

تأثیر مایه‌زنی قارچ‌های میکوریزا بر ویژگی‌های رشدی، پایداری غشاء، محتوای نسبی آب برگ و جذب عناصر گشیز تحت تنش کادمیوم

فریبا محمدی فرد و محمد مقدم¹

دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ fariba.mohammdifard@gmail.com

دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ m.moghadam@um.ac.ir

دریافت: 98/9/24 و پذیرش: 99/2/15

چکیده

فلزات سنگین را می‌توان یکی از آلاینده‌های اکوسیستم نام برد که به دلیل اثرات فیزیولوژیکی خاص خود بر روی موجودات زنده حتی در غلظت‌های پایین هم از اهمیت بالایی برخوردار هستند. فلز کادمیوم در بین فلزات سنگین، به دلیل تحرک بالا در خاک، حلالیت زیاد در آب و خاک به‌عنوان یکی از مهمترین فلزات سنگین شناخته می‌شود. به همین منظور آزمایشی گلدانی جهت ارزیابی خصوصیات رشدی، پایداری غشاء، محتوای نسبی آب برگ و جذب برخی عناصر در گیاه گشیز (*Coriandrum sativum* L.) تحت شرایط تنش کادمیوم و مایه‌زنی قارچ‌های میکوریزا به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور و در 3 تکرار در دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد. فاکتور اول نیترات کادمیوم در 4 سطح (۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و فاکتور دوم قارچ میکوریزا در 3 سطح (بدون مایه‌زنی قارچ، قارچ‌های *Funniformis mossea* و *Rhizophagus intraradices*) بود. نتایج بیانگر این بود که با افزایش سطح تنش صفات رشدی، شاخص پایداری غشاء، درصد کلونیزاسیون و غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، آهن و روی در گشیز به‌طور معنی‌داری کاهش یافت درحالی‌که با افزایش غلظت کادمیوم خاک، غلظت عنصر کادمیوم و محتوای نسبی آب برگ در گیاه به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد. اما مایه‌زنی قارچ میکوریزا توانست اثرات زیانبار کادمیوم را در گیاه کاهش دهد. به طوری که بیشترین غلظت نیتروژن (3/08 درصد)، فسفر (0/126 درصد)، کلسیم (2/92 درصد)، منیزیم (0/85 درصد) و روی (121 میلی‌گرم در کیلوگرم) در تیمار مایه‌زنی قارچ میکوریزا به دست آمد. قارچ *Funniformis mossea* با کاهش 42 درصدی غلظت کادمیوم در بالاترین سطح آلودگی (80 میلی‌گرم در کیلوگرم) تأثیر بیشتری نسبت به قارچ *Rhizophagus intraradices* داشت. تلقیح با قارچ‌های میکوریزا (به ویژه قارچ *Funniformis mossea*) توانست تحمل گیاه را در مقابله با تنش کادمیوم بالا ببرد. به طوری که گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریزا رشد و عملکرد بالاتری نسبت به گیاهان بدون تلقیح داشتند و کاربرد آن‌ها در این شرایط پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات رشدی، محتوای نسبی آب برگ، عناصر غذایی، کادمیوم، قارچ‌های میکوریزا

¹ نویسنده مسئول، آدرس: مشهد، دانشکده کشاورزی - دانشکده کشاورزی، گروه علوم باغبانی

مقدمه

گشنیز (*Coriander*) گیاهی یکساله با نام علمی *Coriandrum sativum* L. متعلق به خانواده چتریان (*Apiaceae*) است که به‌عنوان سبزی و گیاه دارویی نقش ویژه‌ای در برنامه غذایی انسان دارد. اندام‌های مختلف گیاه از جمله برگ، ساقه و ریشه آن کاربرد خوراکی، آرایشی و دارویی دارد (گورره و همکاران، 2005). از دیگر کاربردهای آن می‌توان به هضم‌کننده غذا، اشتهاآور، برطرف کننده دردهای عضلانی، دارا بودن اثرات آرامش-بخش اشاره نمود (دمیر، 2004). سبزی‌ها از طرق مختلف (از جمله آبیاری با آب آلوده و لجن فاضلاب) به فلزات سنگین آلوده می‌شوند (هوانگ و همکاران، 2014). فلزات سنگین از مهمترین آلاینده‌های زیست محیطی هستند (لست، 2002) که شامل عناصری با عدد اتمی بالاتر از 20 و چگالی بالاتر از پنج گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشند (آلوی، 2010). فلزات سنگین به‌وسیله فرایندهای بسیاری از جمله مصارف صنعتی، ریزش‌های اتمسفری، فاضلاب شهری، کودهای شیمیایی و آفت-کش‌ها در خاک تجمع می‌یابند (آلوی، 2005). این فلزات شامل سرب، اورانیوم، کادمیوم، جیوه، کروم، آرسنیک، آلومینیوم و کبالت می‌باشند (مک‌ایننتیر و همکاران، 2003). کادمیوم اثرات مخربی بر روی سلامت انسان، محیط زیست گیاهی و جانوری دارد (رحمان و همکاران، 2011).

