نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۸، شماره ۶، بهمن – اسفند ۱۳۹۳، ص. ۱۲۳۷-۱۲۲۸

Journal of Water and Soil
Vol. 28, No. 6, Jan.-Feb. 2015, p. 1228-1237

کارآیی قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در گیاه پالایی یک خاک آهکی آلوده به روی به وسیله گیاه وتیور

محبوبه بهرامی نیا[۱]- مهدی زارعی[۲*]- عبدالمجید رونقی[۳]- رضا قاسمی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۷/۷

چکیده

به منظور بررسی کارایی قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در گیاه پالایی خاک آهکی آلوده به عنصر روی توسط گیاه وتیور، یک آزمایش در شرایط گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل روی در چهار سطح (۱۰، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) از منبع سولفات روی، قارچ در سه سطح (شاهد بدون قارچ، *گلوموس اینترارادیسز* و *گلوموس ورسیفرم*) بود. با افزایش سطوح روی وزن خشک اندام هوایی و ریشه، کاهش یافت. تلقیح با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار باعث افزایش این پارامترها در مقایسه با تیمار شاهد بدون قارچ شد. با افزایش سطح روی و با کاربرد قارچ‌های میکوریز آربوسکولار جذب روی اندام هوایی و ریشه افزایش یافت. درصد کلنیزاسیون ریشه با کاربرد قارچ افزایش اما با افزایش سطوح روی به طور معنی‌داری کاهش یافت. تلقیح با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار کارایی استخراج، جذب و انتقال گیاهی روی را در مقایسه با تیمار شاهد بدون قارچ افزایش دادند. فاکتور انتقال روی از ریشه به اندام هوایی با افزایش سطوح روی کاهش یافت اما کاربرد قارچ‌های میکوریز آربوسکولار میزان انتقال را در مقایسه با تیمار شاهد بدون قارچ افزایش داد. قارچ *گلوموس اینترارادیسز* در مقایسه با قارچ *گلوموس ورسیفرم* کارایی استخراج و جذب بیشتری ولی کارایی انتقال و فاکتور انتقال از ریشه به اندام هوایی کمتری داشته است.

واژه‌های کلیدی: قارچ میکوریز آربوسکولار، گیاه پالایی، روی، وتیور

مقدمه

آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین یکی از مشکلات عمده زیست محیطی در دنیا محسوب می‌شود، که سلامت انسان و اکوسیستم را به خطر می‌اندازد. در دهه‌های اخیر، استفاده از گیاهان برای حذف آلاینده های فلزی از خاک‌های آلوده، گیاه پالایی، به عنوان یک روش جدید برای بازسازی زمین های آلوده در حال توسعه می‌باشد. این روش نسبت به روش‌های فیزیکی و شیمیایی هزینه‌ی کمتری در برداشته و سازگار با محیط زیست نیز می‌باشد (۱۲ و ۲۹). عنصر روی یکی از عناصر کم مصرف ضروری برای گیاهان محسوب می شود، غلظت های بالای روی می تواند اثرات مضر سمی مشابه اثرات سمی عناصر غیر ضروری مانند کادمیوم و سرب روی رشد گیاه داشته باشد (۲۸)، سمیت روی باعث کاهش رشد گیاه به ویژه از طریق تغییرات شدید در فعالیت میتوز و توسعه سلول می‌شود (۱۷). مکانیسم‌های سمیت روی بسیار متنوع و از طریق فرایندهای مختلف بیوشیمیایی انجام می‌گیرد. در این میان بر همکنش گروهای عاملی پروتئین ها عمدتا با گروهای SH است که منجر به تغییرات در واکنش بسیاری از آنزیم ها، کاهش سرعت فتوسنتز و محتوی کلروفیل (۱۱)، تغییرات در نفوذپذیری غشا (۱۴) و آسیب اکسیداتیو (۵) می‌شود. قارچ‌های میکوریز آربوسکولار متداولترین میکروارگانیسم های خاک هستند که با ۸۰ درصد از خانواده های گیاهی می‌توانند همزیستی متقابل ایجاد کنند و تقریبا در تمامی زیستگاه ها و شرایط آب و هوایی (۳۱) از جمله خاک‌های آلوده به فلزات سنگین وجود دارند (۸ و ۳۶). قارچ‌های میکوریز عناصر غذایی بویژه فسفر را برای گیاه میزبان فراهم می‌کنند همچنین گیاه را در مقابل تنش های زیستی و غیرزیستی محافظت می کنند (۳۱). تحقیقات متعدد نشان داده‌اند که قارچ‌های میکوریز آربوسکولار می‌تواند توانایی گیاه میزبان را برای رشد در خاکهای آلوده به فلزات سنگین افزایش دهند. این اثرات قارچ‌های میکوریز آربوسکولار به دلیل توانایی قارچ‌ها و همچنین

۱، ۲، ۳ و۴- به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، دانشیار، استاد و دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
(*- نویسنده مسئول: Email: Mehdizarei@shirazu.ac.ir)

اثرات مثبت شان بر روی رشد گیاه می باشد. قارچ‌های میکوریز آربوسکولار از لحاظ مورفولوژی و فیزیولوژی منحصر به فرد می‌باشند و از این رو می تواند تحت شرایط تنش موثر باشند. علاوه بر این قارچها می توانند رشد گیاه میزبان خود را با افزایش جذب آب و عناصر غذایی افزایش دهند. قارچهای میکوریز آربوسکولار توانایی افزایش رشد گیاه در خاک‌های آلوده به روی را دارند (۱۹ و ۲۰)، اگر چه پارامترهایی مانند گونه گیاه، بافت گیاه (ریشه یا ساقه) و غلظت روی در خاک، رشد گیاه را به طور متفاوتی تحت تاثیر قرار می دهد (۷).

