نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار
جلد پنجم، شماره سوم، ۱۳۹٤
http://ejsms.gau.ac.ir

تأثیر قارچ میکوریز بر پتانسیل گیاه‌پالایی عنصر مس در گل آهار (*Zinnia elegans*)

مینا ناصری[۱]، *مهدی سرچشمه‌پور[۲] و وحیدرضا صفاری[۳]

[۱]دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، [۲]استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، [۳]دانشیار گروه باغبانی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۲۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۷/۶

چکیده

سابقه و هدف: آلودگی خاک توسط فلزات سنگین از مسایل مهم زیست‌محیطی است که امروزه مورد توجه بیش‌تری قرار گرفته است. عنصر مس یکی از عناصر ضروری کم‌مصرف برای گیاه است که در غلظت زیاد باعث آلودگی خاک و سمیت گیاه می‌شود. این عنصر می‌تواند از طریق فعالیت‌های معدن‌کاری و استفاده از آفت‌کش‌ها در خاک تجمع پیدا کند. امروزه معادن زیادی از مس در ایران و جهان در حال بهره‌برداری هستند. گیاهان زینتی جایگاه ویژه‌ای در زیباسازی فضای سبز شهری و صنعتی دارند و شناسایی گونه‌های بیش‌اندوز آن‌ها برای اصلاح خاک‌های آلوده از ارزش قابل‌توجهی برخوردار است.

مواد و روش‌ها: در این بررسی تأثیر سطوح مختلف مس (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ میلی‌گرم مس در هر کیلوگرم خاک) از منبع سولفات مس در شرایط وجود و عدم وجود قارچ آربسکولار میکوریز بر خصوصیات رشدی گل آهار مورد مطالعه قرار گرفت. جدایه میکوریز مورد استفاده از ریشه گیاهان آهار با درصد بالای کلنیزاسیون جداسازی شد و با ریشه شبدر و سورگوم نیز درصد کلنیزاسیون بیش از ۸۰ درصد ایجاد کرد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل و با قالب طرح کاملاً تصادفی و ۵ تکرار در شرایط گلخانه‌ای اجرا شد. گیاهان پس از یک دوره رویشی ۷۰ روزه برداشت و صفاتی مانند طول ساقه و ریشه، تعداد برگ، سطح برگ، حجم ریشه، وزن تر و خشک ساقه و ریشه، درصد کلنیزاسیون میکوریز و غلظت مس اندام هوایی و ریشه آن‌ها اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: نتایج بررسی‌های صحرایی نشان داد که درصد کلنیزاسیون میکوریزی ریشه‌ها تا ۹۶ درصد می‌رسد و درصد کلنیزاسیون در خاک‌های شنی بیشتر بوده و با افزایش شوری خاک به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. نتایج آزمایش گلخانه‌ای نشان داد که تأثیر قارچ میکوریز بر همه صفات اندازه‌گیری شده در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد و به‌ترتیب موجب افزایش ۹۱، ۸۳، ۹۲ و ۷۱ درصدی وزن خشک ساقه، وزن تر و خشک ریشه و غلظت مس ریشه نسبت به شاهد غیرمیکوریزی گردید. تأثیر سطوح مس بر طول ساقه در سطح ۵ درصد و بر دیگر صفات در سطح یک درصد معنی‌دار شد و سطح ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس به‌ترتیب موجب کاهش ۳۹، ۳۱، ۲۵ و ۹۷ درصدی تعداد برگ، طول ریشه، درصد کلنیزاسیون میکوریزی و سطح برگ نسبت به شاهد گردید. اثرات متقابل مس و قارچ بر طول ساقه و سطح برگ فاقد تأثیر معنی‌دار، بر تعداد برگ در سطح ۵ درصد و بر سایر صفات در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد.

* مسئول مکاتبه: msarcheshmeh@uk.ac.ir

استفاده از مایه تلقیح میکوریز اثرات سوء مس کاربردی را تعدیل نمود و اختلاف قابل‌توجهی را از این نظر در مقدار عددی صفات معنی‌دار ایجاد نمود.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش میزان مس مصرفی باعث افزایش غلظت مس در ریشه و اندام هوایی گیاه شده و غلظت مس در ریشه گیاهان تلقیح‌شده با میکوریز بیش‌تر و در ساقه آن‌ها کم‌تر از گیاهان مربوط به تیمارهای بدون تلقیح بود. اگرچه تلقیح گیاهان با میکوریز باعث تجمع بیش‌تر مس در ریشه و انتقال کم‌تر آن‌ها به اندام هوایی گردید، اما میزان جذب کل مس در ساقه میکوریزی‌ها بیش‌تر بود. بنابراین با توجه به نتایج این پژوهش، می‌توان از این گیاه زینتی برای زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به غلظت‌های بالای مس استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: گیاه‌پالایی، گل آهار، مس، قارچ آربسکولار میکوریز

مقدمه

خاک یکی از منابع مهم و با ارزش طبیعت است که به‌عنوان یک محیط زیست، هزاران آلاینده با ترکیب و غلظت متفاوت را در خود جای داده است. افزایش روزافزون جمعیت، گسترش شهرنشینی و استفاده نامناسب از صنعت و تکنولوژی‌های مدرن موجب افزایش توزیع و انتشار آلاینده‌ها در بیوسفر شده است. فلزات سنگین از سمی‌ترین آلاینده‌های غیرآلی هستند که فعالیت‌های بشری و برخی عوامل طبیعی باعث ورود آن‌ها به محیط زیست می‌شود. تجمع فلزات در زنجیره غذایی، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و موجودات زنده محسوب (۱) و به‌علت پایداری زیاد، درغلظت‌های پایین نیز به‌عنوان عوامل مختل‌کننده اکوسیستم‌ها به‌شمار می‌آیند (۱۹). مس از جمله مهم‌ترین فلزات سنگین است که کاربرد گسترده‌ای در صنایع الکتریکی و آب‌کاری فلزات دارد (۱۷) و به‌عنوان یک عنصر ضروری کم‌مصرف برای گیاهان و یک کوفاکتور برای فرایندهای بیولوژیکی از جمله تنفس و انتقال آهن عمل کرده و نقش مؤثری بر رشد و توسعه مناسب سلول‌های موجودات زنده دارد (۲۱). کودها، قارچ‌کش‌ها، علف‌کش‌ها و لجن‌های فاضلاب مقادیر زیادی مس به خاک اضافه می‌کنند که گاه کاهش حاصلخیزی و افت کیفیت محصولات کشاورزی را به‌دنبال دارد (۳). غلظت‌های بالای مس از طریق تأثیر بر سلول‌های گیاه، موجب کاهش و توقف رشد ریشه و اندام هوایی، کلروز و نکروزه شدن برگ‌ها، ممانعت از فتوسنتز و نیز از بین رفتن بافت‌های سلولی ریشه می‌شود و در نهایت پیری و مرگ گیاه را به‌دنبال دارد (۳۱). کمبود مس نیز با ایجاد تغییرات در فرایندهای متابولیسمی، رشد و نمو گیاهان را به تأخیر می‌اندازد و با تجمع در بدن انسان موجب التهاب معده، افسردگی و بیماری‌های کبد و کلیه می‌گردد (۲۲).

روش‌های سنتی اصلاح مکان‌های آلوده به‌دلیل هزینه زیاد و تغییر در ساختار فیزیکی و شیمیایی خاک، محدودیت‌هایی ایجاد می‌نمایند و از این‌رو استفاده از تکنیک‌های پربازده زیستی برای پاکسازی آلودگی‌ها، یکی از مهم‌ترین مسایل پیش‌رو است. گیاه‌پالایی به‌عنوان یک روش مقرون به‌صرفه و دوستار محیط زیست است که از توانایی گیاهان جهت برطرف کردن آلودگی و زیباسازی فضای سبز شهری استفاده می‌نماید (۶). این فرایند یک روش با ارزش است و در کشورهای در حال توسعه به‌عنوان یک تجارت سودمند محسوب می‌شود (۴۲). کاربرد

اختصاصی گیاهان در انجام پروژه‌های گیاه‌پالایی دارای محدودیت‌هایی است و استفاده از روابط همزیستی بین گیاهان و میکروارگانیسم‌های خاکزی خصوصاً قارچ‌های آربسکولار میکوریز[1]، کارایی این سیستم را چندین برابر می‌نماید (۱۲). این میکروارگانیسم‌ها به‌عنوان ابزاری مفید جهت زیست‌پالایی مکان‌های آلوده محسوب می‌شوند و در مواردی با ترشح آنزیم‌هایی، از برخی آلاینده‌ها به‌عنوان منبع غذا و انرژی استفاده نموده و به حذف تدریجی آن‌ها کمک می‌نمایند. حضور قارچ میکوریز در ریشه گیاهان رشد یافته در مکان‌های آلوده به فلزات سنگین توسط پژوهشگران زیادی گزارش شده (۱۰) و مقاومت بالای سویه‌های قارچی جدا شده از مکان‌های آلوده نسبت به قارچ‌های خاک‌های غیرآلوده به اثبات رسیده است (۹). همچنین نقش مؤثر میکوریز در تثبیت فلزات سنگین در بخش‌های ریشه گیاهان مختلف و نیز میسیلیوم‌های برون ریشه‌ای گزارش شده است (۱۲). این قارچ‌ها با مکانیسم‌هایی اختصاصی از جمله محصور نمودن فلزات در پلی‌فسفات‌ها یا در ترکیبات دیواره سلول، تولید متالوتینوئین‌ها[2] و ترشح گلومالین، به کاهش انتقال مس از ریشه به اندام‌های هوایی گیاه کمک می‌نمایند. اندازه کوچک و سطح ویژه بالای اندام‌های قارچی امکان تماس آن‌ها با آلاینده‌ها را بالا برده و از این طریق نیز به فرایند پاکسازی کمک می‌نمایند (۱۳). کلنیزه شدن ریشه گیاه با برخی قارچ‌های میکوریز می‌تواند جذب و تجمع فلزات سنگین را در اندام‌های هوایی گیاه افزایش دهد و نقش مؤثری در فرآیند استخراج گیاهی[3] داشته باشند (۳۸). فضای سبز و محیط زیست شهری از اساسی‌ترین عوامل پایداری حیات طبیعی و انسان در شهرنشینی نوین به‌شمار می‌آیند. امروزه صنعتی شدن جوامع و افزایش جمعیت موجب گسترش آلودگی به مناطق شهری شده است. تاکنون گیاهان زیادی برای گیاه‌پالایی مورد ارزیابی و استفاده قرار گرفته‌اند و گیاهان زینتی می‌توانند علاوه بر کاربرد در زیست‌پالایی، به‌طور هم‌زمان برای زیباسازی فضای سبز شهری و به‌عنوان شاخصی برای آلاینده‌های اتمسفری و خاکی نیز مورد استفاده قرار گیرند (۱۶). برخی از این گونه‌های گیاهی مانند آمانیا[4] به‌عنوان یک گونه پهن‌برگ زینتی، می‌تواند تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم مس را در هر کیلوگرم واحد وزن خشک ریشه خود تجمع دهند (۳۰). در پژوهشی که توانایی جذب سرب از خاک‌های آلوده به این فلز سنگین توسط دو گیاه زینتی آهار و همیشه بهار مورد مطالعه قرار گرفت، نتایج نشان داد که گل آهار در مقایسه با همیشه بهار، توانایی بالاتری برای تجمع و استخراج سرب در بافت‌های خود دارد و می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای حفاظت خاک‌های آلوده به سرب، مورد استفاده قرار گیرد (۳۷).