این فلز به علت تحرک زیادش در خاک یکی از خطرناکترین فلزات سنگین محسوب می‌شود به طوری که در غلظت‌های کم هم برای گیاهان مضر می‌باشد (داس و همکاران، 1997). کادمیوم به راحتی توسط ریشه گیاهان جذب می‌شود و این درحالی است که سمیت آن بیست برابر بیشتر از سایر فلزات سنگین است (نورانی و همکاران، 2012). قرار گرفتن در معرض غلظت‌های بالای فلزات سنگین رشد و توسعه گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (زای و مهرتورا، 2008) و منجر به کاهش جوانه-زنی، کوتاه شدن طول شاخساره و ریشه و کاهش سطح برگ، کلروزه شدن برگ‌ها، اختلال در جذب آب و کاهش جذب عناصر میکرو می‌شود (نیکولیک و همکاران، 2008؛ استریت و همکاران، 2007). تجمع فلز سنگین در خاک منجر به تخریب کیفیت خاک، کاهش عملکرد گیاهان و کاهش کیفیت محصولات کشاورزی می‌شود (لانگ و همکاران، 2002). در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین حضور ریزجاندارانی مانند قارچ‌های آربوسکولار مایکوریزا در رایزوسفر، می‌تواند فراهمی و سمیت فلزات سنگین را برای گیاهان تغییر دهد (بیرو و تاکس، 2007).

یکی از گروه‌های مهم قارچ‌های مایکوریزا، قارچ‌های آربوسکولار مایکوریزا می‌باشند که توانایی برقراری رابطه همزیستی با 80 درصد از گیاهان را دارند (اسمیت و همکاران، 2008). قارچ‌های مایکوریزا آربوسکولار قادرند اثرات سوء ناشی از حضور غلظت‌های بالای فلزات سنگین را در گیاهان کاهش دهند (لیوال و همکاران، 2002). مکانیسم‌هایی که قارچ‌های مایکوریزا آربوسکولار برای کاهش تنش فلزات سنگین در گیاهان مورد استفاده قرار می‌دهند عبارتند از کلات شدن فلزات سنگین در میسلیم‌های خارجی، بهبود تغذیه معدنی، به ویژه فسفر و تغییر pH ریزوسفر می‌باشد (گونزالز و همکاران، 2005). در پژوهشی که بر روی گیاه سیاهدانه در شرایط حضور کادمیوم و همزیستی قارچ‌های مایکوریزا صورت گرفت، نتایج حاکی از این بود که میزان کادمیوم منتقل شده از ریشه به اندام هوایی در گیاهان همزیست در مقایسه با گیاهان غیرهمزیست کمتر است (سادات شمشیرگران و همکاران، 1395). همچنین در گیاه دارویی بارهنگ در شرایط تلقیح با قارچ‌های مایکوریزا و آلودگی فلزات سنگین نتایج نشان داد که در گیاهان تلقیح شده، زیست توده ریشه و اندام هوایی افزایش یافت (اولوسکا و همکاران، 2012). هدف از انجام پژوهش حاضر ارزیابی دو گونه از قارچ‌های آربوسکولار مایکوریزا بر روی خصوصیات رشدی، شاخص پایداری غشاء، محتوای نسبی آب برگ، درصد کلونیزاسیون و جذب برخی عناصر در گیاه دارویی گشنیز در حضور فلز سنگین کادمیوم می‌باشد.