علف وتیور (*Vetiveria zizanioides*) متعلق به خانواده پواسه، گیاهی چندساله با ارتفاع بیش از دو متر و تراکم بالا می باشد. ریشه‌های عمودی آن تا عمق ۳ متری در خاک نفوذ می کند (۱۸). وتیور یکی از گیاهان مورد استفاده در گیاه پالایی در برخی از کشورهای جهان است که از پتانسیل بسیار بالایی جهت جذب آلودگی‌ها برخوردار بوده و دارای ویژگی‌های مطلوب مورفولوژیک، فیزیولوژیک و اکولوژیک می باشد. تحقیقات اولیه در استفاده از وتیور برای گیاه پالایی فلزات سنگین از خاک‌های آلوده نشان داد که وتیور می‌تواند در محیط خاک حاوی غلظت‌های بالا در طیف وسیعی از فلزات سنگین زنده بماند و می‌تواند این عناصر را در ریشه‌ها و ساقه‌ها تجمع دهد این گیاه مقاومت زیادی به آرسنیک، کادمیوم، مس، جیوه، نیکل، سرب، سلنیوم و روی دارد (۳۴). تچاپینوات و همکاران (۳۲) گزارش کردند که زیست توده گیاه و جذب عناصر غذایی وتیور تلقیح شده با قارچ میکوریز آربوسکولار به مقدار قابل‌توجهی در مقایسه با گیاهان شاهد بدون قارچ بالا بوده است. ونگ و همکاران (۳۵) بیان کردند تلقیح گیاه وتیور با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار (*گلوموس موسه* و *گلوموس اینترارادیسز*) در خاک‌های آلوده به روی به میزان قابل توجهی رشد و جذب فسفر را افزایش داده است. کلنیزاسیون میکوریزی جذب روی توسط گیاه در غلظت کم فلز در خاک (صفر و ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم روی) را افزایش ولی در غلظت بالاتر فلزات سنگین (۱۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم روی) جذب روی را کاهش داد. تلقیح با قارچ میکوریز آربوسکولار، گیاه وتیور را از سمیت بالقوه ناشی از روی محافظت می کند، اما درجه حفاظت با توجه به نوع قارچ و گیاه میزبان متفاوت است. هدف از این تحقیق بررسی اثر قارچهای میکوریز آربوسکولار بر رشد گیاه وتیور و تجمع روی در بخش‌های مختلف گیاه می باشد.

مواد و روش‌ها

برای کشت گیاه نمونه خاک از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری از خاک سری دانشکده با نام علمی Fine, mixed (calcareous), mesic, Typic Calcixerepts تهیه گردید. برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد. بافت خاک به روش هیدرومتر (۱۳)، ماده آلی به روش اکسایش با اسید کرومیک و سپس تیتره کردن با فروآمونیوم سولفات (۲۱)، پ هاش در خمیر اشباع خاک به وسیله الکترود شیشه ای (۳۳) و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع (۲۵)، فسفر قابل استفاده به وسیله بیکربنات سدیم (۲۲) و غلظت روی عصاره گیری شده با دی. تی. پی آ. به وسیله دستگاه جذب اتمی (۱۶) اندازه گیری گردید که در جدول ۱ آمده است. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی با دو فاکتور در سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل موارد زیر بوده است: ۱) قارچ میکوریز آربوسکولار در سه سطح: شاهد (G_0)، گلوموس اینترارادیسز (G_1) و گلوموس ورسیفرم (G_2) ۲) روی در چهار سطح (۱۰، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم در کیلوگرم). جهت کشت گلخانه‌ای، ۵ کیلوگرم خاک هوا خشک غیر استریل و عبور یافته از الک ۴ میلی متری به هر گلدان اضافه گردید. عناصر پرمصرف و کم مصرف بر اساس نتایج آزمون خاک به منظور جلوگیری از کمبود احتمالی به خاک اضافه شدند. متناسب با هر سطح، عنصر روی از نمک سولفات روی ($ZnSO_4.7H_2O$) به هر گلدان اضافه و به طور کامل با خاک هر گلدان مخلوط گردید. مایه تلقیح قارچها که از مناطق غیرآلوده به فلزات سنگین در منطقه انگوران زنجان شناسایی و جداسازی شده‌اند (۱) به روش تله تکثیر گردید. نام جدید قارچ گلوموس اینترارادیسز، ریزوفاگوس اینترارادیسز می باشد (سایت اینترنتی http://schuessler.userweb.mwn.de/amphylo).

برای تلقیح قارچ میکوریز آربسکولار مقدار ۵۰ گرم از مایه تلقیح قارچها شامل اسپور (۱۱ اسپور در هر گرم بستر)، هیف و قطعات کلنیزه شده (۸۵درصد) و کلنیزه نشده ریشه‌ای و بستر در ۵ سانتیمتری خاک گلدان قرار داده شد و با خاک زیر بطور کامل مخلوط گردید. به منظور حفظ جمعیت میکروبی غیر از قارچ میکوریز و یکسان شدن وزن گلدانها، مقدار ۵۰ گرم از بستر گلدان های شاهد تلقیح نشده با قارچ که در مرحله کشت تله نگهداری شده بودند به تیمارهای بدون قارچ در کشت اصلی اضافه گردید.گیاه وتیور از شهرستان نورآباد ممسنی تهیه گردید. در هر گلدان یک نهال وتیور (با اندازه یکسان ۲۵ سانتی متر اندام هوایی و ۵ سانتی متر ریشه) کشت شد. در طول دوره رشد روزانه گلدان ها با آب مقطر در حدود ظرفیت مزرعه با وزن کردن هر گلدان و افزودن آب مقطر آبیاری شدند.

بعد از چهار ماه از کاشت گیاه، بخش هوایی و ریشه به طور جداگانه در هر گلدان برداشت گردید. نمونه هایی از ریشه‌های تازه برای تعیین درصد کلنیزاسیون ریشه تهیه گردید. وزن خشک ریشه ها و اندام هوایی پس از شستشو و خشک شدن در دمای ۶۵ درجه سانتیگراد به مدت ۴۸ ساعت اندازه گیری شد درصد کلنیزاسیون ریشه با روش تقاطع خطوط شبکه (۱۵) تعیین گردید.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

بافت	pH	قابلیت هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	ماده آلی (درصد)	فسفر محلول در بی‌کربنات سدیم (میلی‌گرم در کیلوگرم)	روی قابل‌استخراج با دی. تی. پی. ا (میلی‌گرم درکیلوگرم)
لوم رس شنی	۷/۷	۰/۳۵	۰/۶۷	۱۱	۰/۲۱

غلظت روی در ریشه و اندام هوایی به روش خاکستر خشک با اسیدکلریدریک ۲ نرمال و با دستگاه جذب اتمی مدل (Shimadzu,Japan A-670) و غلظت فسفر اندام هوایی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه گیری گردید. کارایی استخراج[1] ، انتقال[2] و جذب گیاهی[3] و فاکتور انتقال از ریشه به اندام هوایی[4] (۹) با کمک فرمول های زیر محاسبه شد (۴). داده‌ها با نرم‌افزار آماری SAS تجزیه و تحلیل و مقایسه میانگین تیمارها نیز با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت. نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel ترسیم گردید.