پژوهش حاضر با هدف بررسی نقش قارچ میکوریز بر افزایش توان گیاه‌پالایی گل آهار در سطوح مختلف مس و نیز تأثیر سطوح مس بر برخی از خصوصیات ظاهری این گیاه زینتی در شرایط گلخانه انجام شد. آهار یک گل زینتی یک‌ساله از خانواده گل‌ستارگان[5] و با ارتفاع حداقل ۱۵ سانتی‌متر تا حداکثر ۶۰–۴۵ سانتی‌متر است که ارتفاع گونه‌های پا بلند آن به ۹۰–۷۵ سانتی‌متر نیز می‌رسد. این گیاه زینتی به‌دلیل مقاومت به کم‌آبی و املاح خاک و نیز رشد مناسب، دربسیاری از نقاط ایران کشت شده و در فضای سبز شهری کاربرد فراوانی دارد.

1- Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF)
2- Metallothionein
3- Phytoextraction
4- *Ammania baccifer*
5- *Asteraceae*

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری، انتخاب و تکثیر مایه تلقیح اختصاصی: به‌منظور دست‌یابی به قارچ میکوریز فعال و با درصد بالایی از هیف، اسپور و پروپاگول‌های آلوده‌کننده، ابتدا ۲۵ نمونه از ریشه و خاک ریزوسفری گل آهار از فضای سبز شهری کرمان تهیه و سپس pH و EC آن‌ها در عصاره گل اشباع و بافت خاک نمونه‌ها به روش هیدرومتری تعیین گردید. جهت انتخاب جدایه برتر و تهیه مایه تلقیح اختصاصی، تعداد ۵ نمونه با بالاترین درصد کلنیزاسیون انتخاب و هم‌زمان با استفاده از گیاهان شبدر، سورگوم و آهار کشت و تکثیر گردیدند. شبدر و سورگوم از گیاهانی هستند که به‌طور عمومی درصد کلنیزاسیون بالایی با قارچ‌های میکوریز دارند و از آن‌ها برای تهیه و تکثیر مایه تلقیح استفاده می‌شود. ابتدا بذرها به‌مدت یک دقیقه در اتانول ۷۰ درصد قرار گرفتند (۳۹) و پس از جوانه‌زنی ابتدایی، در گلدان‌های ۲/۵ کیلویی حاوی خاک و ماسه استریل کشت شدند. در پایان دوره رویشی دو ماهه، درصد همزیستی ریشه‌های هر سه گیاه تعیین و در نهایت جدایه‌ای با بالاترین درصد همزیستی به‌عنوان جدایه برتر انتخاب گردید. آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب یک طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور قارچ میکوریز (شامل دو سطح M_1= وجود و M_0= عدم وجود قارچ) و شش سطح مس (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ میلی‌گرم مس در هر کیلوگرم خاک) بود که با ۵ تکرار و تعداد کلی ۶۰ گلدان در شرایط گلخانه به اجرا درآمد.

تهیه نشاء و اعمال تیمارها: ابتدا بذرهای گل آهار به‌مدت یک دقیقه با الکل ۷۰ درصد ضدعفونی شدند و پس از شستشو با آب مقطر، در لیوان‌های حاوی کوکوپیت و ماسه استریل (با نسبت ۳ به ۱) کشت گردیدند. بعد از گذشت دوره رویشی یک‌ماهه و ۴ برگی شدن، نشاءها به گلدان‌های اصلی منتقل شدند. به‌منظور تهیه بستر کشت اصلی، مقدار ۲/۵ کیلوگرم از خاک سطحی مزرعه که از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری جمع‌آوری شده بود، پس از استریل به‌ازای هر گلدان توزین و داخل نایلون‌های پلاستیکی ریخته شد و با آب مقطر تا حد ظرفیت زراعی آبیاری گردید. خاک مورد استفاده دارای بافت لوم شنی، pH برابر ۷/۸ و EC آن ۱/۹ دسی‌زیمنس بر متر بود. سطوح مس با استفاده از منبع سولفات مس[1] و پس از توزین و تهیه محلول مادر، با پیپت به خاک درون کیسه‌های پلاستیکی اضافه گردید. جهت رسیدن به شرایط طبیعی، درب نایلون‌ها بسته شد و از آنجایی‌که مس خیلی سریع با خاک وارد تعادل می‌شود، گلدان‌ها به‌مدت یک‌ماه در شرایط گلخانه نگه‌داری شدند. رطوبت گلدان‌ها در طول این مدت در حد ظرفیت مزرعه ثابت نگه داشته شد و قبل از انتقال نشاءها، خاک هر تیمار به‌خوبی مخلوط و به نیمی از گلدان‌ها مقدار ۱۰۰ گرم از مایه تلقیح برتر که درصد کلنیزاسیون آن به ۷۲ درصد رسیده بود به‌صورت لایه لایه و در سایر گلدان‌ها همین مقدار ماسه استریل اضافه گردید. در پایان دوره آلوده‌سازی، تعداد ۵ نشاء به درون هر گلدان انتقال یافت و بعد از گذشت ۳ هفته و اطمینان از استقرار گیاهچه‌ها، تعداد بوته‌ها به سه عدد در هر گلدان کاهش یافت. به‌منظور ایجاد شرایط یکسان برای رشد، گلدان‌ها هر هفته یک‌بار جابه‌جا می‌شدند و آبیاری گلدان‌ها به‌گونه‌ای بود که هیچ زه‌آبی از انتهای آن‌ها خارج نمی‌شد.

اندازه‌گیری صفات: بوته‌ها پس از یک دوره رشد ۷۰ روزه برداشت و طول ساقه و ریشه آن‌ها بعد از شستشوی کامل، با خط‌کش میلی‌متری اندازه‌گیری و بر حسب سانتی‌متر گزارش گردید. یک نمونه یک گرمی از ریشه‌ها به‌طور مرکب جهت تعیین درصد کلنیزاسیون میکوریزی تهیه شد و بقیه جهت تعیین

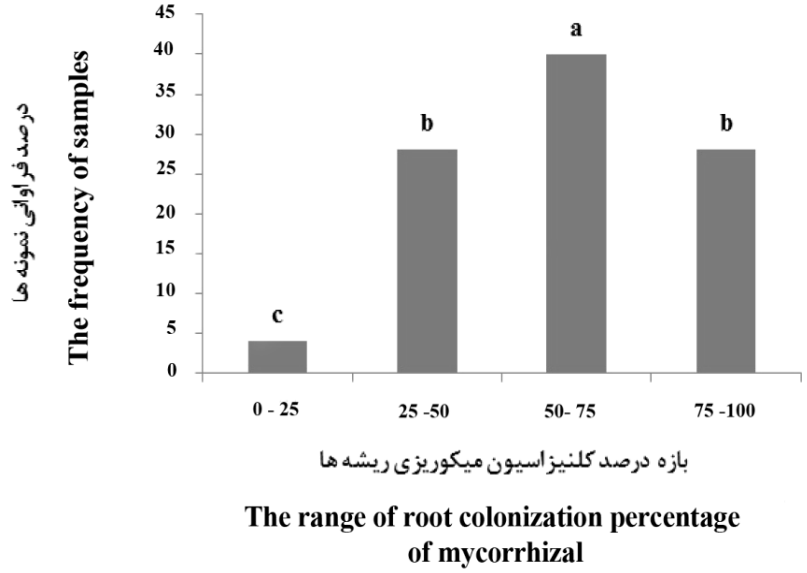
1- $CuSO_4.5H_2O$

وزن تر مورد استفاده قرار گرفتند. نمونه‌های ریشه و ساقه به‌طور جداگانه در پاکت‌های کاغذی به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۸ درجه آون قرار گرفتند و سپس وزن خشک آن‌ها با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم محاسبه شد. حجم ریشه در استوانه مدرج و از روی اختلاف حجم اولیه و ثانویه آب اندازه‌گیری و بر حسب سانتی‌مترمکعب گزارش گردید. سطح برگ نیز برای هر تیمار به‌طور جداگانه با استفاده از کاغذ میلی‌متری محاسبه و بر حسب سانتی‌مترمربع بیان شد. به‌منظور تعیین درصد کلنیزاسیون، مقدار یک گرم از ریشه‌های موئین بعد از شستشو با آب مقطر به لوله آزمایش حاوی هیدروکسید پتاسیم ۱۰ درصد منتقل و ابتدا به‌مدت ۳ روز در درجه حرارت اتاق نگهداری و سپس جهت تسریع در عمل رنگ‌بری، به‌مدت یک‌ساعت در حمام آب گرم قرار گرفتند. به‌منظور رنگ‌آمیزی براساس روش تغییریافته فیلیپس و هیمن (۱۹۷۰)، ریشه‌های رنگ‌بری شده به‌مدت یک‌ساعت در محلول تریفان بلو ۰/۰۱ درصد قرار گرفتند (۳۴) و سپس طبق روش گیوانتی و موس (۱۹۸۰)، ریشه‌های رنگ‌آمیزی شده به قطعات یک سانتی‌متری تقسیم و در سطح یک پتری‌دیش مشبک پخش گردیدند و با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفتند (۱۱). درصد کلنیزاسیون ریشه‌ها براساس مشاهده اندامک‌های قارچ و از تقسیم تعداد نقاط آلوده به قارچ به کل نقاط مطالعه شده، محاسبه و بر حسب درصد گزارش گردید.

اندازه‌گیری مس: اندازه‌گیری مس در گیاه به روش خاکستر خشک و قرائت با دستگاه جذب اتمی مدل AAS Vario 6 انجام گرفت. به‌منظور اندازه‌گیری مس مقدار ۱ گرم ساقه و از ریشه‌ها مقدار ۰/۵ گرم توزین و در کوره با درجه حرارت ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۵ ساعت قرار گرفتند، سپس مقدار ۱۰ میلی‌لیتر اسیدکلریدریک ۲ نرمال به هر نمونه اضافه شد و بعد از حرارت دادن در دمای ۸۰ درجه هیتر و تهیه عصاره، مس نمونه‌ها با دستگاه اندازه‌گیری شد. همچنین مقدار جذب ساقه و ریشه از حاصلضرب غلظت در ماده خشک محاسبه شد و فاکتور انتقال فلز مس از نسبت غلظت فلز در اندام هوایی گیاه به غلظت آن در ریشه برای هر سه گیاه تعیین و در نهایت میکوریز با بالاترین درصد همزیستی بر روی ریشه‌های هر سه گیاه، به‌عنوان مایه تلقیح برتر انتخاب گردید. محتویات داخل گلدان که شامل بستر کشت، هیف‌ها، اسپور و ریشه‌های میکوریزی بودند تا زمان کاشت اصلی در یخچال نگهداری شدند. قارچ میکوریز مورد استفاده برای کشت اصلی دارای کلنیزاسیون ۷۲ درصد با گیاه سورگوم بود. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS Ver9، مقایسه میانگین تیمارها به کمک آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با نرم افزار MSTAT-C و رسم نمودارها با استفاده از برنامه Excel انجام شد.

