روی، وزن خشک اندام هوایی گیاه ذرت در سطوح بالاتر از ۱۰ میلی‌گرم روی بر

اینترارادیسز > گلوموس ورسیفورم > گلوموس موسه‌ای > شاهد بوده است ولی در سطح ۵۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم به صورت گلوموس موسه‌ای > شاهد > گلوموس ورسیفورم > گلوموس اینترارادیسز تغییر یافته است (شکل A۴). تا سطح ۱۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم، میزان کارآیی جذب روی در گلوموس اینترارادیسز بیشتر از سایر تیمارها بوده ولی در سطح ۵۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم، گلوموس موسه‌ای بالاترین کارآیی جذب روی را نشان داده است (شکل B۴). اثر قارچ و روی بر کارآیی انتقال روی معنی دار بوده ولی اثر متقابل آنها معنی دار نشده است (جدول ۱). بر اساس شکل C۴ در گیاهان میکوریزی کارآیی انتقال تا سطح ۱۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم، به صورت: گلوموس اینترارادیسز > گلوموس ورسیفورم > گلوموس موسه‌ای > شاهد بوده ولی در سطح ۵۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم، بالاترین کارآیی در تیمارهای مایه‌زنی شده با گلوموس موسه‌ای است (شکل C۴).

کارآیی قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در جذب روی گیاه ذرت بالاترین میزان کارآیی هر سه گونه قارچ میکوریز آربوسکولار در افزایش جذب روی در اندام هوایی و همین‌طور در ریشه گیاه ذرت، در پایین ترین سطح روی قابل دسترس (Z₀) دیده می‌شود (شکل A۵ و B). با افزایش سطح روی کارآیی هر سه گونه قارچی کاهش پیدا می‌کند. در سطح ۵۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم، گونه گلوموس اینترارادیسز کارآیی قابل توجهی در افزایش جذب روی در ریشه ذرت نشان داده است (شکل B۵).

بحث

جمعیت بومی قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در خاک مورد استفاده در آزمون گلخانه‌ای بسیار پایین بوده، به طوری که کلینیزاسیون ریشه گیاه ذرت در تیمارهای شاهد بسته به سطوح روی، بین ۴ تا ۱۰ درصد متغیر بوده است (جدول ۲). نتایج بررسی کلینیزاسیون ریشه گیاه ذرت در گیاهان مایه‌زنی نشده نشان داد که با افزایش سطح روی، درصد کلینیزاسیون ریشه گیاه به شدت کاهش یافته است (جدول ۲). این کاهش حدود ۶۰



شکل ۵. کارآیی قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در افزایش جذب روی در اندام هوایی (A) و ریشه (B) گیاه ذرت در سطوح مختلف روی. خطوط عمودی نشان‌دهنده خطای استاندارد سه تکرار می‌باشند.

است. تداخل جذب روی با آهن، فسفر و عناصر دیگر ممکن است در بروز علائم سمیت روی و کاهش عملکرد گیاه ذرت مؤثر باشد (۳). مقادیر بالای روی در برگ‌ها، تولید کلروفیل را احتمالاً به دلیل تداخل با متابولیسم آهن کاهش می‌دهد که دلایل این کاهش طبق نظر روزن و همکاران (۲۴) عبارت‌اند از: ۱- در مسیر سنتز کلروفیل، روی ممکن است در رقابت با آهن،

کیلوگرم، کاهش معنی‌دار داشته (شکل ۱) و علائم سمیت روی شامل کلروز بین رگبرگی و کوتلگی در سطوح ۱۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم کاملاً مشخص بوده‌اند. در صورتی که در گیاهان مایه‌زنی شده، وزن خشک اندام هوایی گیاه ذرت در تمام سطوح روی در مقایسه با گیاهان مایه‌زنی نشده افزایش داشته (شکل ۱) و علائم سمیت روی در این گیاهان دیده نشده