$$\frac{\text{مقدار عنصر جذب شده در گیاه}}{\text{وزن خشک ریشه}} = \text{کارایی جذب گیاهی (میکروگرم در گرم)}$$

$$\frac{\text{مقدار عنصر جذب شده در اندام هوایی}}{\text{وزن خشک ریشه}} = \text{کارایی استخراج گیاهی (میکروگرم در گرم)}$$

$$\frac{\text{مقدار عنصر جذب شده در اندام هوایی}}{\text{مقدار عنصر جذب شده در ریشه}} = \text{کارایی انتقال گیاهی}$$

$$\frac{\text{غلظت عنصر در اندام هوایی}}{\text{غلظت عنصر در ریشه}} = \text{فاکتور انتقال از ریشه به اندام هوایی}$$

نتایج و بحث

وزن خشک اندام هوایی و ریشه

اثر تلقیح با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار و سطوح روی بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه معنی‌دار بوده ولی اثر متقابل آنها معنی دار نشده است (جدول ۲). با افزایش سطوح روی وزن خشک اندام هوایی کاهش پیدا کرد که این کاهش در سطح ۶۰۰ میلی‌گرم روی با سطح ۱۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم اختلاف معنی‌داری داشت. تیمارهای شاهد بدون قارچ در تمام سطوح روی کمترین مقدار وزن خشک اندام هوایی را نسبت به تیمارهای تلقیح شده داشته‌اند که این اختلاف تنها در سطح ۶۰۰ میلی گرم روی در کیلوگرم از نظر آماری با دو گونه قارچی معنی‌دار بود. تلقیح با قارچ میکوریز باعث افزایش معنی‌دار وزن خشک ریشه و اندام هوایی شده است. در ارتباط با وزن خشک اندام هوایی، بین گونه‌های قارچی تفاوت معنی‌دار وجود ندارد ولی در مورد وزن خشک ریشه، گونه *گلوموس اینترارادیسز* دارای میانگین وزن خشک بالاتری بوده است. با افزایش سطوح روی وزن خشک ریشه کاهش پیدا کرد که این کاهش فقط بین سطوح ۱۰ با ۳۰۰ یا ۶۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم معنی‌دار بود (جدول ۳). پوترز و همکاران (۲۳) بیان کردند که فلزات سنگین با اختلال در عمل هورمون هایی مانند اکسین، کاهش در رشد گیاه را در پی دارند. اثر مثبت میکوریزی شدن را می‌توان بهبود جذب عناصر ضروری به خصوص عنصر فسفر توسط قارچ‌های میکوریزی نسبت داد (۶). تولید آنزیم‌ها، عوامل کلات کننده و ترشحات اسیدی بوسیله هیف‌های قارچ میکوریز می‌تواند باعث حلالیت فرم های آلی و معدنی عناصر غذایی که کمتر قابل‌دسترس هستند شود در نتیجه باعث افزایش جذب عناصر غذایی در گیاه میزبان و افزایش رشد می گردد (۱۰). ونگ و همکاران (۳۵) بیان کردند وزن خشک اندام هوایی در گیاه وتیور با افزایش غلظت روی کاهش پیدا کرد، وزن خشک اندام هوایی در گیاهان میکوریزی در مقایسه با تیمار غیر میکوریزی در غلظت بالای روی (۱۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم) به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر بود. وو و همکاران (۳۷) بیان کردند وزن خشک اندام هوایی وتیور در گیاهان میکوریزی به طور معنی داری بیشتر از گیاهان غیرمیکوریزی بود. رونگتاناکیات و سانو (۲۶) بیان کردند فلزات سنگین به ویژه در سطوح بالای آلودگی خاک باعث کاهش زیست توده (وزن خشک اندام هوایی و ریشه) گیاه وتیور می‌شوند.

کلنیزاسیون ریشه گیاه

اثر روی، قارچ میکوریز و اثر متقابل آن‌ها بر درصد کلنیزاسیون ریشه معنی‌دار بوده است (جدول۲). در اثر تلقیح گیاه وتیور با قارچ میکوریز درصد کلنیزاسون ریشه در مقایسه با تیمار شاهد بدون قارچ

1- Phytoextraction efficiency
2- Translocation efficiency
3- Uptake efficiency
4- Translocation factor

به طور معنی‌دار افزایش‌یافته ولی گونه‌های قارچ با یکدیگر تفاوت معنی‌دار نداشته‌اند. مقایسه میانگین‌ها نشان داد با افزایش سطوح روی میانگین درصد کلنیزاسیون ریشه به طور معنی‌دار کاهش یافت (جدول۳). بیش ترین درصد کلنیزاسیون ریشه مربوط به سطح ۱۰ میلی گرم روی در کیلوگرم و با کاربرد قارچ *گلوموس اینترارادیسر* و کمترین میزان کلنیزاسیون ریشه مربوط به سطح ۶۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم و تیمار شاهد بدون قارچ بود. درصد کلنیزاسیون ریشه گیاه وتیور مایه زنی شده با قارچ های میکوریز آربوسکولار نسبت به تیمارهای مایه زنی نشده به طور معنی داری افزایش یافته و در گیاهان میکوریزی با افزایش سطح روی درصد کلنیزاسیون ریشه کاهش یافت. درصد کلنیزاسیون ریشه گیاه وتیور تلقیح شده با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار نسبت به تیمارهای تلقیح نشده به طور معنی‌داری افزایش‌یافته و در گیاهان میکوریزی با افزایش سطح روی درصد کلنیزاسیون ریشه کاهش یافت. احتمالاً یکی از علل کاهش درصد کلنیزاسیون ریشه، ایجاد سمیت روی در گیاه می‌باشد. احتمالاً این‌گونه‌های قارچی تحمل آلودگی بالای روی را ندارد و با افزایش سطح روی درصد کلنیزاسیون ریشه آن، کاهش می‌یابد. هر چند در تیمارهای مایه زنی نشده با افزایش سطوح روی، درصد کلنیزاسیون ریشه به میزان کمی کاهش یافت که از نظر آماری این کاهش معنی‌دار نبوده است، احتمالاً قارچ‌های بومی خاک نسبت به سطوح روی مقاوم تر بوده‌اند. این‌گونه‌های قارچ از مناطق غیر آلوده به فلزات سنگین انگوران جداسازی، شناسایی و تکثیر شده اند (۱). ونگ و همکاران (۳۵) بیان کردند کلنیزاسیون گیاه وتیور با قارچ *گلوموس موسه* در سطوح صفر و ۱۰ میلی گرم روی در کیلوگرم در بیش ترین مقدار به ۳۵ درصد رسید و در سطح ۱۰۰۰ میلی گرم روی کاهش و به ۱۷/۶ درصد رسید. هنگامی که گیاه وتیور با قارچ *گلوموس اینترارادیسر* تلقیح شد نیز نتایج مشابه به دست آمد، آلودگی ریشه از ۲۱/۳ تا ۳۳/۸ درصد افزایش یافت اما در سطح ۱۰۰۰ میلی گرم روی در کیلوگرم به ۲۴/۹ درصد کاهش یافت. وو و همکاران (۳۷) گزارش کردند در گیاه وتیور تلقیح شده با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار *گلوموس موسه* و *گلوموس اینترارادیسر* بیش ترین درصد کلنیزاسیون ریشه ۵۵/۳ درصد بود.