نتایج و بحث

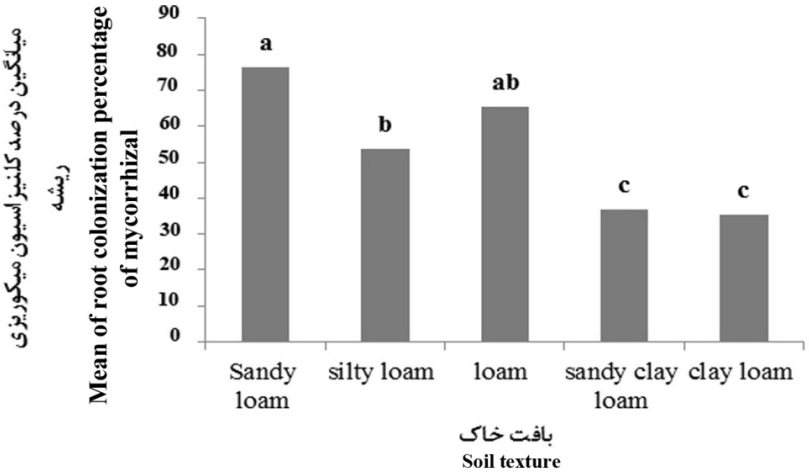
بررسی‌های آزمایشگاهی ۲۵ نمونه ریشه گل آهار نشان داد که این گیاه کاملاً میکوریزی است و درصد همزیستی نمونه‌های جمع‌آوری شده از حداقل ۲۵ تا حداکثر ۹۶ درصد متغیر بود. بیش‌ترین درصد فراوانی نمونه‌ها در بازه ۷۵-۵۰ درصد بود و ۴۰ درصد نمونه‌ها در این محدوده قرار داشتند (شکل ۱).



شکل ۱- نمودار فراوانی درصد کلنیزاسیون نمونه‌ها در بازه‌های مختلف.

Figure 1. The frequency of mycorrhizal colonization percentage of samples in different ranges.

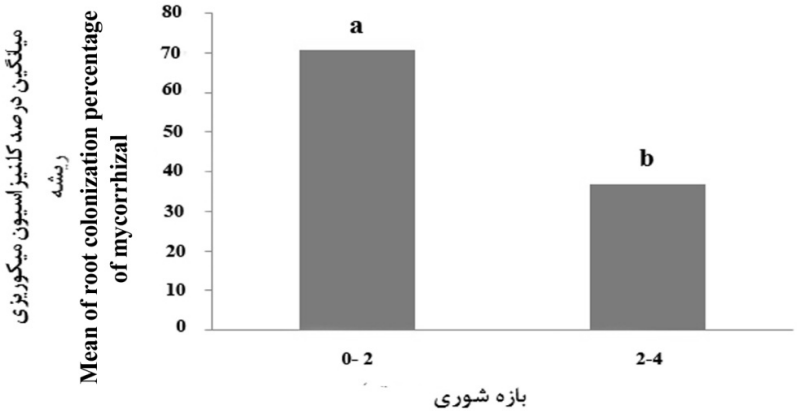
نتایج همبستگی برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک با درصد کلنیزاسیون میکوریزی ریشه‌ها نشان داد که بین درصد رس و شن خاک با درصد کلنیزاسیون به‌ترتیب همبستگی معنی‌دار ۰/۴۶- و ۰/۴۹+ وجود داشت. نتایج نشان داد که با افزایش درصد رس و کاهش مقدار شن خاک، درصد کلنیزاسیون ریشه‌ها کاهش می‌یابد که این یافته‌ها با نتایج اصغرزاده و همکاران (۲۰۰۱) نیز مطابقت دارد (۵). مطابق شکل ۲، خاک‌های سبک بافت نسبت به خاک‌های رسی سنگین بافت، درصد بالاتری از همزیستی میکوریزی را نشان دادند و مقادیر بالای رس بر درصد همزیستی اثر منفی داشت.



شکل ۲- نمودار میانگین درصد کلنیزاسیون میکوریزی ریشه‌ها با توجه به بافت خاک.

Figure 2. Average of mycorrhizal colonization percentage according to soil texture.

همچنین بین شوری خاک با درصد کلنیزاسیون، همبستگی منفی معنی‌دار ۰/۸۶- وجود داشت. نتایج نشان داد که با افزایش شوری تا ۴ دسی‌زیمنس بر متر، میانگین درصد کلنیزاسیون ریشه‌ها نسبت به بازه ۲-۰ دسی‌زیمنس بر متر به‌میزان ۴۷/۶ درصد کاهش می‌یابد (شکل ۳). اثر شوری خاک بر درصد همزیستی ریشه‌ها از جمله موارد بحث‌انگیز است که باید مورد بررسی بیش‌تری قرار گیرد. اثر افزایشی شوری بر درصد کلنیزاسیون (۲۸)، بی‌تأثیری (۱۴) و تأثیر منفی آن (۱۸) در پژوهش‌های متفاوت گزارش گردیده و نتایج این پژوهش با نتایج حاصل از بررسی‌های اخیر پژوهشگران همخوانی دارد.



شکل ۳- نمودار میانگین درصد کلنیزاسیون در بازه‌های شوری مختلف.

Figure 3. Average of mycorrhizal colonization percentage in different salinity ranges.

شاخص‌های اندام هوایی

وزن تر و خشک اندام هوایی: تأثیر سطوح مس و قارچ میکوریز و نیز اثرات متقابل آن‌ها بر وزن تر و خشک اندام هوایی گیاه آهار در این پژوهش در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱).

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس تأثیر سطوح مس و میکوریز بر خصوصیات اندام هوایی گل آهار.

Table 1. The results of variance analysis for shoot characteristics of Zinnia under effect of Cu levels and mycorrhizal.

منابع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Average of squares				
		وزن تر ساقه Stem wet weight (gr/pot)	وزن خشک ساقه Stem dry weight (gr/pot)	طول ساقه Length of stem	تعداد برگ Number of leaf	سطح برگ Leaf surface
سطوح مس (Cu levels)	5	20.9**	0.4**	30.9*	26.3**	36.7**
قارچ میکوریز (mycorrhizal fungi)	1	1479**	55**	648**	756**	442**
مس × قارچ (Cupper * fungi)	5	18.6**	0.3**	5.6^{ns}	6.2*	5.2^{ns}

^{ns}، * و ** به‌ترتیب نمایانگر غیرمعنی‌دار بودن و تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

^{ns}, * and ** Respectively, representing a non-significant and significant differences in level 5 and 1%.

بیش‌ترین وزن تر اندام هوایی مربوط به تیمار $Cu_{400}M_1$ و به مقدار ۱۴/۶۴ گرم بود که نسبت به شاهد غیرمیکوریزی ۹۰ درصد افزایش نشان داد. همچنین کم‌ترین مقدار این صفت در تیمار $Cu_{800}M_0$ و به مقدار عددی ۰/۷۴ گرم مشاهده شد که نسبت به شاهد غیرمیکوریزی ۴۸ درصد کاهش داشت (جدول ۲). بیش‌ترین وزن خشک اندام هوایی مربوط به تیمار $Cu_{200}M_1$ و به مقدار عددی ۲/۵ گرم بود که نسبت به شاهد غیرمیکوریزی ۹۳ درصد افزایش نشان داد و همچنین کم‌ترین مقدار این صفت در تیمار $Cu_{800}M_0$ و به مقدار عددی ۰/۱۵ گرم مشاهده شد که نسبت به شاهد غیرمیکوریزی اختلاف معنی‌دار نداشت (جدول ۲).

اثر کاهنده مس بر پارامترهای رشدی گیاه در پیچک[1] (۲۹)، شاهی[2] (۳۵) و صنوبر[3] (۸) نیز گزارش شده است و علت کاهش وزن خشک شاخساره، ایجاد اختلال در جذب عناصر غذایی، رژیم آبی گیاه، تنفس سلولی و فتوسنتز در شرایط سمیت مس بیان گردید. مس با جلوگیری از تقسیم سلولی و آسیب به دیواره سلول، دسترسی و فراهمی عناصر غذایی برای ریشه را کاهش داده و به‌دنبال آن وزن خشک ریشه کاهش می‌یابد (۳۳). همچنین مشخص شده که قارچ از طریق افزایش جذب عناصر غذایی به‌ویژه فسفر و تولید هورمون‌های محرک رشد گیاه و با تأثیر بر ترشحات ریشه، موجب افزایش وزن تر و خشک ساقه می‌گردد (۹).

طول ساقه: اثرات اصلی سطوح مس و قارچ میکوریز بر طول ساقه به‌ترتیب در سطح ۵ و ۱ درصد معنی‌دار شد اما اثرات متقابل آن‌ها معنی‌دار نبود (جدول ۱). مطابق شکل ۴، بیش‌ترین مقدار طول ساقه مربوط به غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس و برابر با ۱۶/۴۳ سانتی‌متر بود که با شاهد اختلاف معنی‌دار نداشت. کم‌ترین مقدار این صفت در غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس و به مقدار عددی ۱۱/۵۸ سانتی‌متر بود که موجب کاهش ۲۹/۵ درصدی طول ساقه نسبت به سطح ۲۰۰ پی‌پی‌ام مس گردید. همچنین غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس موجب کاهش ۲۰ درصدی طول ساقه نسبت به شاهد شد و بین سطوح ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس با شاهد از نظر آماری اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۴). گیاهان تلقیح‌شده با میکوریز از نظر طول ساقه، اختلاف معنی‌داری با گیاهان بدون تلقیح داشتند به‌طوری‌که قارچ موجب افزایش ۳۸ درصدی طول ساقه نسبت به شاهد غیرمیکوریزی شد (شکل ۵). دلیل این امر تأثیر مفید میکوریز بر جذب آب و عناصر مورد نیاز گیاه از طریق تولید هیف و توسعه ریشه و نیز افزایش میزان نیتروژن تثبیت‌شده در خاک به‌منظور استفاده گیاه می‌باشد که سبب افزایش ارتفاع گیاه شده است (۹).

شنگویل و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند که با افزایش غلظت مس در محیط رشد، ارتفاع گیاه روز گل[4] ابتدا به‌تدریج افزایش می‌یابد ولی اثر بازدارندگی مس بر ارتفاع گیاه، در غلظت‌های بسیار بالا کاملاً مشهود و معنی‌دار بود (۳۶). پرالتا و همکاران (۲۰۰۱)، آسیب‌های ریشه‌ای ناشی از

1- *Glechoma hederacea*
2- *Lepidium sativum* L.
3- *Hordeum vulgare* L.
4- *Commelina Communis*

فلزات سنگین و کاهش میزان کلروفیل و اختلال در فتوسیستم I را علت اصلی کاهش رشد اندام هوایی بیان کردند. به‌طورکلی غلظت‌های بالای فلزات سنگین با ایجاد تغییرات مورفولوژی در ریشه و نیز تغییر ساختار ریشه موجب اختلال در جذب عناصر غذایی شده و رشد اندام هوایی کاهش می‌یابد (۳۳).