تجمع بیشتری داشته است. جمال و همکاران (۲۰۰۲) نیز گزارش کرده‌اند که در خاک آلوده به روی، مقدار روی در گیاهان سویا و عدس مایه‌زنی شده با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در مقایسه با تیمارهای شاهد بالاتر بوده است. در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم و بالاتر، غلظت روی در بافت‌های گیاهی از سطح اعلام شده برای کمبود (۱۵-۲۰) میلی‌گرم در کیلوگرم) و نرمال (۱۰-۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) فراتر رفته و در محدوده سمی (۵۰۰-۳۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) (۱۰، ۲۰ و ۲۲) قرار گرفته است. در این شرایط در گیاهان مایه‌زنی نشده با قارچ‌های میکوریزی علائم مسمومیت به طور واضح نمایان شده و زیست توده گیاه به طور معنی‌دار کاهش یافته است. در همین سطوح روی (۱۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم)، غلظت این عنصر در گیاهان مایه‌زنی شده نیز به شدت افزایش یافته و به محدوده سمی رسیده است. مقدار روی جذب شده در اندام هوایی گیاهان مایه‌زنی شده با گلوموس موسه‌ای و در ریشه‌های گیاهان مایه‌زنی شده با گلوموس اینترارادیسز به بالاترین سطح رسیده و با گیاهان مایه‌زنی نشده تفاوت کاملاً معنی‌دار پیدا کرده است. با این وجود علائم مسمومیت در این گیاهان، مشاهده نشده و زیست توده گیاه، کاهش معنی‌داری نسبت به سطوح پایین‌تر روی نداشته است. بعضی محققین در گیاهان مایه‌زنی شده با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار، افزایش غلظت فلزات سنگین تا سطح سمی را مشاهده کرده‌اند (۱۵). چن و همکاران (۶) در گیاهان ذرت (رقم ۱۰۸ ND) مایه‌زنی شده با گلوموس کالدونیوم، در خاکی با غلظت اولیه روی قابل استخراج با ۰/۴۸ DTPA، میلی‌گرم در کیلوگرم، در سطح ۳۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم، غلظت روی در برگ، ساقه و ریشه‌های گیاه را به ترتیب ۲۵۰، ۴۰۰ و ۷۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نشان داده‌اند. وانگ و همکاران (۲۷) در گیاهان ذرت (رقم 2-Yeden-2) مایه‌زنی شده با مخلوطی از چندین گونه قارچ میکوریز آربوسکولار، در خاکی با غلظت روی کل و قابل استخراج با HCl به ترتیب ۴۴۶ و ۷۳۳/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم، غلظت روی

مکان‌های خاص آنزیمی را اشغال کند ۲-۲-ممکن است روی بر نسبت $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ گیاه اثر گذاشته و مانع از تبدیل Fe^{2+} به Fe^{3+} در ریشه‌ها شود ۳- روی ممکن است بر توزیع بین سلولی و سلولی و یا قابلیت دسترسی آهن در برگ‌ها اثر بگذارد. غلظت و جذب فسفر در اندام هوایی گیاهان ذرت مایه‌زنی نشده، با افزایش سطح روی به شدت کاهش یافته، در صورتی که در تیمارهای میکوریزی غلظت فسفر کاهشی نداشته و مقدار کلی فسفر جذب شده در اندام هوایی تا سطح ۱۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم به طور قابل توجه افزایش یافته است (جدول ۲). در رابطه با نقش قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در بهبود تغذیه فسفر گیاه در شرایط سمیت روی گزارش‌های زیادی وجود دارد و این هم‌زیستی به عنوان مکانیسمی در افزایش تحمل پذیری گیاه معرفی شده است (۴، ۵، ۶ و ۷). در خاک‌های آلوده به روی، قارچ‌های میکوریز آربوسکولار با افزایش جذب فسفر، سبب متعادل شدن عناصر غذایی در گیاه شده و زیست‌توده گیاه و همچنین تحمل پذیری آن را نسبت به سطوح بالای روی افزایش می‌دهند (اثر رقت). در خاک‌های غیر آلوده، روی بواسطه گرانولهای پلی فسفات در هیف‌ها منتقل می‌شود، اما در خاک‌های آلوده مکانیسم‌های انتقال روی در هیف‌ها مشخص نیست. فسفر ممکن است روی را در هیف و ریشه‌ها رسوب دهد و به طور مستقیم بواسطه تشکیل ملکولهای اسید فیتیک، سبب سکوستره شدن روی در گیاه و همچنین کاهش سمیت آن شود (۷). نتایج این تحقیق نشان داد که در گیاه ذرت مایه‌زنی شده با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار، غلظت و مقدار جذب روی، کارآیی استخراج گیاهی و انتقال روی به اندام هوایی گیاه، در ارتباط با گونه‌های قارچی متفاوت بوده است. مایه‌زنی گیاه با گونه‌های قارچی در مقایسه با گیاهان مایه‌زنی نشده، نقش مؤثری در افزایش مقدار روی اندام هوایی و ریشه گیاه ذرت داشته است. به طور مشابهی، جونر و لوال (۲۰۰۱) با مقایسه تیمارهای غیر میکوریزی و میکوریزی شبدر و ذرت در یک خاک آلوده به روی، به این نتیجه رسیده‌اند که روی در گیاهان میکوریزی