فسفرجذب شده در اندام هوایی

اثر سطوح روی و قارچ میکوریز بر جذب فسفر اندام هوایی معنی‌دار بوده ولی اثر متقابل آن‌ها بر جذب فسفر اندام هوایی معنی‌دار نبوده‌است (جدول۲). مقدار فسفر جذب‌شده در اندام هوایی در تیمارهای میکوریزی نسبت به تیمار شاهد بالاتر بوده و در بین گونه های قارچی نیز تفاوت معنی دار وجود دارد به‌طوری که مقدار جذب فسفر در قارچ *گلوموس اینترارادیسر* به طور معنی داری بالاتر از قارچ *گلوموس ورسیفرم* بود. میانگین جذب فسفر در سطح ۶۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم ۴۹/۷۴ درصد در مقایسه با سطح ۱۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم کاهش یافت (جدول۴).

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر فاکتورهای قارچ های میکوریز آربوسکولار و روی و آثار متقابل آنها برشاخص های اندازه گیری شده

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	کلنیزاسیون ریشه	مقدار فسفر اندام هوایی	مقدار روی اندام هوایی	مقدار روی ریشه
روی	۳	۹۹/۲*	۱۶/۶**	۱۳۴۸/۸***	۲۱۲/۸*	۲۲۶۳۴۷۸۰/۹***	۵۹۸۹۶۰۷۶/۷***
قارچ	۲	۲۹۲/۸**	۲۹/۵***	۵۶۸۶/۴***	۸۹۷/۷***	۱۶۱۰۶۶۹۷/۱***	۹۲۲۴۳۱۱/۵***
روی × قارچ	۶	۶۸/۹^{ns}	۵/۵^{ns}	۲۹۵/۶***	۱۰۸/۰^{ns}	۴۱۱۷۷۷۳/۹**	۲۴۵۱۳۶۹/۲*
خطا	۲۴	۳۱/۷	۲/۶	۱۴/۷	۴۹/۰	۱۱۱۴۲۵۸/۵	۸۵۷۲۱۸/۹

ادامه جدول ۲

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		کارایی استخراج	کارایی جذب	کارایی انتقال	فاکتور انتقال
روی	۳	۱۶۰۶۶۲/۲***	۱۰۵۷۶۷۵/۳***	۱/۰***	۰/۳***
قارچ	۲	۳۷۵۹۹/۶***	۶۰۵۳۵/۱**	۰/۰۷*	۰/۰۱*
روی × قارچ	۶	۹۷۴۸/۹**	۱۵۴۵۵/۱^{ns}	۰/۰۷**	۰/۰۲***
خطا	۲۴	۲۳۰۴/۰	۷۳۰۸/۳	۰/۰۱	۰/۰۰۳

***، ** ، * و ns- به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۱ درصد، ۱ درصد، ۵ درصد و غیر معنی‌دار

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر اصلی و اثر متقابل سطوح روی و قارچ میکوریز آربوسکولار بر وزن تر و وزن خشک اندام هوایی و ریشه (گرم در گلدان) و کلنیزاسیون ریشه (درصد) گیاه وتیور، سطوح روی (میلی‌گرم در کیلوگرم)

	تیمار	۱۰	۱۵۰	۳۰۰	۶۰۰	میانگین
وزن خشک اندام هوایی	G_0	۲۴/۷۹abc*	۱۸/۲۷cd	۱۷/۱۳cd	۹/۰۰d	۱۷/۳۰B
	G_1	۳۰/۳۱ab	۳۲/۰۶a	۲۵/۲۳abc	۲۰/۶۰bc	۲۷/۰۵A
	G_2	۲۴/۸۵abc	۱۸/۸۹cd	۲۴/۴۱abc	۲۶/۰۸abc	۲۳/۵۶A
	میانگین	۲۶/۶۵A	۲۳/۰۸AB	۲۲/۲۶AB	۱۸/۵۶B	
وزن خشک ریشه	G_0	۱۴/۷۸ab	۱۳/۰۵bc	۱۱/۲۹cd	۹/۱۹d	۱۲/۰۸C
	G_1	۱۵/۶۳ab	۱۷/۲۰a	۱۵/۰۴b	۱۲/۹۸bc	۱۵/۲۱A
	G_2	۱۴/۷۷ab	۱۳/۲۸bc	۱۳/۳۱cd	۱۳/۹۱bc	۱۳/۸۱B
	میانگین	۱۵/۰۶A	۱۴/۵۱AB	۱۳/۲۱BC	۱۲/۰۲C	
کلنیزاسیون ریشه	G_0	۱۲/۸۶e	۱۲/۹۶e	۱۱/۶۲e	۱۰/۹۶e	۱۲/۱۰B
	G_1	۷۰/۲۷a	۶۱/۵۷b	۴۱/۱۳c	۲۷/۹۲d	۵۰/۲۲A
	G_2	۶۶/۱۱a	۶۰/۶۹b	۳۸/۸۶c	۳۱/۸۳d	۴۹/۳۷A
	میانگین	۴۹/۷۵A	۴۵/۰۸B	۳۰/۵۴C	۲۳/۵۷D	

*- اعدادی که دارای یک حرف مشترک کوچک (در ردیف یا ستون) یا حرف بزرگ (در ردیف یا ستون) هستند از لحاظ آماری با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. G_0: بدون قارچ، G_1: *گلوموس اینترارادیسز*، G_2: *گلوموس ورسیفرم*.