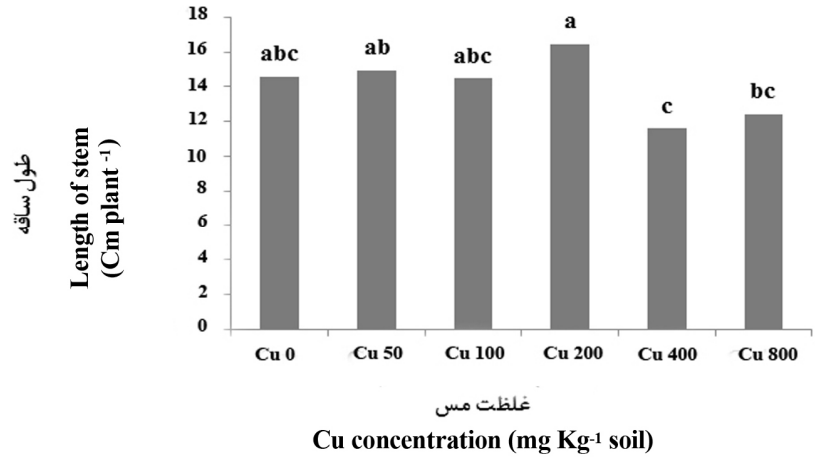
جدول ۲- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل سطوح مس و میکوریز بر وزن تر و خشک اندام هوایی.

Table 2. The comparison of mean levels of Cu and mycorrhizal interaction on shoot fresh and dry weight.

قارچ میکوریز Mycorrhizal fungi						
وزن خشک اندام هوایی ($gr\ pot^{-1}$) Shoot dry weight			وزن تر اندام هوایی ($gr\ pot^{-1}$) Shoot fresh weight			سطوح مس levels of Cu
میانگین Mean	M_1	M_0	میانگین Mean	M_1	M_0	
0.93^{C}	1.70^{d}	0.16^{e}	4.87^{C}	8.30^{d}	1.43^{ef}	Cu_0
1.15^{B}	2.10^{c}	0.20^{e}	6.01^{B}	10.35^{c}	1.66^{e}	Cu_{50}
1.22^{B}	2.27^{b}	0.16^{e}	6.36^{B}	11.28^{b}	1.44^{ef}	Cu_{100}
1.34^{A}	2.47^{a}	0.21^{e}	7.88^{A}	14.49^{a}	1.28^{f}	Cu_{200}
1.31^{AB}	2.44^{a}	0.19^{e}	8.03^{A}	14.64^{a}	1.42^{ef}	Cu_{400}
0.91^{C}	1.66^{d}	0.15^{e}	4.62^{C}	8.50^{d}	0.72^{g}	Cu_{800}
	2.11^{A}	0.18^{e}		11.26^{A}	1.33^{B}	میانگین

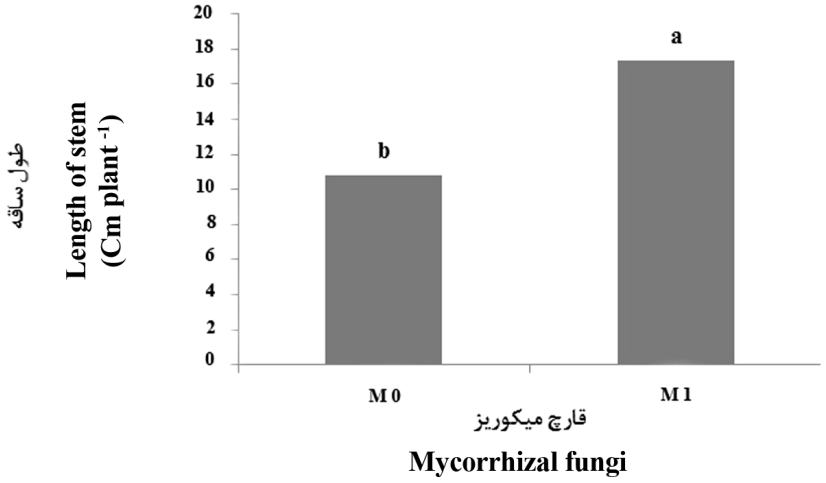
در هر تیمار اندازه‌گیری شده اعداد با حروف انگلیسی مشابه فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشند.

The same letter within each treatment shows no significant differences among treatments at the 5% level (Duncan test).



شکل ٤- نمودار تأثیر سطوح مس بر طول ساقه.

Figure 4. Effect of Cu levels on stem height.



شکل ۵- نمودار تأثیر قارچ میکوریز بر طول ساقه.

Figure 5. Effect of mycorrhizal fungi on stem height.

تعداد برگ: اثرات اصلی سطوح مس و قارچ بر تعداد برگ گیاه در سطح ۱ درصد و اثر متقابل آن‌ها بر این صفت در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). بیش‌ترین تعداد برگ در تیمار شاهد میکوریزی Cu_0M_1 با متوسط ۱۶برگ مشاهده شد که نسبت به شاهد بدون میکوریز ۴۳ درصد افزایش داشت و کم‌ترین آن در تیمار $Cu_{800}M_0$ با متوسط ۵ برگ مشاهده شد که نسبت به شاهد غیرمیکوریزی ۴۴ درصد کاهش نشان داد (جدول ۳). با توجه به این نتایج، کاربرد سطوح بالای مس بدون استفاده از میکوریز، تعداد برگ را بیش از ۳ برابر نسبت به شاهد میکوریزی کاهش داده است. در پژوهشی که توسط ژنگ و همکاران (۲۰۰۴) بر خصوصیات رز مینیاتوری[1] و گل داوودی[2] در شرایط سمیت مس انجام شد، تعداد و سطح برگ در تیمار ۰/۳۲ میلی‌گرم بر لیتر مس نسبت به شاهد به‌ترتیب ۲۶/۵ و ۷۴/۰ درصد کاهش نشان داد (۴۳).

سطح برگ: تأثیر سطوح مس و قارچ بر شاخص سطح برگ در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد، اما اثر متقابل آن‌ها بر این صفت معنی‌دار نشد (جدول ۱). بیش‌ترین سطح برگ مربوط به سطح ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس و به مقدار عددی ۱۳/۶۳ سانتی‌متر مربع بود که با شاهد اختلاف معنی‌دار نداشت و کم‌ترین آن در سطح ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس و برابر با ۸/۴ سانتی‌مترمربع بود که نسبت به سطح ۲۰۰ پی‌پی‌ام مس و شاهد به‌ترتیب ۳۸ و ۲۹ درصد کاهش نشان داد. همچنین بین سطوح ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس با شاهد اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد (شکل ۶). مطابق شکل ۷، مایه‌زنی گیاه با قارچ میکوریز موجب افزایش ۳۷ درصدی شاخص سطح برگ نسبت به گیاهان شاهد بدون تلقیح شد. کاهش سطح برگ در اثر افزایش غلظت مس در پژوهش لاناراس و همکاران (۱۹۹۳) نیز گزارش گردید. آن‌ها بیان نمودند که سطح برگ گیاه گندم در تیمار ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر مس نسبت به شاهد به‌میزان ۶ برابر کاهش داشت و علت آن را کاهش اندازه سلول‌ها بیان کردند (۲۳).

1- *Rosa chinensis*
2- *Chrysanthemum coronarium*

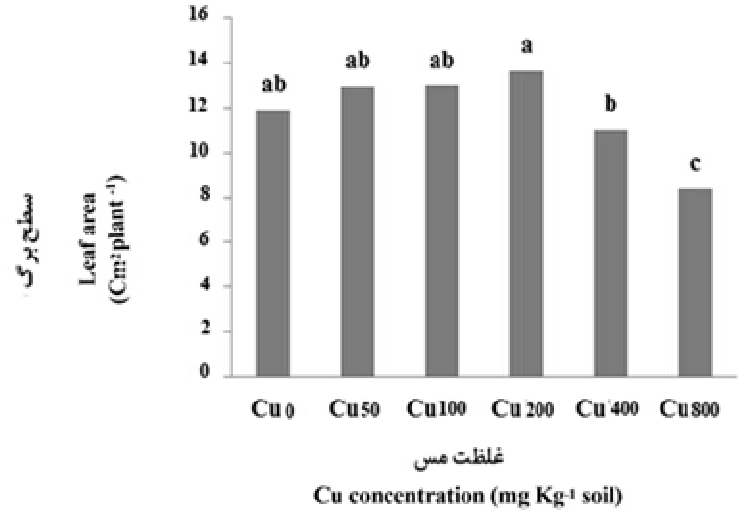
جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل مس و میکوریز بر تعداد برگ به‌ازای هر گلدان.

Table 3. The comparison of mean levels of Cu and mycorrhizal interaction on leaf number per pot.

میانگین mean	Cu_{800}	Cu_{400}	Cu_{200}	Cu_{100}	Cu_{50}	Cu_0	میکوریز mycorrhizal
	سطوح مس (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) levels of Cu (mg kg $soil^{-1}$)						
6.5^{B}	5.4^{i}	5.4^{i}	5.4^{i}	6.4^{h}	7.4^{g}	9^{f}	M_0
13.6^{A}	10^{e}	14^{bc}	13.6^{cd}	14.4^{b}	13.2^{d}	16.4^{a}	M_1
	7.7^{c}	9.7^{b}	9.5^{B}	10.4^{B}	10.3^{B}	12.7^{A}	میانگین mean

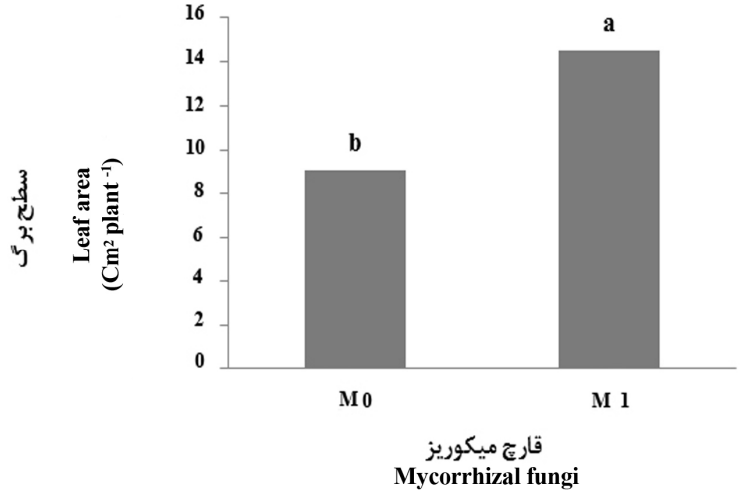
اعداد با حروف انگلیسی مشابه فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشند.

The same letter shows no significant differences at the 5% level (Duncan test).



شکل ٦- نمودار تأثیر سطوح مس بر سطح برگ.

Figure 6. Effect of Cu levels on leaf area.