روی ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم ترتیب کارآیی به صورت گلوموس موسه‌ای > شاهد > گلوموس ورسیفورم > گلوموس ایترارادیسز تعییر یافته است. برخی مطالعات نشان داده‌اند که افزایش آلدگی روی، ممکن است برای گیاه به یک سطح بحرانی برسد که در سطوح پایین تر از آن، جذب روی تقویت و درسطوح بالاتر انتقال به اندام هوایی گیاه میزان محدود می‌گردد. چن و همکاران با استفاده از منبع سولفات روی در خاک‌های آهکی، سطح بحرانی را برای گیاه شبدر ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش داده‌اند (۴ و ۵). در این تحقیق، در آزمون گلخانه‌ای، سطح بحرانی برای گیاه ذرت مایهزنی شده با گونه‌های گلوموس ایترارادیسز و گلوموس ورسیفورم، ۱۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم به دست آمده است ولی در مورد گلوموس موسه‌ای وضعیت متفاوت بوده و برای تعیین سطح بحرانی نیاز به در نظر گرفتن سطوح بالاتر روی می‌باشد. چن و همکاران (۴، ۵ و ۶)، سطح بحرانی مذکور را با استفاده از سویه‌های معمولی قارچ میکوریز آربوسکولار که از حاک‌های غیر آلدود جداسازی و تکثیر شده بودند، در آزمایش‌های گلدانی روی شبدر تعیین نمودند، در حالی که در این تحقیق، سویه‌های قارچی از خاک‌های آلدود به فلزات سنگین منشأ گرفته‌اند و ممکن است سطح بحرانی متناسب گونه و رقم گیاه و جدایه قارچ و نیز با شرایط خاک، تعییر نشان دهد. در مورد اثر گونه‌های قارچی بر روی گیاه میزان و واکنش آنها در سطوح مختلف روی می‌توان نتیجه گیری کرد که: در گیاه ذرت، تا سطح ۱۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم، سه گونه قارچی در جذب، انتقال و استخراج روی به اندام‌های هوایی گیاه نقش مهمی داشته‌اند و کارآیی آنها به صورت "استخراج گیاهی" می‌باشد و در این میان، نقش گلوموس ایترارادیسز بیشتر بوده است. در سطح ۵۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم، این رویه برای تیمارهای ذرت مایهزنی شده با گلوموس موسه‌ای تعییری نکرده ولی در تیمارهای مایهزنی شده با گلوموس ایترارادیسز و گلوموس ورسیفورم به صورت تجمع و ثابت در ریشه‌ها تعییر کرده است و کارآیی آنها به صورت "ثبت گیاهی" می‌باشد. به

در اندام هوایی و ریشه گیاه را به ترتیب ۸۴۶/۲ و ۱۵۹۶ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش داده‌اند. به نظر می‌رسد که قارچ‌های میکوریز آربوسکولار، آستانه تحمل پذیری گیاه به سمیت فلز سنگین روی را افزایش می‌دهند. این موضوع احتمالاً به دلیل واکنش‌های فیزیولوژیک در سطح تماس گیاه-قارچ، بیان ژن‌های خاص یا کاهش آنها، تعییر الگوی توزیع فلزات سنگین در اندام‌های گیاه، مکانیسم‌های غیر مستقیم شامل جذب بیشتر عناصر فسفر و آهن، افزایش عملکرد گیاه و یا مکانیسم‌های مستقیم، شامل جذب فلز در سطح یا درون اندام‌های قارچی، کلاته شدن فلز در سیتوپلاسم به وسیله متالوتیونین‌ها، سکوستره شدن فلزات در گرانولهای پلی فسفات داخل واکوئل‌هاست (۱۳). مکانیسم مطرح دیگر در این زمینه، تحریک سیستم فنولیک گیاه به واسطه کلینیزاسیون میکوریزی است که در نتیجه، تیولهایی مثل گلوتاتیون تشکیل می‌شوند. این ترکیب‌ها از نظر ساختاری با فیتوکلاتین‌ها ارتباط دارند و با تشکیل پیوند با فلز سنگین علاوه بر ممانعت از بروز مسمومیت در گیاه، در سمیت زدایی خاک‌های آلدود نیز از طریق جذب و تجمع بالای فلزات سنگین در گیاه، نقش مهمی ایفا می‌کنند (۱۹). توزیع روی در اندام‌های گیاه ذرت بسته به گونه قارچی متفاوت بوده است. مقدار روی جذب شده در اندام هوایی گیاهان مایهزنی شده با گلوموس ایترارادیسز و گلوموس ورسیفورم در سطح ۵۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم نسبت به سطح ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم تفاوت معنی‌داری نداشته ولی در ریشه‌های همین گیاهان مقدار روی به طور معنی‌دار افزایش یافته و تجمع آن در ریشه‌ها کاملاً مشهود است (شکل B3). بر عکس، در گیاهان مایهزنی شده با گلوموس موسه‌ای، در بالاترین سطح روی، مقدار این عنصر در مقایسه با دو گونه قارچی دیگر، در اندام هوایی به بالاترین و در ریشه‌ها به پایین‌ترین سطح رسیده است (شکل B3). کارآیی جذب، استخراج گیاهی و انتقال روی در گیاه ذرت مایهزنی شده با سه گونه قارچ ریشه آربوسکولار، تا سطح ۱۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم در مقایسه با تیمارهای شاهد بالاتر بوده ولی در سطح