جدول ٤- مقایسه میانگین اثر اصلی و اثر متقابل سطوح روی و قارچ میکوریز آربوسکولار بر جذب کل فسفر اندام هوایی (میلی‌گرم در گلدان) گیاه وتیور سطوح روی (میلی‌گرم در کیلوگرم)

	تیمار	۱۰	۱۵۰	۳۰۰	۶۰۰	میانگین
جذب کل فسفر اندام هوایی	G_0	۳۲/۳۳abcde	۲۲/۰۸def	۱۹/۵۳ef	۹/۸۱f	۲۰/۹۳C
	G_1	۴۰/۴۳ab	۴۴/۸۱a	۳۸/۴۶abc	۲۸/۷۱bcde	۳۸/۱۱A
	G_2	۳۲/۵۳abcde	۲۶/۶۰cde	۳۴/۳۷abcd	۳۱/۷۹abcde	۳۱/۳۲B
	میانگین	۳۵/۱۰A	۳۱/۱۶A	۳۰/۷۹A	۲۳/۴۴B	

*- اعدادی که دارای یک حرف مشترک کوچک (در ردیف یا ستون) یا حرف بزرگ (در ردیف یا ستون) هستند از لحاظ آماری با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. G_0: بدون قارچ، G_1: *گلوموس اینترارادیسز*، G_2: *گلوموس ورسیفرم*.

کاهش در میزان جذب فسفر به دلیل کاهش وزن گیاه با کاربرد سطوح بالای روی است. مایه‌زنی با قارچ *گلوموس اینترارادیسز* و *گلوموس ورسیفرم* میانگین جذب فسفر اندام هوایی را به ترتیب ۸۲/۰۸ و ۴۹/۶۴ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد که می تواند ناشی از تمایل بالای ساختارهای قارچی به مکانیسم‌های جذب فسفر و در راستای کاهش اثرات سمی روی در گیاه باشد. در تنش فلزات سنگین، گیاهان به عناصر غذایی خصوصاً فسفر، نیاز بیشتری دارند تا اثرات سمی فلزات سنگین را کاهش دهند، بنابراین به قارچ های میکوریزی وابستگی بیشتری پیدا می‌کنند (۳۷). وو و همکاران (۳۷) گزارش کردند مقدار فسفر در اندام هوایی وِتیور در تیمارهای میکوریزی به طور معنی‌داری بیشتر از تیمارهای غیر میکوریزی بود.

روی جذب شده در اندام هوایی و ریشه

اثر روی، قارچ میکوریز و اثر متقابل آن ها بر جذب روی اندام هوایی و ریشه معنی‌دار گردید (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها (جدول۵) نشان داد با افزایش سطوح روی، میانگین جذب روی در اندام هوایی افزایش یافت که این افزایش در سطح ۱۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم در مقایسه با سطوح ۱۵۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم روی در کیلوگرم معنی‌دار بود. مقدار روی جذب‌شده در اندام هوایی، به طور معنی‌داری در تیمارهای میکوریزی نسبت به شاهد بالاتر بوده است ولی بین گونه‌های قارچی تفاوت معنی‌دار وجود نداشت. با افزایش سطوح روی میانگین جذب روی به طور معنی داری افزایش یافت. مقدار روی جذب‌شده در ریشه، به طور معنی‌داری در تیمارهای میکوریزی نسبت به شاهد بالاتر بوده است. بین گونه‌های قارچی اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید. وو و همکاران (۳۷) بیان کردند افزودن کمپوست و تلقیح با قارچ میکوریز به طور معنی داری جذب روی اندام هوایی را افزایش داد. رسولی صدقیانی و همکاران (۳) بیان کردند با افزایش سطوح روی جذب کل این عنصر توسط گیاه افزایش یافت. تلقیح میکوریزی نسبت به سایر تیمارهای میکروبی بالاترین مقدار روی را به خود اختصاص داد. زارعی و همکاران (۲) بیان کردند تلقیح گیاه با گونه‌های قارچی در مقایسه با گیاهان تلقیح نشده، نقش موثری در افزایش مقدار روی اندام هوایی و ریشه گیاه ذرت داشته است.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر اصلی و اثر متقابل سطوح روی و قارچ میکوریز آربوسکولار بر جذب کل روی اندام هوایی و ریشه (میکروگرم در گلدان) گیاه وتیور، سطوح روی (میلی‌گرم در کیلوگرم)

	تیمار	۱۰	۱۵۰	۳۰۰	۶۰۰	میانگین
جذب کل روی اندام هوایی	G_0	۱۱۳۴/۸۱c	۲۹۱۸/۷۹bc	۳۳۱۶/۵۱b	۱۸۴۲/۶۰bc	۲۳۰۳/۲B
	G_1	۱۵۰۵/۱۱bc	۵۹۲۵/۴۹a	۵۵۱۴/۴۷a	۵۱۹۶/۴۱a	۴۵۳۵/۴A
	G_2	۱۱۲۸/۸۷c	۳۲۲۰/۶۳b	۵۲۵۲/۱۱a	۶۲۲۸/۳۱a	۳۹۵۷/۵A
	میانگین	۱۲۵۶/۳B	۴۰۲۱/۶A	۴۶۹۴/۴A	۴۴۲۲/۴A	
جذب کل روی ریشه	G_0	۷۴۰/۷۶d	۳۹۵۳/۵۳c	۴۴۲۲/۸۵c	۴۹۳۲/۵۹c	۳۵۱۲/۴B
	G_1	۱۲۱۶/۹۸d	۵۴۵۲/۸۶bc	۶۸۳۸/۸۳ab	۷۴۳۳/۱۶a	۵۲۳۵/۵A
	G_2	۷۵۴/۸۹d	۴۰۳۲/۳۶c	۵۳۹۵/۱۰bc	۸۴۴۱/۰۲a	۴۶۵۵/۸A
	میانگین	۹۰۴/۲D	۴۴۷۹/۶C	۵۵۵۲/۳B	۶۹۳۵/۶A	

*- اعدادی که دارای یک حرف مشترک کوچک (در ردیف یا ستون) یا حرف بزرگ (در ردیف یا ستون) هستند از لحاظ آماری با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. G_0: بدون قارچ، G_1: *گلوموس اینترارادیسز*، G_2: *گلوموس ورسیفرم*.