مواد و روش‌ها

جهت ارزیابی تأثیر دو گونه قارچ مایکوریزا بر روی گیاه گشنیز در حضور سطوح مختلف فلز سنگین کادمیوم آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با 2 فاکتور و در 3 تکرار در گلخانه گروه علوم باغبانی (دمای 25 ± 3 و 18 ± 2 درجه سانتی‌گراد به ترتیب در روز و شب و میانگین رطوبت نسبی گلخانه 60 تا 80 درصد) دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد. فاکتور اول کاربرد نیترات کادمیوم در 4 سطح 0، 20، 40، 80 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک (به ترتیب معادل 0، 0/002، 0/004، 0/008 درصد کادمیوم می‌باشد) که این سطوح بر پایه پژوهش‌های پیشین انتخاب شد (تیریزی و همکاران، 1394؛ محمدی و همکاران، 1392؛ برین و همکاران، 1394؛ علیلو و همکاران، 1395). فاکتور دوم قارچ‌های آربوسکولار مایکوریزا (تهیه شده از شرکت زیست فناوری توران) در 3 سطح بدون تلقیح قارچ و با تلقیح قارچ‌های *Rhizophagus* و *Funnetiformis mosseae*

برگ، ساقه و ریشه با استفاده از ترازویی با دقت 0/001 اندازه‌گیری شد. سپس برای تعیین وزن خشک، نمونه‌ها به مدت 48 ساعت به آون با دمای 70 درجه سانتی‌گراد منتقل و سپس وزن خشک اندازه‌گیری گردید.

اندازه‌گیری شاخص پایداری غشاء

برای ارزیابی این صفت از روش سیارام و سریواستوا (2002) استفاده و از طریق فرمول زیر محاسبه شد. به این منظور برگ‌های بالغ را در ظروف شیشه‌ای به مدت 24 ساعت در دمای محیط قرار داده، سپس میزان هدایت الکتریکی محلول همراه با نمونه اندازه‌گیری شد. آنگاه نمونه‌ها را به مدت یک ساعت در دمای 100 درجه قرار داده و میزان هدایت الکتریکی نمونه‌ها را با دستگاه هدایت سنج (EC متر) اندازه‌گیری شد.

$$MSI = [1 - (C1/C2)] \times 100$$

C1 و C2 به ترتیب نشان دهنده میزان هدایت الکتریکی نمونه‌ها در دمای شاهد و 100 درجه سانتی‌گراد.

اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ (RWC)

جهت اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ، نمونه‌هایی از برگ کامل تهیه و وزن‌تر آنها اندازه‌گیری شد. این قطعات به منظور تعیین وزن تورژسانس به مدت 24 ساعت در شدت نور کم و در داخل آب مقطر قرار داده شده و پس از این زمان وزن تورژسانس نمونه قرائت شد. نمونه‌ها را به مدت 48 ساعت درون آون با دمای 75 درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و در پایان وزن خشک آنها نیز اندازه‌گیری و از طریق رابطه زیر محاسبه شد (گولم و همکاران، 2002).

$$RWC = \frac{[(وزن خشک - وزن تورژسانس) / (وزن خشک - وزن تر)] \times 100}{\%}$$

درصد کلونیزاسیون

جهت رنگ آمیزی ریشه از روش فلیپس و هایمن (1970) و برای تعیین درصد کلونیزاسیون از روش تلاقی خطوط مشبک استفاده گردید (دالپ، 1993).

اندازه‌گیری درصد نیتروژن، فسفر و پتاسیم اندام گیاهی

درصد نیتروژن در نمونه با استفاده از روش ماکروکجدال (مدل v40 شرکت بخشی)، فسفر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل Jenway6320D - ساخت انگلیس) و میزان پتاسیم موجود در نمونه گیاهی نیز توسط دستگاه فلیم‌فتومتر (JENWAY PFP7 - ساخت انگلیس) تعیین گردید (امامی، 1375).