شکل ۷- نمودار تأثیر قارچ میکوریز بر سطح برگ.

Figure 7. Effect of mycorrhizal fungi on leaf area.

شاخص‌های ریشه

وزن تر و خشک ریشه: اثرات اصلی سطوح مس و قارچ میکوریز و نیز اثر متقابل آن‌ها بر وزن تر و خشک ریشه در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۴).

جدول ٤- نتایج تجزیه واریانس تأثیر سطوح مس و میکوریز بر خصوصیات ریشه گل آهار.

Table 4. The results of variance analysis for root characteristics of Zinnia under effect of Cu levels and mycorrhizae.

منابع تغییرات Source of the variance	درجه آزادی Degrees of freedom	میانگین مربعات mean of squares				
		وزن تر ریشه Root fresh weights	وزن خشک ریشه Root dry weights	حجم ریشه Root volume	طول ریشه Root length	درصد کلنیزاسیون Colonization percentage
سطوح مس Cu levels	5	2.89**	0.02**	0.88**	49.50**	74.80**
قارچ میکوریز Mycorrhizal fungi	1	54**	1.19**	16.03**	6768**	58887**
مس × قارچ Cu * fungi	5	3.45**	0.02**	0.69**	38.30**	74**

** معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۱ درصد است.

significant at the1% level.

بیش‌ترین وزن تر ریشه مربوط به تیمار $Cu_{400}M_1$ و به مقدار عددی ۴ گرم بود که نسبت به شاهد غیرمیکوریزی ۸۸ درصد افزایش نشان داد و کم‌ترین آن مربوط به تیمار $Cu_{400}M_0$ و برابر با ۰/۲۲ گرم بود که نسبت به شاهد غیرمیکوریزی ۵۳ درصد کاهش داشت (جدول ۵). بیش‌ترین وزن خشک ریشه در تیمار $Cu_{400}M_1$ و به مقدار عددی ۰/۴۵ گرم مشاهده شد که نسبت به شاهد غیرمیکوریزی ۹۱ درصد افزایش نشان داد و کم‌ترین آن در تیمار $Cu_{800}M_0$ و به مقدار ۰/۰۱ گرم مشاهده شد که نسبت به شاهد غیرمیکوریزی ۷۵ درصد کاهش نشان داد (جدول ۵). لوو و همکاران (۲۰۰۴)، بیان نمودند که وزن تر و خشک ریشه گیاه *Eltsholtzia splendens* در غلظت‌های بالاتر از ۳۰۰ میکرومولار مس نسبت به شاهد کاهش یافت، اما وزن خشک ساقه تحت‌تأثیر سطوح مس قرار نگرفت (۲۵). کاهش وزن خشک ریشه و ساقه در گیاهان به‌دلیل تأثیر سوء و سمیت مس در غلظت‌های بالا گزارش شد، زیرا گیاهان بیش‌تر انرژی خود را صرف بقا در این محیط می‌نمایند و انرژی کم‌تری صرف رشد کلی گیاه می‌شود.

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل مس و میکوریز بر وزن تر و خشک ریشه.

Table 5. The comparison of mean levels of Cu and mycorrhizal interaction on root fresh and dry weight.

سطوح مس Cu levels	وزن تر ریشه ($gr\ pot^{-1}$) Root fresh weight			وزن خشک ریشه ($gr\ pot^{-1}$) Root dry weight		
	قارچ میکوریز Mycorrhizal fungi					
	M_0	M_1	میانگین mean	M_0	M_1	میانگین mean
Cu_0	0.47^{g}	0.97^{f}	0.72^{E}	0.04^{f}	0.22^{e}	0.13^{CD}
Cu_{50}	0.45^{gh}	1.93^{c}	1.19^{c}	0.02^{g}	0.31^{e}	0.17^{B}
Cu_{100}	0.37^{b}	1.81^{d}	1.09^{CD}	0.02^{g}	0.26^{d}	0.14^{C}
Cu_{200}	0.44^{gh}	3.24^{b}	1.84^{B}	0.02^{g}	0.35^{b}	0.19^{B}
Cu_{400}	0.22^{i}	4.00^{a}	2.11^{A}	0.01^{h}	0.45^{a}	0.23^{A}
Cu_{800}	0.25^{i}	1.71^{e}	0.98^{D}	0.01^{h}	0.23^{e}	0.12^{D}
میانگین mean	0.37^{B}	2.28^{A}		0.02^{B}	0.30^{A}	

در هر تیمار اندازه‌گیری شده اعداد با حروف انگلیسی مشابه فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشند.

The same letter within each treatment shows no significant differences among treatments at the 5% level (Duncan test).

طول و حجم ریشه: اثرات اصلی مس و قارچ و نیز اثر متقابل آن‌ها بر طول و حجم ریشه در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). بیش‌ترین طول ریشه در تیمار $Cu_{200}M_1$ به اندازه ۳۱/۸۶ مشاهده شد که نسبت به شاهد غیرمیکوریزی ۷۰ درصد افزایش نشان داد و حداقل آن در تیمار $Cu_{800}M_0$ و به اندازه ۴/۲۴ سانتی‌متر مشاهده شد که نسبت به شاهد غیرمیکوریزی ۵۵ درصد کاهش نشان داد (جدول ۶). داده‌های حاصل از مقایسه میانگین این صفت در جدول ۶ آورده شده است. مطابق این نتایج، بیش‌ترین حجم ریشه مربوط به تیمار $Cu_{50}M_1$ و برابر ۲/۴ سانتی‌مترمکعب بود که نسبت به شاهد غیرمیکوریزی ۷۱ درصد افزایش و کم‌ترین مقدار در تیمار $Cu_{800}M_0$ و به مقدار عددی ۰/۲۸ سانتی‌مترمکعب مشاهده شد که نسبت به شاهد غیرمیکوریزی ۶۰ درصد کاهش نشان داد (جدول ۶).

در پژوهش ژنگ و همکاران (۲۰۰۴) بر روی گیاهان زینتی داوودی، شمعدانی و رز مشخص شد که کلروز برگ به‌علت کمبود آهن ناشی از زیادی مس است. آن‌ها عنوان کردند که ریشه‌های این گیاهان خصوصاً در مراحل اولیه رشد حتی در غلظت‌های پایین‌تر از ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر، علائم سمیت را به‌صورت کاهش رشد ریشه نشان دادند و گیاهان در سطوح بالای مس کاملاً از بین رفتند. آن‌ها علت کاهش رشد و حجم ریشه را به توقف تقسیم سلولی و کاهش طول سلول نسبت دادند و بیان نمودند که در غلظت‌های بالای مس، حجم خاک مورد نیاز جهت جذب و انتقال آب و عناصر غذایی کاهش می‌یابد و به‌دنبال آن کمبود عناصر غذایی مورد نیاز برای رشد ریشه اتفاق می‌افتد و موجب مرگ گیاه می‌شود (۴۳).

جدول ٦- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل مس و میکوریز بر طول و حجم ریشه.

Table 6. The comparison of mean levels of Cu and mycorrhizal interaction on root length and volume.

حجم ریشه ($Cm^3\ pot^{-1}$) Root volume			طول ریشه ($Cm\ plant^{-1}$) Root length			سطوح مس CU Levels
میانگین mean	M_1	M_0	میانگین mean	M_1	M_0	
0.90^{C}	1.1^{e}	0.70^{g}	19.4^{A}	29.20^{c}	9.52^{g}	Cu_0
1.47^{A}	2.4^{a}	0.54^{h}	16.2^{C}	24.54^{e}	7.75^{h}	Cu_{50}
1.22^{B}	1.8^{b}	0.64^{g}	17.6^{B}	28.14^{d}	7.10^{i}	Cu_{100}
0.63^{D}	0.9^{f}	0.36^{i}	18.9^{AB}	31.86^{a}	5.94^{j}	Cu_{200}
1.01^{C}	1.6^{c}	0.42^{i}	17.9^{B}	30.86^{b}	4.90^{k}	Cu_{400}
0.84^{C}	1.4^{d}	0.28^{j}	13.3^{D}	22.30^{f}	4.24^{l}	Cu_{800}
	1.53^{A}	0.49^{B}		27.8^{A}	6.6^{B}	میانگین

در هر تیمار اندازه‌گیری شده اعداد با حروف انگلیسی مشابه فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشند.

The same letter within each treatment shows no significant differences among treatments at the 5% level (Duncan test).

درصد کلنیزاسیون میکوریزی ریشه‌ها: اثر اصلی سطوح مس و قارچ میکوریز و نیز اثرات متقابل آن‌ها بر درصد کلنیزاسیون ریشه در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که با افزایش سطوح مس، درصد کلنیزاسیون میکوریزی ریشه‌ها در تیمارهای تلقیح‌شده به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد به‌طوری‌که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان کلنیزاسیون در بین تیمارهای میکوریزی به‌ترتیب مربوط به تیمار Cu_0M_1 به مقدار عددی ۶۷/۶۴ و تیمار $Cu_{800}M_1$ به مقدار ۵۳/۶۶ درصد بود که نسبت به شاهد میکوریزی کاهش ۲۰/۷ درصدی نشان داد. طبق این نتایج بین تیمار $Cu_{50}M_1$ با شاهد میکوریزی از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. همچنین در ریشه گیاهان بدون تلقیح، هیچ درصدی از کلنیزاسیون میکوریزی مشاهده نشد که علت آن را می‌توان به استریل بودن خاک مورد استفاده دانست (جدول ۷). نتایج بررسی هاشم و همکاران (۱۹۹۰) نیز نشان داد که با افزایش سطوح فلزات سنگین در خاک، درصد کلنیزاسیون در ریشه گیاه جاروب[1] به‌شدت کاهش می‌یابد (۱۵). لیوال و همکاران (۱۹۹۵) بیان کردند که افزایش غلظت فلزات سنگین، اثر منفی بر درصد کلنیزاسیون و جوانه‌زنی اسپورهای قارچ دارد (۲۴). همچنین خائوساد و همکاران (۲۰۰۶)، طی پژوهشی تأثیر قارچ میکوریز *گلوموس موسه‌آ*[2] را در گیاه پونه مورد بررسی قرار دادند و کاهش درصد همزیستی را با افزایش غلظت مس در این گیاه دارویی مشاهده نمودند (۲۰). طبق پژوهش‌های انجام شده، مس حتی در غلظت‌های پایین برای اکثر قارچ‌ها سمی است و تأثیر سمیت مس و اثر بازدارندگی آن بر توسعه برون‌ریشه‌ای هیف قارچ، موجب کاهش فعالیت‌های متابولیکی شده و بر درصد همزیستی میکوریزی اثر منفی دارد (۷).

1- *Vaccinium macrocarpon*
2- *Glomus mosseae*

جدول ۷- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل مس و میکوریز بر درصد کلنیزاسیون میکوریزی ریشه.

Table 7. The comparison of mean levels of Cu and mycorrhizal interaction on root colonization percentage.