کارایی استخراج، جذب و انتقال گیاهی روی

اثر روی، قارچ میکوریز و اثر متقابل آن‌ها بر کارایی استخراج و انتقال گیاهی معنی‌دار گردید (جدول۲). اثر روی و قارچ میکوریز بر کارایی جذب گیاهی معنی‌دار گردید ولی اثر متقابل آن‌ها بر کارایی جذب گیاهی معنی دار نشده است. با افزایش سطوح روی میانگین کارایی استخراج گیاهی به طور معنی داری افزایش یافت. کارایی استخراج در اثر تلقیح با قارچ میکوریز به طور معنی داری افزایش یافت. میزان کارایی استخراج گیاهی به ترتیب *گلوموس اینترارادیسز*> *گلوموس ورسیفرم*> شاهد بوده است. میانگین کارایی جذب روی با افزایش سطوح روی به طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول۶). تا سطح ۳۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم کارایی جذب روی در قارچ *گلوموس اینترارادیسز نسبت به بقیه تیمارها* بالاتر بود ولی در سطح ۶۰۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم قارچ *گلوموس ورسیفرم* کارایی جذب روی بالاتری را نشان داده است. با افزایش سطوح روی میانگین کارایی انتقال کاهش یافت که این کاهش از نظر آماری معنی دار بود (جدول۶). در گیاهان میکوریزی کارایی انتقال در مقایسه با شاهد به طور معنی‌داری بالاتر بود. با افزایش سطوح روی غلظت روی در اندام هوایی و مقدار روی جذب شده در اندام هوایی افزایش یافت و در نتیجه کارایی استخراج نیز به طور معنی داری افزایش یافت. کاربرد قارچ های میکوریز کارایی استخراج گیاهی را افزایش داد به طوری که مایه زنی با قارچ *گلوموس اینترارادیسز* و *گلوموس ورسیفرم* به ترتیب کارایی استخراج گیاهی را ۵۱/۴ و ۳۸/۸ درصد در مقایسه با تیمار تلقیح نشده افزایش داد. با افزایش سطح روی از ۱۰ به ۶۰۰ میلی گرم روی در کیلوگرم کارایی جذب گیاهی به میزان ۵/۵۵ برابر افزایش یافت. تلقیح با قارچ *گلوموس اینترارادیسز* و *گلوموس ورسیفرم* میانگین کارایی جذب گیاهی را به ترتیب به میزان ۲۵/۷۸ و ۱۹/۴۹ درصد در مقایسه با تیمار تلقیح نشده افزایش داد. کارایی انتقال گیاهی با افزایش سطح روی به میزان ۱/۲ برابر شاهد کاهش یافت. میانگین کارایی انتقال گیاهی در قارچ *گلوموس اینترارادیسز* و *گلوموس ورسیفرم* به ترتیب به میزان ۱۴/۱۱ و ۱۷/۶۴ درصد افزایش یافت. به طور کلی می‌توان گفت کاربرد قارچ میکوریز آربوسکولار کارایی استخراج، جذب و انتقال گیاهی را افزایش داد هر چند بین گونه‌های قارچی تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. با توجه به نتایج و بر اساس کارایی استخراج، جذب و انتقال گیاهی می‌توان گفت ریشه گیاهان مایه زنی شده با قارچ میکوریز توانایی بالایی در جذب روی از خاک دارند. گیاهان میکوریزی در مقایسه با گیاهان غیر میکوریزی به حجم بیشتری از خاک دسترسی دارند و در نتیجه بر جذب و انتقال عناصر و تحمل‌پذیری گیاه نسبت به فلزات سنگین تأثیر می‌گذارند.

فاکتور انتقال از ریشه به اندام هوایی

اثر روی، قارچ و اثر متقابل آن ها بر فاکتور انتقال از ریشه به اندام هوایی معنی‌دار گردید (جدول۲). بیش‌ترین میزان فاکتور انتقال مربوط به سطح ۱۰ میلی‌گرم روی در کیلوگرم و تیمار شاهد بدون قارچ و کمترین میزان فاکتور انتقال مربوط به سطح ۶۰۰ میلی گرم روی در کیلوگرم و شاهد بدون قارچ بود. با افزایش سطح روی از ۱۰ به ۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم میانگین فاکتور انتقال به طور معنی‌دار کاهش یافت. با افزایش سطح روی از ۱۰ به ۶۰۰ میلی گرم روی در کیلوگرم میانگین فاکتور انتقال از ریشه به اندام هوایی به میزان ۱/۰۵ برابر کاهش یافت. مقایسه میانگین ها نشان داد تلقیح با قارچ *گلوموس ورسیفرم* میانگین فاکتور انتقال را در مقایسه با تیمار شاهد بدون قارچ افزایش داد هر چند این افزایش از نظر آماری معنی‌دار نبود.

جدول ٦- مقایسه میانگین اثر اصلی و اثر متقابل سطوح روی و قارچ میکوریز آربوسکولار بر کارایی استخراج (میکروگرم بر گرم)، جذب (میکروگرم بر گرم) و انتقال گیاهی عنصر روی و فاکتور انتقال از ریشه به اندام هوایی در گیاه وتیور، سطوح روی (میلی‌گرم در کیلوگرم)

	تیمار	۱۰	۱۵۰	۳۰۰	٦۰۰	میانگین
کارایی استخراج	G_0	۷۶/۷۰f*	۲۲۰/۴۹e	۳۱۶/۲۲cd	۲۲۲/۱۸e	۲۰۸/۹۰B
	G_1	۹۵/۹۰f	۳۴۸/۵۰bc	۳۹۹/۸۸abc	۴۲۰/۹۸ab	۳۱۶/۳۲A
	G_2	۷۶/۹۷f	۲۴۲/۴۲de	۳۹۰/۲۶abc	۴۵۰/۰۱a	۲۸۹/۹۲A
	میانگین	۸۳/۱۹C	۲۷۰/۴۷B	۳۶۸/۷۹A	۳۶۴/۳۹A	
کارایی جذب گیاهی	G_0	۱۲۶/۷۲d	۵۲۱/۴۹c	۷۱۰/۰۵b	۷۵۴/۶۸b	۵۲۸/۲۴B
	G_1	۱۷۳/۲۸d	۶۶۶/۳۳bc	۸۲۵/۳۸b	۹۹۲/۸۲a	۶۶۴/۴۵A
	G_2	۱۲۸/۰۲d	۵۴۶/۸۳c	۷۹۲/۷۶b	۱۰۵۷/۳۵a	۶۳۱/۲۴A
	میانگین	۱۴۲/۶۷D	۵۷۸/۲۲C	۷۷۶/۰۷B	۹۳۴/۹۵A	
کارایی انتقال گیاهی	G_0	۱/۵۰a	۰/۷۱d	۰/۷۹d	۰/۴۲e	۰/۸۵B
	G_1	۱/۲۴b	۱/۰۹bc	۰/۸۳d	۰/۷۳d	۰/۹۷A
	G_2	۱/۵۱a	۰/۸۰d	۰/۹۵cd	۰/۷۳d	۱A
	میانگین	۱/۴۲A	۰/۸۷B	۰/۸۶B	۰/۶۳C	
فاکتور انتقال از ریشه به اندام هوایی	G_0	۰/۹۱a	۰/۵۱cd	۰/۵۱cd	۰/۳۸e	۰/۵۸A
	G_1	۰/۶۴b	۰/۵۸bc	۰/۴۹cd	۰/۴۴de	۰/۵۴B
	G_2	۰/۹۰a	۰/۵۵bc	۰/۵۲cd	۰/۳۹e	۰/۵۹A
	میانگین	۰/۸۲A	۰/۵۵B	۰/۵۱B	۰/۴۰C	