داشته‌اند. بنابراین با توجه به نوع کاربری زمین اگر هدف از کاشت گیاه، اصلاح خاک و زدودن آلودگی باشد، مایه‌زنی با گلوموس موسه‌ای مناسب‌تر به نظر می‌رسد، در حالیکه اگر برداشت محصول و ارزش تغذیه‌ای آن مورد نظر باشد، ترجیحاً استفاده از گلوموس ایترارادیسز پیشنهاد می‌شود. اثبات این نتایج، نیاز به ادامه پژوهش‌های گسترده‌تری دارد.

طور کلی نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که کارآیی قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در گیاه‌پالایی خاک‌های با آلودگی کم و متوسط، بیشتر به صورت استخراج گیاهی بوده است ولی در خاک‌های با آلودگی زیاد روی، گلوموس ایترارادیسز در تجمع روی در ریشه‌ها یا "ثبت گیاهی" و گلوموس موسه‌ای در استخراج و انتقال این عنصر به اندام هوایی گیاه نقش موثرتری

منابع مورد استفاده

1. زارعی، م. ۱۳۸۷. بررسی تنوع قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در خاک‌های آلوده به فلات سنگین و کارآیی آنها در گیاه‌پالایی. رساله دکتری در گرایش بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
2. Audet, P. and C. Charest. 2007. Dynamics of arbuscular mycorrhizal symbiosis in heavy metal phytoremediation: Meta-analytical and conceptual perspectives. Environ. Poll. 147:609-614.
3. Chaney, R.L. 1993. Zinc phytotoxicity. In: Robson, A. D. (Ed.), Zinc in Soil and Plants. Kluwer Academic Pub., Dordrecht, The Netherlands.
4. Chen, B., P. Christie and X. Li. 2001. A modified glass bead compartment cultivation system for studies on nutrient and trace metal uptake by arbuscular mycorrhiza. Chemosphere 42:185-192.
5. Chen, B.D., X.L. Li, H.Q. Tao, P. Christie and M.H. Wong. 2003. The role of arbuscular mycorrhiza in zinc uptake by red clover growing in a calcareous soil spiked with various quantities of zinc. Chemosphere 50:839-846
6. Chen, B.D., H. Shen, X. Li, G. Feng and P. Christie. 2004. Effects of EDTA application and arbuscular mycorrhizal colonization on growth and zinc uptake by maize (*Zea mays* L.) in soil experimentally contaminated with zinc. Plant Soil 261:219-229.
7. Christie, P., X. Li and B.D. Chen. 2004. Arbuscular mycorrhiza can depress translocation of zinc to shoots of host plants in soils moderately polluted with zinc. Plant Soil 261:209-217.
8. Cottenie, A. 1980. Soil and plant testing as a basis of fertilizer recommendation. FAO Soils Bulletin, No. 38/2.
9. Díaz, G., C. Azcon-Aguilar and M. Hornubia. 1996. Influence of arbuscular mycorrhizae on heavy metal (Zn and Pb) uptake and growth of Lygeum spartum and Anthyllis cystoides. Plant Soil 180:241-249.
10. Frisberg, L., G.F. Nordberg, E. Kessler and V.B. Vouke. 1996. Handbook of the Toxicology of Metals. second ed., Elsevier Science Publication, Amsterdam.
11. Gaur, A. and A. Adholeya. 2004. Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. Current Sci. 86:528-534.
12. Gildon, A. and P.B. Tinker. 1983. Interactions of vesicular-arbuscular mycorrhizal infection and heavy metals in plants. The effects of heavy metals on the development of vesicular-arbuscular mycorrhizas. New Phytol., 95:247-261.
13. Gohre, V. and U. Paszkowski. 2006. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation. Planta 223:1115-1122.
14. Jamal, A., N. Ayub, M. Usman and A.G. Khan. 2002. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance zinc and nickel uptake from contaminated soil by soybean and lentil. Int'l. J. Phytorem. 4(3):205-221.
15. Joner, E.J. and C. Leyval. 1997. Uptake of 109Cd by roots and hyphae of a *Glomus mosseae*/Trifolium subterraneum mycorrhiza from soil amended with high and low concentration of cadmium. New Phytol. 135:353-360.
16. Joner, E.J. and C. Leyval. 2001. Time-course of heavy metal uptake in maize and clover as affected by root density and different mycorrhizal inoculation regimes. Biol. Fert. Soils 33: 351-357.
17. Kormanik, P.P. and A.C. McGraw. 1982. Quantification of vesicular-arbuscular mycorrhizae in plant roots, PP: 37-45. In: Schenck N. C. (Ed.), Methods and Principles of Mycorrhizal Research. American Phytopathological Society, St. Paul.
18. Lindsay, W.L. and W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Sci. Soc. Amer. J. 42:421-428.
19. Marquez, A.P.G.C., R.S. Oliveira, K.A. Samardjieva, J. Pissarra, A.O.S.S. Rangel and P.M.L. Castro. 2007.