میکوریز Mycorrhizal	سطوح مس (mg kg^{-1} soil) Cu levels						
	Cu_0	Cu_{50}	Cu_{100}	Cu_{200}	Cu_{400}	Cu_{800}	میانگین Mean
M_0	0^f	0^f	0^f	0^f	0^f	0^f	0^B
M_1	67.64^a	67.58^a	65.52^b	62.22^c	59.27^d	53.66^e	62.66^A
میانگین Mean	33.82^A	33.8^A	32.76^A	31.11^{AB}	29.66^B	25.27^C	26.83^C

اعداد با حروف انگلیسی مشابه فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشند.

The same letter shows no significant differences among treatments at the 5% level (Duncan test).

غلظت مس در اندام هوایی و ریشه: اثرات اصلی سطوح مس و قارچ و نیز اثرات متقابل آن‌ها بر غلظت مس اندام هوایی و ریشه در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۸). نتایج نشان داد که با افزایش سطح مس کاربردی، غلظت مس در اندام هوایی گیاهان تلقیح‌شده و نشده به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. مطابق نتایج مشاهده شد که غلظت مس ساقه در تیمارهای غیرمیکوریزی (به‌جز تیمارهای Cu_0M_0 و $Cu_{50}M_0$) نسبت به تیمارهای تلقیح‌شده در سطح بالاتری قرار دارد. کم‌ترین غلظت مس اندام هوایی مربوط به تیمار Cu_0M_0 و برابر با ۶/۳۷ میکروگرم به‌ازای هر گرم وزن خشک گیاه بود و بیش‌ترین غلظت در تیمار $Cu_{800}M_0$ و به مقدار ۱۸۶/۶ میکروگرم به‌ازای هر گرم وزن خشک گیاه مشاهده شد که نسبت به شاهد غیرمیکوریزی ۲۹ برابر افزایش نشان داد (جدول ۹).

کم‌ترین غلظت مس ریشه مربوط به تیمار Cu_0M_0 و برابر با ۱۲/۵۸ میکروگرم به‌ازای هر گرم وزن خشک گیاه بود و بیش‌ترین غلظت مس در تیمار $Cu_{800}M_1$ و به مقدار ۲۳۶/۱۰ میکروگرم به‌ازای هر گرم وزن خشک گیاه بود که نسبت به شاهد غیرمیکوریزی ۱۹ برابر افزایش نشان داد (جدول ۸). همچنین نتایج نشان داد که با افزایش سطح مس کاربردی، غلظت آن در ریشه گیاهان تلقیح‌شده و نشده به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و غلظت مس ریشه در تیمارهای تلقیح‌شده با قارچ نسبت به تیمارهای بدون تلقیح به‌طور معنی‌داری بالاتر بود. به‌طوری‌که تیمارهای $Cu_{800}M_1$ و $Cu_{800}M_0$ به‌ترتیب موجب افزایش ۱۸ و ۶ برابری غلظت مس ریشه نسبت به شاهد شدند و قارچ موجب افزایش دو برابری غلظت مس ریشه در گیاهان تلقیح‌شده گردید (جدول ۹).

تجمع مس در ریشه‌ها و نیز کاهش انتقال آن از ریشه به ساقه در گزارش‌های بسیاری اثبات شده است (۴۰، ۲۶). در پژوهش ژنگ و همکاران (۲۰۰۴) مشخص شد که غلظت مس در ریشه‌ها می‌تواند ۲۰ تا ۳۰ برابر بیش‌تر از غلظت مس در اندام‌های هوایی گیاه باشد. همچنین آن‌ها بیان کردند که ریشه‌های آسیب‌دیده در شرایط سمیت مس، نسبت به پاتوژن‌های ریشه حساس‌تر می‌شوند (۴۳). مطابق نتایج، نسبت غلظت مس ساقه به ریشه در گیاهان غیرمیکوریزی نسبت به گیاهان تلقیح‌شده بالاتر بود. نتایج آریاگادا و همکاران (۲۰۰۴) نشان داد که در سطوح بالای مس، گیاه اکالیپتوس[1] تلقیح‌شده با قارچ *گلوموس دسرتی کولا*[2] نسبت به گونه‌های تلقیح‌نشده،

1- *Eucalyptus globulus*
2- *Glomusdeserticola*

غلظت‌های بالاتری از مس را در اندام‌های خود تجمع دادند (۴).

ازونیدو (۱۹۹۵)، مشاهده نمود که در غلظت‌های بالای مس، گیاهان حساس نسبت به گیاهان متحمل، مقادیر بالاتری از این فلز را در اندام‌های هوایی خود تجمع می‌دهند و میزان انتقال مس از ریشه به شاخه‌ها در گیاهان حساس بیش‌تر است (۳۲). میکوریز به‌دلیل داشتن تماس مستقیم با ریشه و وجود رابطه همزیستی با آن و با تولید برخی متابولیت‌ها و هورمون‌های محرک رشد گیاه مانند اکسین، سیتوکینین، جیبرلین و همچنین تولید آنزیم‌های مؤثر در کاهش تنش اتیلنی ناشی از اثرات سوء فلزات سنگین، تحمل ریشه به غلظت‌های بالای مس را افزایش داده و موجب تجمع بیش‌تر مس در ریشه گیاه می‌شود (۴۲). برخی نتایج بیانگر آن است که رفتار قارچ میکوریز در محافظت از گیاهان در برابر سمیت فلزات سنگین، ممکن است براساس نوع گیاه میزبان، غلظت و نوع فلز سنگین و قارچ جدا شده متفاوت باشد (۲). بنابراین جهت تشخیص رفتار گونه‌های مختلف قارچ میکوریز در خانواده‌های گیاهی، نیاز به پژوهش‌های بیش‌تری در مورد مکانیسم‌های حفاظت در مقابل فلزات سنگین می‌باشد.

جدول ۸- نتایج تجزیه واریانس تأثیر سطوح مس و میکوریز بر غلظت مس ساقه، غلظت مس ریشه، فاکتور انتقال، میزان جذب اندام هوایی و ریشه.

Table 8. The results of variance analysis for stem Cu concentrations, root Cu concentrations, transfer factor, shoot and root uptake of Zinnia under effect of Cu levels and mycorrhizal.

منابع تغییرات Source of the variance	درجه آزادی	میانگین مربعات mean of squares				
		غلظت مس ساقه Degrees of freedom	غلظت مس ریشه Root Cu concentration	جذب ساقه Stem uptake	جذب ریشه Root uptake	فاکتور انتقال transfer factor
سطوح مس Cu levels	5	17115**	12973**	2338**	759**	1.13**
قارچ میکوریز Mycorrhizal fungi	1	43076**	186931**	91236**	32193**	40.67**
مس × قارچ Cu * fungi	5	11612**	1715**	283^{ns}	719**	1.46**

^{ns}، * و ** به‌ترتیب نمایانگر غیرمعنی‌دار بودن و تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

The same letter shows no significant differences at the 5% level (Duncan test).

جدول ۹- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل مس و میکوریز بر غلظت مس ساقه و ریشه.

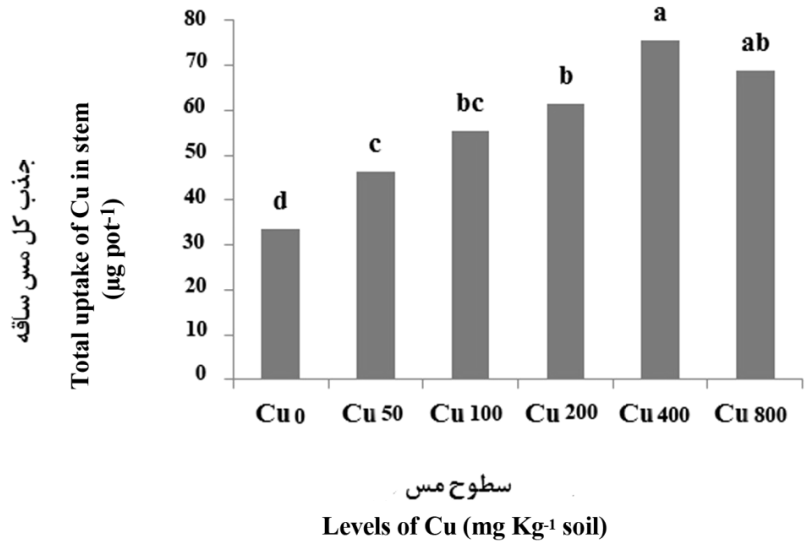
Table 9. The comparison of mean levels of Cu and mycorrhizal interaction on stem and root Cu concentrations.

غلظت مس ریشه ($\mu g\ gr^{-1}$ plant dry weight) Root Cu concentrations.			غلظت مس ساقه ($\mu g\ gr^{-1}$ plant dry weight) Stem Cu concentrations.			سطوح مس Cu levels
میانگین Mean	M_1	M_0	میانگین Mean	M_1	M_0	
55^{F}	99^{f}	12.6^{I}	26.7^{F}	38.9^{h}	6.4^{j}	Cu_0
79^{F}	139^{e}	19.5^{K}	37.6^{E}	40.3^{h}	34.8^{i}	Cu_{50}
91^{D}	156^{c}	26.7^{j}	53^{D}	44.1^{g}	63^{e}	Cu_{100}
104^{C}	149^{d}	59^{i}	88^{C}	38.4^{h}	137^{c}	Cu_{200}
119^{B}	165^{b}	73^{h}	109^{B}	49.1^{f}	169^{b}	Cu_{400}
160^{A}	236^{a}	85^{g}	126^{A}	65^{d}	186^{a}	Cu_{800}
	157^{A}	46.1^{B}		46.1^{B}	99.7^{A}	میانگین Mean

در هر تیمار اندازه‌گیری شده اعداد با حروف انگلیسی مشابه فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می باشند.

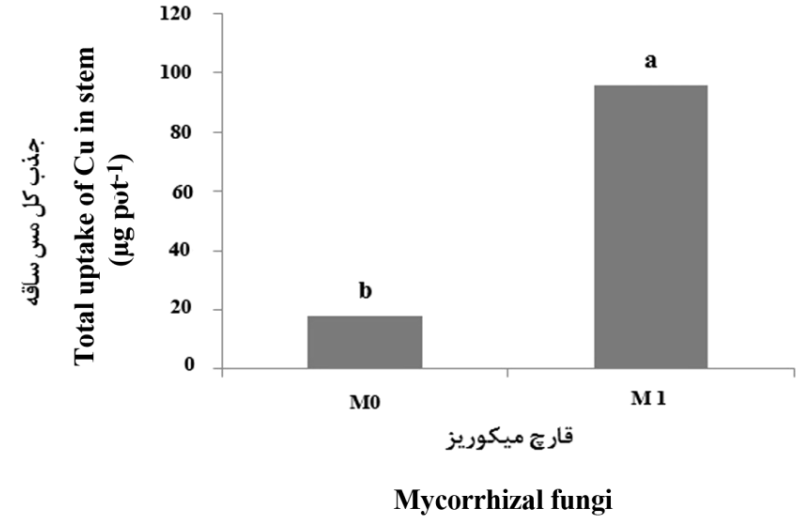
The same letter within each treatment shows no significant differences among treatments at the 5% level (Duncan test).