*- برای هر خصوصیت اندازه‌گیری شده، اعدادی که دارای یک حرف مشترک کوچک (در ردیف یا ستون) یا حرف بزرگ (در ردیف یا ستون) هستند از لحاظ آماری با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. G_0: بدون قارچ، G_1: *گلوموس اینترارادیسز*، G_2: *گلوموس ورسیفرم*.

چنانچه فاکتور انتقال در گیاه بیش از یک باشد آن گیاه فرا انباشت‌گر می‌باشد ولی اگر فاکتور انتقال کمتر از یک باشد نمی‌توان آن گیاه را به عنوان گیاه فرا انباشت گر در نظر گرفت (۲۴). نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که فاکتور انتقال در تمامی سطوح روی کمتر از ۱ می‌باشد که نشان می‌دهد در تمامی تیمارها میزان غلظت روی در ریشه بیشتر از اندام هوایی وتیور است. محققان متعددی به این نتیجه رسیدند که ریشه وتیور غلظت بالاتری از فلزات سنگین را در مقایسه با اندام هوایی انباشته می‌کند (۲۷، ۳۰ و ۳۸).

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد در تمامی تیمارها میزان فاکتور انتقال از ریشه به اندام هوایی کمتر از ۱ می باشد. بنابراین بر اساس فاکتور انتقال می‌توان گفت گیاه وتیور یک گیاه غیر فرا انباشت‌گر است. قارچ *گلوموس اینترارادیسز* در مقایسه با قارچ *گلوموس ورسیفرم* کارایی استخراج و جذب بیشتری داشته ولی کارایی انتقال و فاکتور انتقال از ریشه به اندام هوایی کمتری داشته پس می توان گفت قارچ *گلوموس اینترارادیسز* در تثبیت روی در ریشه نقش بیشتری دارد. با توجه به اینکه غلظت روی در ریشه گیاه وتیور بیشتر از اندام هوایی می‌باشد و همچنین بر اساس فاکتور انتقال که در تمامی تیمارها کمتر از ۱ می‌باشد روی در ریشه وتیور تجمع می‌یابد و وتیور از طریق فرایند تثبیت گیاهی در گیاه پالایی روی از خاک های آلوده نقش داشته است.

سپاسگزاری

از دانشگاه شیراز به خاطر فراهم نمودن امکانات و ایجاد تسهیلات لازم برای انجام این پژوهش، صمیمانه تشکر و قدردانی می شود.

منابع

۱- زارعی م. ۱۳۸۷. بررسی تنوع قارچ‌های میکوریزی آربوسکولار در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین و کارایی آن‌ها در گیاه پالایی. رساله دکتری خاکشناسی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.

۲- زارعی م.، صالح راستین ن.، و ثواقبی غ. ۱۳۹۰. کارایی قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در گیاه پالایی خاک‌های آلوده به روی با وسیله گیاه

ذرت. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۵۵ : ۱۶۶-۱۵۱.

۳- رسولی صدقیانی م.ح.، قره ملکی ت.، بشارتی ح.، و توسلی ع. ۱۳۹۰. تأثیر باکتری‌های محرک رشد و قارچ میکوریز بر رشد و جذب روی توسط ذرت در یک خاک آلوده به روی. مجله دانش آب و خاک، ۲۱(۲): ۱۴۷-۱۳۶.