intraradices (200 گرم به خاک هر گلدان) بود. خاک مورد استفاده در گلدان‌ها شامل خاک زراعی، خاک‌برگ و ماسه به نسبت 1:1:1 بود (جدول 1). قبل از کاشت گیاه سطوح مختلف نیترات کادمیوم و گونه‌های قارچ مایکوریزا به خاک مورد نظر اضافه گردید. نحوه آماده-سازی تیمارهای حاوی فلز سنگین نیترات کادمیوم به این صورت بود که غلظت‌های مشخص را در یک لیتر آب مقطر برای حجم خاک یک گلدان (15 کیلوگرم) حل کرده و بر روی خاکی که بر روی پلاستیک به ضخامت 1 یا 2 سانتی‌متر پهن شده بود، اسپری گردید. به منظور مشابه بودن شرایط آلودگی به شرایط طبیعی، نمونه‌های تیمار شده تا حد ظرفیت زراعی، مرطوب و به مدت 15 روز در این شرایط نگهداشته شدند. نیتروژن اضافه شده به خاک توسط نمک نیترات کادمیوم، با اضافه کردن مقادیر محاسبه شده با استفاده از اوره به تیمارهای مختلف اصلاح شد. پس از اعمال تیمارها، خاک (به منظور مشابه بودن به شرایط طبیعی از خاک غیر استریل استفاده شد) به درون گلدان‌ها ریخته شد، بذرها به‌طور مستقیم در گلدان‌ها کشت شدند. پس از استقرار گیاهان، تنک کردن در مرحله 4-6 برگی انجام و تعداد بوته‌ها به 8 عدد در سطح هر گلدان (در گلدان‌های با قطر دهانه 30 و ارتفاع 40 سانتی‌متر) رسانده شد. در طول دوره رشد گیاهان کلیه اعمال زراعی شامل آبیاری (بر اساس نیاز گیاه و هر 2 روز یک بار در حد ظرفیت زراعی انجام شد) و دفع علف‌های هرز به‌طور یکنواخت در بین تیمارها صورت گرفت. اندازه‌گیری تمامی صفات در مرحله گلدهی صورت گرفت. صفات مورد بررسی شامل خصوصیات رشدی، شاخص پایداری غشاء، محتوای رطوبت نسبی آب برگ، درصد کلونیزاسیون و میزان جذب عناصر (نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کادمیوم، منیزیم، روی، کلسیم و آهن) بود.

خصوصیات رشدی

صفات مورد ارزیابی شامل ارتفاع بوته، طول شاخه‌فرعی، تعداد شاخه‌فرعی، تعداد برگ، تعداد برگ شاخه‌فرعی، تعداد گره، فاصله میان‌گره، طول و عرض برگ، قطر ساقه و ریشه، طول ریشه، وزن تر و خشک برگ، ساقه و ریشه بود که در مرحله گلدهی و پس از برداشت گیاهان (انتخاب 3 بوته به طور تصادفی در هر گلدان) اندازه‌گیری شد. صفات رشدی ذکر شده با استفاده از روش‌های رایج اندازه‌گیری گردید. ارتفاع، طول شاخه-فرعی، طول و عرض برگ، طول میان‌گره، و طول ریشه با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شد. قطر ساقه با استفاده از کولیس دیجیتال (مدل Guanglu) اندازه‌گیری شد. وزن‌تر

اندازه‌گیری منیزیم، کلسیم، کادمیوم، آهن و روی جهت اندازه‌گیری غلظت این عناصر، پس از کالیبراسیون دستگاه توسط استانداردهای لازم، عصاره نمونه با دستگاه ICP (مدل ICP-OES) اندازه‌گیری شد.

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار Minitab17 استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون Bonferroni انجام شد. همچنین برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel 2016 استفاده شد.

جدول 1- آنالیز خاک مورد استفاده در آزمایش

بافت Texture	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	مواد آلی (%)	کربن آلی (%)	EC (ds/m)	pH	CEC (meq/100 gr soil)
لومی- شنی	8.5	19.3	72.1	1.4	0.83	3.21	7.7	7.9
N	P (P ₂ O ₅) (mg/kg)	K ₂ (K ₂ O) (mg/kg)	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)				
0.1	15	194	18.4	4.8				