میزان جذب مس ساقه: اثرات اصلی مس و قارچ بر این صفت در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد، اما اثرات متقابل آن‌ها معنی‌دار نشد (جدول ۸). مطابق شکل ۸، با افزایش سطوح مس، میزان جذب ساقه به‌طور معنی‌داری افزایش و در سطح ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس کاهش نشان داد. کم‌ترین مقدار جذب اندام هوایی مربوط به شاهد و به مقدار ۳۳/۵۲ میکروگرم به‌ازای هر گلدان بود و بیش‌ترین آن در سطح ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس و به مقدار ۷۵/۵۴ میکروگرم به‌ازای هر گلدان مشاهده شد که نسبت به شاهد ۵۵ درصد افزایش نشان داد. از آنجایی‌که وزن خشک گیاه در غلظت ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس کم‌ترین مقدار بود، بنابراین میزان جذب که از حاصل‌ضرب غلظت مس در وزن خشک گیاه به‌دست می‌آید، در این غلظت کاهش نشان داد. همچنین قارچ موجب افزایش ۵ برابری میزان جذب ساقه در گیاهان تلقیح‌شده نسبت به گیاهان تلقیح‌نشده گردید و از آنجایی‌که میکوریز موجب افزایش سطح جذب ریشه شده و وزن ماده خشک را نیز افزایش می‌دهد، بنابراین مقدار کل مس ریشه و ساقه در گیاهان میکوریزی نسبت به گیاهان تلقیح‌نشده بالاتر است (شکل ۹).



شکل ۸- نمودار تأثیر سطوح مس بر جذب مس ساقه.

Figure 8. Effect of Cu levels on Cu uptake in stem.



شکل ۹- نمودار تأثیر میکوریز بر جذب ساقه.

Figure 9. Effect of mycorrhizal fungi on stem uptake.

میزان جذب مس ریشه: اثرات اصلی مس و قارچ و نیز اثرات متقابل آن‌ها بر میزان جذب مس در ریشه در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۸). مطابق جدول ۱۰، کم‌ترین مقدار جذب در تیمار Cu_0M_0 و به مقدار ۰/۴۶۷ میکروگرم بود و بیش‌ترین میزان جذب ریشه در تیمار $Cu_{400}M_1$ و به مقدار ۷۳/۸۴ میکروگرم مشاهده شد. مطابق نتایج اگرچه غلظت مس در اندام هوایی گیاهان تلقیح‌نشده بالاتر بود، اما میزان جذب مس در ساقه و ریشه گیاهان تلقیح‌شده با قارچ در سطح بالاتری قرار داشت به‌طوری‌که میزان جذب ریشه در گیاهان تلقیح‌شده نسبت به گیاهان تلقیح‌نشده تا ۵ برابر افزایش نشان داد. در پژوهشی یو و همکاران (۲۰۰۴) بیان نمودند که غلظت بالاتر فلزات سنگین در گیاهان میکوریزی، به‌علت افزایش

جذب فلزات به‌وسیله مکانیسم‌هایی مانند توسعه سطح جذب و حجم قابل دسترس خاک و نیز گسترش هیف‌ها در محیط خاک می‌باشد و قارچ‌های میکوریز می‌توانند با غیرمتحرک کردن مس در ریسه و زیست‌توده قارچی، سمیت آن را کاهش داده و موجب جذب بیش‌تر آن در ریشه گیاهان شوند (۴۱).

مطابق نتایج، گیاهان تلقیح‌نشده بیش‌تر مس را در اندام هوایی تجمع دادند در حالی‌که گیاهان تلقیح‌شده بیش‌تر مس را در ریشه نگه داشتند و با تثبیت آن، از انتقالش به اندام هوایی گیاه جلوگیری کردند ولی مقدار کل مس ساقه و ریشه در گیاهان تلقیح‌شده نسبت به گیاهان تلقیح‌نشده بالاتر بود و از آنجایی‌که گیاهان تلقیح‌شده بیوماس و مقدار ماده خشک بیش‌تری در مقایسه با گیاهان تلقیح‌نشده داشتند، بنابراین مقدار جذب مس در ساقه و ریشه این گیاهان بالاتر بود.

جدول ۱۰- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل مس و قارچ میکوریز بر مقدار جذب ریشه (میکروگرم به‌ازای هر گلدان).

Table 10. The comparison of mean levels of Cu and mycorrhizal interaction on root uptake (μgpot^{-1}).

میکوریز mycorrhizal	سطوح مس (mg kg^{-1} soil) Cu levels						میانگین Mean
	Cu_0	Cu_{50}	Cu_{100}	Cu_{200}	Cu_{400}	Cu_{800}	
M_0	0.5^{g}	0.5^{g}	0.7^{g}	1.5^{g}	1.0^{g}	0.8^{g}	0.8^{B}
M_1	21.6^{f}	44.3^{d}	41.2^{e}	52^{c}	73^{a}	53^{b}	47.9^{A}
میانگین Mean	11.0^{D}	23.4^{C}	20.9^{C}	26.8^{B}	37.4^{A}	27.4^{B}	

اعداد با حروف انگلیسی مشابه فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشند.

The same letter shows no significant differences among treatments at the 5% level (Duncan test).

فاکتور انتقال: اثرات اصلی مس و قارچ و نیز اثرات متقابل آن بر این فاکتور در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۸). فاکتور انتقال گیاه شاخصی مناسب جهت ارزیابی توانایی گیاه و نیز تأثیر قارچ میکوریز در انتقال مس از ریشه به شاخساره گیاه است. نتایج نشان داد که گل آهار با دارا بودن فاکتور انتقال بزرگ‌تر از یک، می‌تواند در گیاه‌پالایی مکان‌های آلوده به مس کاربرد داشته و قارچ میکوریز با افزایش جذب مس در ریشه گیاه، از انتقال آن به بخش‌های هوایی جلوگیری کرده و موجب افزایش دوام گیاه در شرایط سمیت می‌شود. بدین ترتیب این قارچ‌ها می‌توانند در تثبیت گیاهی فلز سنگین مس مؤثر باشند. مطابق نتایج، در گیاهان تلقیح‌شده با قارچ، بیش‌تر مس در ریشه نگه داشته شد و نسبت مس ساقه به ریشه در این گیاهان کم و فاکتور انتقال کوچک‌تر از یک است و در مورد گیاهان تلقیح‌نشده عکس این حالت است (جدول ۱۱).

قارچ با کاهش سمیت مس و افزایش آستانه تحمل گیاه به سمیت و در نتیجه با افزایش عملکرد ریشه و ساقه آن و از سوی دیگر با افزایش زیست‌فراهمی مس برای گیاه و با افزایش جذب آن در ریشه و شاخساره، نقش تحریک‌کنندگی بسیار چشمگیری در گیاه‌پالایی مکان‌های آلوده به مس خاک دارد. در آزمایشی که توسط مارشل و همکاران (۲۰۰۷) و به‌منظور بررسی توان گیاه‌پالایی دو گونه

گیاهی سورگوم و گل آفتابگردان انجام گرفت، به این نتیجه رسیدند که سورگوم در مقایسه با آفتابگردان، فلزات سنگین بیش‌تری را جذب کرد ولی آفتابگردان، ضریب انتقال بزرگ‌تری نسبت به سورگوم و سایر گیاهان نشان داد و می‌توان از این گل زینتی جهت استخراج آلاینده‌ها از مکان‌های آلوده به غلظت‌های بالای فلزات سنگین استفاده نمود (۲۷).

جدول ۱۱- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل مس و قارچ میکوریز بر فاکتور انتقال.

Table 11. The comparison of mean levels of Cu and mycorrhizal interaction on transfer factor.

سطوح مس ($mg\ kg^{-1}$ soil) Cu levels							
میانگین Mean	Cu_{800}	Cu_{400}	Cu_{200}	Cu_{100}	Cu_{50}	Cu_0	میکوریز mycorrhiza
1.95A	2.21c	2.34ab	2.33b	2.44a	1.81d	0.55e	M_0
0.30B	0.28g	0.29g	0.25g	0.28g	0.29g	0.39f	M_1
	1.24AB	1.32A	1.29A	1.36A	1.05B	0.48C	میانگین Mean

اعداد با حروف انگلیسی مشابه فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشند.

The same letter shows no significant differences among treatments at the 5% level (Duncan test).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش قارچ میکوریز موجب افزایش ویژگی‌های رشدی گیاه زینتی مورد مطالعه شد و توانست ظرفیت تحمل گیاه را در شرایط سمیت مس افزایش دهد. گیاهان تلقیح‌شده با قارچ نسبت به گیاهان تلقیح‌نشده ظاهری شاداب‌تر داشتند و اثر سمیت مس بر گیاهان مورد مطالعه در غلظت‌های بالا بسیار مشهود بود. با توجه به نتایج، مس موجب کاهش قابل‌توجه برخی صفات خصوصاً کاهش طول ساقه، سطح برگ، تعداد برگ و طول ریشه در گل آهار گردید. همچنین مطابق نتایج، با افزایش سطوح مس، غلظت مس ساقه در تیمارهای تلقیح‌نشده نسبت به گیاهان میکوریزی افزایش نشان داد، ولی غلظت مس ریشه در تیمارهای تلقیح‌شده نسبت به گیاهان تلقیح‌نشده افزایش داشت. اگرچه غلظت مس ساقه در گیاهان تلقیح‌نشده بالاتر بود، ولی میزان جذب مس در ساقه میکوریزی‌ها بیش‌تر بود. بنابراین با توجه به نتایج این پژوهش، می‌توان از این گل زینتی برای استخراج آلاینده‌ها از مکان‌های آلوده به غلظت‌های بالای مس استفاده نمود.

منابع

1.Alloway, B.J. 1990. Heavy metals in soils. John Wiley and Sons. Inc. New York, ISBN0470215984.

2.Andrad, S.A., Abreu, M.F., and Silveria, A. 2004. Influence of lead additions on arbuscular mycorhizae and Rhizobium symbioses under soybean plants. Applied Soil Ecology. 3: 71-89.

3.Ariyakanon, N., and Winaipanich, B. 2006. Phytoremediation of Copper Contaminated Soil by *Brassica juncea* (L.) Czern and *Bidens Alba* (L.) DC. var. radiate. J. Sci. Res. Chula. Univ. 31: 49-56.