- Solanum nigrum grown in contaminated soils. Effects of AMF on zinc accumulation and histolocalisation. Environ. Poll. 145:691-699.
20. Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Plants. 2nd ed., Academic Press., London.
21. Merryweather, J. 2002. Morphological Methods (Part1). In: Laboratory Manual, Techniques in Arbuscular Mycorrhizal Research. Below-Ground Research Team. Department of Biology. The University of York.
22. Oudeh, M., M. Khan and J. Scullion. 2002. Plant accumulation of potentially toxic elements in sewage sludge as affected by soil organic matter level and mycorrhizal fungi. Environ. Poll. 116:293-300.
23. Page, A.L., H.R. Miller and R.D. Keeney, (Eds.), 1982. Methods of soil analysis, Part. II, Chemical and Microbiological Properties. Monograph number 9, 2nd ed., ASA, Madison, WI.
24. Rosen, J. A., C.S. Pike and M. L. Golden. 1977. Zinc, Iron and Chlorophyll metabolism in zinc-toxic corn. Plant. Physiol. 59:1085-1087.
25. Smith, S.E. and D.J. Read. 1997. Mycorrhizal Symbiosis. 2nd ed., Academic Press, London.
26. Sudova, R. and M. Vosatka. 2007. Differences in the effects of three arbuscular mycorrhizal fungal strains on P and Pb accumulation by maize plants. Plant Soil 296:77-83.
27. Wang, F.Y., X.G. Lin and R. Yin. 2007a. Effect of arbuscular mycorrhizal fungal inoculation on heavy metal accumulation of maize grown in a naturally contaminated soil. Intl. J. Phytorem. 9(4):345-353.
28. Wang, F.Y., X.G. Lin and R. Yin. 2007b. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungus *Acaulospora mellea* decrease Cu phytoextraction by maize from Cu-contaminated soil. Pedobiologia 51:99-109.
29. Weissenhorn, I., C. Leyval, G. Belgy and J. Berthelin. 1995. Arbuscular mycorrhizal contribution to heavy metal uptake by maize (*Zea mays* L.) in pot culture with contaminated soil. Mycorrhiza 5:245-252.
30. Wenger, K., S.K. Gupta, G. Furrer, and R. Schulin. 2002. Zinc extraction potential of two common crop plants, *Nicotiana tabacum* and *Zea mays*. Plant Soil 242: 217-225.
31. Yasrebi, J., N. Karimian, M. Maftoun, A. Abtahi and A.M. Sameni. 1994. Distribution of zinc forms in highly calcareous soils as influenced by soil physical and chemical properties and application of zinc sulfate. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 25: 2133-2145
32. Zarei, M., S. König, S. Hempel, M. Khayam Nekouei, Gh. Savaghebi and F. Buscot. 2008. Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi associated to *Veronica rechingeri* at the Anguran zinc and lead mining region. Environ. Poll. 156: 1277-1283.
33. Zhu, Y.G., P. Christie and A.S. Laidlaw. 2001. Uptake of Zn by arbuscular mycorrhizal white clover from Zn-contaminated soil. Chemosphere 42:193-199.