4- Audet P., and Charest C. 2007. Dynamics of arbuscular mycorrhizal symbiosis in heavy metal phytoremediation: Meta-analytical and conceptual perspectives. Environmental Pollution, 147: 609-614.
5- Briat J.F., and Lebrun M. 1999. Plant responses to metal toxicity. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Serie III: Sciences de la Vie e Life Sciences 322: 43-54.
6- Chen B., Shen H., Li X., Feng G., and Christie P. 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, 261:219-29.
7- Chen B.D., Li X.L., Tao H.Q., Christie P., and Wong M.H. 2003. The role of arbuscular mycorrhiza in zinc uptake by red clover growing in calcareous soil spiked with various quantities of zinc. Chemosphere, 50: 839-846.
8- Chen B.D., Tang X.Y., Zhu Y.G., Christie P. 2005. Metal concentrations and mycorrhizal status of plants colonizing copper mine tailings, potential for revegetation. Sci. China Ser. C 48: 156–164.
9- Chen B.D., Zhu Y.G., and Smith F.A. 2006. Effects of arbuscularmycorrhizal inoculation on uranium and arsenic accumulation by Chinese brake fern (*Pteris vittata* L.) from a uranium mining-impacted soil. Chemosphere, 62: 1464–1473.
10- Clark R.B., and Zeto S.K. 2000. Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants. Journal of Plant Nutrition, 23: 867–902.
11- Di Cagno R., Guidi L., Stafani A., Soldatini G.F. 1999. Effects of cadmium on growth of *Helianthus annuus* seedlings: physiological aspects. New Phytologist, 144: 65-71.
12- Garbisu C., and Alkorta I. 2001. Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. Bioresource Technol, 77: 229–236.
13- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. A. Klute (ed.), Methods of Soil Analysis. 9(1): 383-411. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2nd Edition, American Society of Agronomy, Madison, WI.
14- Herna´ndez L.E., and Cooke D.T. 1997. Modification of the root plasma membrane lipid composition of cadmium-treated Pisum sativum. Journal of Experimental Botany, 48: 1375-1381.
15- Kormanic P.P., and McGraw A.C. 1982. Quantification of vesicular-arbuscular mycorrhizae in plant roots, In: Schenck NC (Ed). Methods and Principles of Mycorrhizal Research. American Phytopathological Society, St. Paul, pp 37-45.
16- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Science Society of America Journal, 42: 421-428.
17- Liu D., Jiang W., and Gao X. 2003. Effects of cadmium on root growth, cell division and nucleoli in root tip cells of garlic. Biologia Plantarum, 47: 79-83.
18- Massimo M. 2002. Vetiveria, The Genus Vetiveria, Taylors and Francis, 250 pages.
19- Miransari M. 2011a. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and soil bacteria. Appl Microbiol Biotechnol;89:917–30.
20- Miransari M. 2011b. Arbuscular mycorrhizal fungi and nitrogen uptake. Arch Microbiol;193:77–81.
21- Nelson, D.W., and Sommers L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Methods of Soil Analysis. 9: 961-1010. Part 2, 2nd Edition, A.L. Page et al., (Eds). Agronomy. Am. Soc. of Agron., Inc. Madison, WI.
22- Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S., and Dean L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. P: 939. U.S. Dep. of Agric. Circ.
23- Potters G., Pasternak T.P., Guisez Y., Palme K.J., and Jansen M.A.K. 2007. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? Plant Science, 12: 98-105.
24- Raskin I., and Ensley B.D. 2000. Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean up the Environment. John Wiley & Sons, Inc., New York.
25- Rhoades J.D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids, In: Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods, Sparks, D. L. (Ed.). Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. Madison WI.417-435.
26- Roongtanakiat N., and Sanoh S. 2011. Phytoextraction of Zinc, Cadmium and Lead from Contaminated Soil by Vetiver Grass. Kasetsart Journal (Natural Science), 45: 603- 612.
27- Rotkittikhun P., Chaiyarat R., Kruatrachue M., Pokethitiyook P., and Baker A.J.M. 2007. Growth and lead accumulation by the grasses Vetiveria zizanioides and Thysanolaena maxima in lead contaminated soil amended with pig manure and fertilizer: A glasshouse study. Chemosphere, 66: 45–53.
28- Rout G.R., and Das P. 2003. Effect of metal toxicity on plant growth and metabolism: I. Zinc. Agronomie, 23: 3-11.

29- Salt D.E., Smith R.D., and Raskin I. 1998. Phytoremediation. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 49: 643–668.
30- Singh S.K., Juwarkar A.A., Kumar S., Meshram J., and Fan M. 2007. Effect of amendment on phytoextraction of arsenic by *Vetiveria zizanioides* from soil. Internation Journal of Environmental Science and Technology, 4: 339-344.
31- Smith S.E., and Read D.J. 1997. Mycorrhizal Symbiosis. Academic Press, London, pp. 1–605.
32- Techapinyawat S., Suwannarit P., Pakkong P., Sinbuathong N., and Sumthong P. 2000. Selection of effective vesicle-arbuscular mycorrhiza fungi on growth and nutrient uptake of vetiver. In: Abstracts of Poster Papers, Proc The Second International Conference on Vetiver. (ICV-2) (January 18–22), Phetchaburi, Thailand.
33- Thomas G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. In J. M. Bigham (ed). Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods. Soil Science Society of America Book Series No. 5. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI. pp. 475-490.
34- Truong P. 1999. Vetiver Grass Technology for Mine Rehabilitation. Pacific Rim Vetiver Network Technical Bulletin, 2.
35- Wong C.C., Wu S.C., Abdul C.K., Khan G., and Wong M.H. 2007. The Role of Mycorrhizae Associated with Vetiver Grown in Pb-/Zn-Contaminated Soils: Greenhouse Study. Restoration Ecology, 1: 60–67.
36- Wu F.Y., Ye Z.H., Wu S.C., and Wong M.H. 2007. Metal accumulation and arbuscular mycorrhizal status in metallicolous and nonmetallicolous populations of Pteris vittata L. and Sedum alfredii Hance. Planta, 226: 1363–1378.
37- Wu S.C., Wong C.C., Shu W.S., Khan A.G., and Wong M.H. 2010. Mycorrhizo-Remediation of lead/zinc Mine Tailings Using Vetiver: A Field Study, International Journal of Phytoremediation, 13: 1, 61-74.
38- Yang B., Shu W.S., Ye Z.H., Lan C.Y., and Wong M.H. 2003. Growth and metal accumulation in vetiver and two Sesbania species on lead/zinc mine tailings. Chemosphere, 52: 1593–1600.

Journal of Water and Soil
Vol. 28, No. 6, Jan.-Feb. 2015, p. 1228-1237

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۸، شماره ۶، بهمن – اسفند ۱۳۹۳، ص. ۱۲۳۷-۱۲۲۸

Effectiveness of Arbuscular Mycrrhizal Fungi in Phytoremediation of Zinc Contaminated Calcareous Soil by Vetiver Grass

M. Bahraminia[1]. M. Zarei[2]*- A. Ronaghi[3]- R. Ghasemi[4]

Received:26-01-2014
Accepted:29-09-2014

Abstract

A greenhouse experiment was conducted to evaluate the effectiveness of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi in phytoremediation of zinc contaminated calcareous soil by vetiver grass. Experiment was a factorial arranged in a completely randomized design (CRD) with three replications. Two factors consisted of Zn levels (10, 150, 300 and 600 mg kg^{-1} as $ZnSO_4.7H_2O$) and AM fungi (control, *Glomus intraradices*, *Glomus versiforme*). Shoot and root dry weights decreased as Zn levels increased. Mycorrhizal inoculation increased those plant measured parameters compared to those of control. With increasing Zn levels, and mycorrhizal inoculation, Zn uptake of shoot and root increased. Root colonization with mycorrhizal inoculation increased, but decreased as Zn levels increased. Mycorrhizal inoculation increased zinc extraction, uptake and translocation efficiencies. Zinc translocation factor decreased as Zn levels increased, however inoculation with AM fungi increased it. Zinc extraction and uptake efficiencies of *G. intraradices* were more than *G. versiforme*,while zinc translocation efficiency and factor were vice versa.

Keywords: AM fungi, Phytoremediation, Zinc, and Vetiver grass

1,2,3,4- Former MSc Student, Associate Professor, Professor and Associate Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, University of Shiraz, Respectively
(*-Corresponding Author Email: Mehdizarei@shirazu.ac.ir)