4.Arriyagada, C., Herrera, M.A., Garcia-Romera, I., and Ocampo, J.A. 2004. Tolerance to Cd of soybean (*Glycine max*) and eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) inoculated with arbuscular mycorrhizal and saprobe fungi. Symbiosis. 36: 285-301.
5.Asgharzadeh, A.N., Salehrastin, N., Tofighi, H., and Alizadeh, A.A. 2001. distribution of mycorrhizal fungi in saline soils of the Tabriz Plain of its relation to some physical and chemical properties of soil. J. Agric. Sci. Iran. 32: 1. 89-99.
6.Audet, P., and Charest, C. 2006. Heavy metal phytoremediation from a meta-analytical perspective. Enviromental Pollution. 2: 1. 48-58.
7.Baldrian, P. 2003. Interactions of heavy metals with white-rot fungi. Enzyme Microb. Technology. 32: 78-91.
8.Coombes, A.J., Lepp, N.W., and Phipps, D.A. 1976. Effect of copper on IAA oxidase activity in root tissue of barly (*Hordeumvulgare* L. zephyr). Plant Physiology. 55: 236-242.
9.Díaz, G., Azcon-Aguilar, C., and Hornubia, M. 1996. Influence of arbuscularmycorrhizae on heavy metal (Zn and Pb) uptake and growth of *Lygeumspartum* and *Anthylliscystoides*. Plant and soil science. 180: 241-249.
10.Gaur, A., and Adholeya, A. 2004. Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. Current Science. 86: 528-534.
11.Giovannetti, M., and Mosse, B. 1980. An evaluation of technique to measure vesicular Arbuscular Mycorrhizal infection in roots. New Phytologist. 84: 489-500.
12.Gohre, V., and Paszkowski, U. 2006. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation. Planta. 223: 1115-1122.
13.Gonzalez-Chavez, M.C., Carrillo-Gonzalez, R., Wright, S.F., and Nichols, K.A. 2004. The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements. Environmental Pollution. 130: 317-323.
14.Hartmond, U., Schaesberg, N.V., Graham, J.H., and Syvertsen, J.P. 1987. Salinity and flooding stress effects on mycorrhizal and non-mycorrhizal citrus rootstock seedlings. Plant and Soil science. 104: 37-43.
15.Hashem, A.R. 1990. *HymenoscyPhusericae* and the resistance of *Vacciniummacrocarpon* to lead. Transactions of the mycological Society of Japan. 31: 3. 345-353.
16.Hern´andez-Apaolaza, L., Gasc´o, A.M., Gasc´o, J.M., and Guerrero, F. 2005. Reuse of waste materials as growing media for ornamental plants, Bioresource Technology. 96: 125-131.
17.Igwe, J.C., and Abia, A.A. 2006. A bioseperation process for removing heavy metals from waste water using biosorbents. Afr. J. Biotechnol. 5: 12. 1167-1179.
18.Juniper, S., and Abbott, L.K. 1993. Vesicular-arbuscular mycorrhizas and soil salinity. Mycorrhiza. 4: 45-57.
19.Khademi, A., and Kord, B. 2010. The role of broad species (the plant tree and the ash) in reducing pollution from lead. J. Sci. Tech. Natur. Resour. 5: 1. 1-12.
20.Khaosaad, T., Vierheilig, H., Nell, M., Zitterl-Eglseer, K., and Novak, J. 2006. Arbuscularmycorrhiza alter the concentration of essential oils in oregano (*Origanum* sp., "Lamiaceae"). Mycorrhiza. 16: 443-446.
21.Kim, B.E., Nevitt, T., and Thiele, D.J. 2008. Mechanisms for copper acquisition, distribution and regulation. Natural Chemical Biology. 4: 176-185.
22.Kim, S.H., and Lee, I.S. 2005. Phytoremediation of Cu-contaminated Soil and Water by *commelinacommunis*. Korean medicinal plants. 28: 7-13.
23.Lanaras, T., Moustakas, M., Symeoniodis, L., Diamantoglou, S., and Karataglis, S. 1993. Plant metal content, growth response and some photosynthetic measurement on field- cultivated wheat growing on ore bodies enriched in Cu. Physiologiaplantarum. 88: 2. 307-314.
24.Leyval, C., Singh, B.R., and Joner, E.J. 1995. Occurrence and infectivity of arbuscular mycorrhizal fungi in some Norwegian soils influenced by heavy metals and soil properties. Water Air Soil Pollution. 84: 203-216.
25.Lou, L.Z., Shen, X., and Li, F. 2004. The copper tolerance mechanisms of *Elsholtziahaichowensis* a plant from copper-enriched soils. Environmental and Experimental botany. 51: 111-120.

26.MacFarlane, G.R., and Burchett, M.D. 2002. Toxicity, growth and accumulation relationships of copper, lead and zinc in the grey mangrove *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. Marine Environmental Research. 54: 1. 65-84.
27.Marchiol, L., Fellet, G., Perosa, D., and Zerbi, G. 2007. Removal of trace metals by Sorghum bicolor and Helianthus annuus in a site polluted by industrial wastes: A field experience. Plant Physiology and Biochemistry. 45: 379-387.
28.McMillen, B.G., Juniper, S., and Abbott, L.K. 1998. Inhibition of hyphal growth of a vesicular arbuscular mycorrhizal fungus in soil containing sodium chloride limits the spread of infection from spores. Soil Biology and Biochemistry. 30: 1639-1646.
29.Montvydiene, D., and Marciulioniene, D. 2004. Assessment of toxic interactions of heavy metals in a multicomponent mixture using *Lepidiumsativum*. Bot. Gaz. 9: 351-358.
30.Mukhopadhyay, S., and Maiti, S.K. 2010. Phytoremediation of metal mine waste. Applied Ecology and Environmental Research. 8: 3. 207-222.
31.Murphy, A.S., Eisinger, W.R., Shaff, J.E., Kochian, L.V., and Taiz, L. 1999. Early copper-induced leakage of K^+ from Arabidopsis seedlings is mediated by ion channels and coupled to citrate efflux. Plant Physiology. 121: 1375-1382.
32.Ouzounidou, G. 1995. Cu-ions mediated changes in growth, chlorophyll and other ion contents in a Cu-tolerant *Koeleriasplendens*. Biologia Plantarum. 37: 71-78.
33.Peralta, J.R., Gardea-Torresdey, J.L., Tiemann, K.J., Gomez, E., Arteaga, S., Rascon, E., and Parsons, J.G. 2001. Uptake and effect of five heavy metals on seed germination and plant growth in alfalfa (*Medicago sativa*). Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 66: 727-734.
34.Phillips, J.M., and Hyman, D.S. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Transactions of the British Mycological Society. 55: 157-160.
35.Sebastiani, L., Seebba, F., and Tognettii, R. 2004. Heavy metal accumulation and growth responses in poplar clones Eridano (*Populusdeltoidesmaximoiczii*) and I- (*P.euramericana*) exposed to industrial wasle. Environmental and Experimental Botany. 52: 79-88.
36.Shengoil, T., Shaolin, P., Yugiongl, J.H., and Jiang, Z. 2006. The effects of copper stresses on the growth and physiological characterics for *Commelinacommunis*. Chinese Agriculture Science Bulletin. Pp: 9-19.
37.Thamayanthi, D., Sharvanan, P.S., and Javaprasad, B. 2013. Phytoremediation of lead contaminated soil using ornamental plants (Marigold and Zinnia). Inter. J. Environ. Biol. 3: 1. 32-34.
38.Weissenhorn, I., Leyval, C., Belgy, G., and Berthelin, J. 1995. Arbuscular mycorrhizal contribution to heavy metal uptake by maize (*Zea mays* L.) in pot culture with contaminated soil. Mycorrhiza. 5: 245-252.
39.Wu, Q.S., Zou, Y.N., Xia, R.X., and Wang, M.Y. 2007. Five Glomus species affect water relations of *Citrus tangerine* during drought stress. Botanical studies. 48: 147-154.
40.Ye, Z.H., Baker, A.J.M., Wong, M.H., and Willis, A.J. 1997. Copper and nickel uptake, accumulation and tolerance in *Typhalatifolia* with and without iron plaque on the root surface. Plant Physiology. 136: 3. 481-488.
41.Yu, X., Cheng, J., and Wong, M.H. 2004. Earthworm-mycorrhiza interaction on Cd uptake and growth of ryegrass. Soil Biology & Biochemistry. 37: 1-7.
42.Zhang, H.H., Tang, M., and Zheng, C. 2010. Effect of inoculation with AM fungi on lead uptake, translocation and stress alleviation of *Zea mays* L. seedlings planting in soil with increasing lead concentrations. Euro. J. Soil Biol. 46: 306-311.
43.Zheng, Y., Wang, L., and Dixon, M. 2004. Response to copper toxicity for three ornamental crops in solution culture. Horticultural Science. 39: 1116-1120.

J. of Soil Management and Sustainable Production, Vol. 5(3), 2015
http://ejsms.gau.ac.ir

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

The effect of Mycorrhizal fungi on the phytoremediation potential of copper element in Zinnia (*Zinnia elegans*)

M. Naseri[1], *M. Sarcheshmehpour[2] and V.R. Safari[3]
[1]M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science and Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman,
[2]Assistant Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman,
[3]Associate Prof., Dept. of Horticulture, Shahid Bahonar University of Kerman
Received: 01/12/2014; Accepted: 09/28/2014

Abstract

Background and Objectives: Soil pollution by heavy metals is considered as important environmental problem that received more attention nowadays. Copper is one of essential microelements for plant that in high concentration will cause soil pollution and toxicity effects on plant. This element can accumulate in soil via mining activity and using pesticides. Many copper mines are in use in Iran and around the world. Ornamental plants have a special position in beautifying the industrial and urban landscapes and recognition of hyper accumulator species for amendment of contaminated soils has a considerable value.

Material and Methods: The effect of different levels of copper (0, 50, 100, 200, 400 and 800 mg copper per kg soil) from copper sulfate source in presence or absence of mycorrhiza fungi on growth characteristics of Zinnia flowers were studied in this research. The selected mycorrhiza were isolated from Zinnia plant root with high colonization percentage and had also colonization percentage of more than 80 percent with clover and sorghum. A factorial experiment with a completely randomized design with 5 replications was conducted in greenhouse conditions. The Plants were harvested after a period of 70 days and some parameters such as shoot and root length, leaf number, leaf area, root volume, shoot and root dry weight, root mycorrhizal colonization percentage and copper concentration in shoot and root were measured.

Results: The results of field evaluation showed that root mycorrhizal colonization of Zinnia were up to 96 percent and the colonization percent was more in sandy soil and also salinity had significant negative effect on colonization percent. The greenhouse results showed that the effect of mycorrhizal fungi on all parameters was significant at the 1% level and Mycorrhizae enhanced shoot dry weight, root fresh and dry weight and root copper concentration by 91, 83, 92 and 71 percent respectively than non-mycorrhizal control. The effect of copper levels were significant on shoot length at 5% and on the other parameters at 1% percent level. The level of 800 mg/kg of copper decreased the number of leaves, root length, mycorrhizal colonization percentage and leaf area by 39, 31, 25 and 97 percent compared to control respectively. The interaction between copper and fungi had no significant effect on shoot length and leaf area, but were significant on leaf number at 5% and on the other parameters at 1% level. Using mycorrhizal inoculants decreased the negative effects of copper application and resulted in a considerable difference between measured index.

Conclusion: The results showed that increasing in copper application resulted in increasing copper concentration in shoots and roots of plants and the concentration in roots of inoculated plants were higher and in shoots were lower than none inoculated. However inoculation of plants with mycorrhiza resulted in a higher accumulation of copper in roots and decreased its translocation to shoot, but total uptake of copper in shoots of inoculated plant was significantly higher. So based on the result of this research, this ornamental plant can be used for remediation of polluted soils by high concentration of copper.

Keywords: Phytoremediation, *Zinnia elegans*, Copper, Arbuscular mycorrhizal fungi

* Corresponding Authors; Email: msarcheshmeh@uk.ac.ir