نتایج و بحث

خصوصیات رشدی

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد (جدول 2) که اثر متقابل قارچ‌های مایکوریزا و فلز سنگین کادمیوم بر روی اکثر صفات رشدی بررسی شده در گیاه گشنیز در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0/01$) معنی‌دار شد. با افزایش غلظت کادمیوم در خاک صفات رشدی گشنیز کاهش پیدا کرد. بر اساس نتایج کمترین مقدار صفات از جمله ارتفاع گیاه (31/55 سانتی‌متر)، تعداد برگ (6 عدد)، طول برگ (22/8 میلی‌متر) و عرض برگ (22/4 میلی‌متر)، طول ریشه (63/2 سانتی‌متر)، قطر ساقه (1/8 میلی‌متر) و ریشه (0/99 میلی‌متر)، وزن تر برگ (2/19 گرم در گیاه)، وزن خشک برگ (0/31 گرم در گیاه)، وزن تر ساقه (2/52 گرم در گیاه)، وزن خشک ساقه (0/53 گرم در گیاه)، وزن تر ریشه (0/12 گرم در گیاه)، وزن خشک ریشه (0/1 گرم در گیاه)، تعداد شاخه‌فرعی (1/44 عدد)، طول شاخه‌فرعی (5/5 سانتی‌متر)، تعداد میانگره (6/4 عدد) و طول میانگره (6/4 سانتی‌متر) در تیمار عدم تلقیح با قارچ مایکوریزا و غلظت 80 میلی‌گرم بر کیلوگرم نیترات کادمیوم خاک به دست آمد. در حالی که مایه‌زنی با قارچ‌های آربوسکولار مایکوریزا موجب بهبود صفات رشدی گیاه شد. به طوری که بالاترین مقدار صفات مذکور در تیمار تلقیح با قارچ مایکوریزا به دست آمد. قارچ *Funnetiformis mosseae* توانست ارتفاع گیاه (67 درصد)، تعداد برگ (38/83 درصد)، وزن تر برگ (41 درصد)، وزن خشک برگ (77/41 درصد)، وزن تر ریشه (41/67 درصد)، طول ریشه (25/13 درصد)، قطر ریشه

(51/51 درصد) را در بالاترین سطح تنش کادمیوم افزایش دهد. نتایج این پژوهش با پژوهش سایر محققین که بر روی گیاهانی از جمله رزماری (تبریزی و همکاران، 1394) و همیشه‌بهار (محمدی و همکاران، 1392) که در شرایط آلودگی با فلزات سنگین سرب و کادمیوم و مایه‌زنی با قارچ‌های *Funnetiformis mosseae* و *Rhizophagus intraradices* و همچنین با پژوهشی که بر روی گیاه سیاهدانه (شمشیرگران و همکاران، 1395) در شرایط آلودگی با کادمیوم و مایه‌زنی با قارچ *Rhizophagus intraradices* صورت گرفت کاملاً همخوانی دارد. غلظت بالای کادمیوم در خاک و جذب آن باعث کاهش فرایند متابولیسم و فتوسنتز در گیاه می‌شود که در مجموع کاهش رشد و عملکرد گیاه را به دنبال خواهد داشت (خان و همکاران، 2006). قارچ‌های مایکوریزا با بهبود جذب آب و عناصر غذایی (کیورکو و همکاران، 2014) باعث مقاومت گیاه در مقابل تنش‌های زنده (پاتوژن‌ها) و غیرزنده (خشکی، شوری، فلزات سنگین) می‌شوند (شرمیلا و همکاران، 2017). این نتایج حاکی از این بود که مایه‌زنی قارچ مایکوریزا توانسته اثرات مخرب کادمیوم را در گیاه گشنیز کاهش دهد.

شاخص پایداری غشاء

با افزایش سطح کادمیوم خاک، شاخص پایداری غشاء به طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول 4). با مشاهده جدول مقایسه میانگین (جدول 5) بیشترین میزان شاخص پایداری غشاء (78/3 درصد) مربوط به تیمار عدم آلودگی با کادمیوم و مایه‌زنی قارچ مایکوریزا بود. در حالی که کمترین مقدار (52/29 درصد) آن در بالاترین

سیستم ریشه‌ای گیاه، باعث بهبود جذب آب و ظرفیت نگهداری آب در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین می‌شوند (ژانگ و همکاران، 2010) که در نتیجه موجب بهبود محتوای نسبی آب برگ می‌شوند.

درصد کلونیزاسیون

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد (جدول 4) که تیمار سطوح مختلف فلز سنگین و قارچ‌های میکوریزا به صورت معنی‌داری درصد کلونیزاسیون گشنیز را تحت تأثیر قرار دادند. در حضور فلز سنگین کادمیوم میزان همزیستی در گیاه کاهش پیدا کرد به طوری که کمترین میزان درصد کلونیزاسیون در تیمار 80 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نترات کادمیوم و عدم کاربرد قارچ میکوریزا مشاهده گردید. در پژوهشی که بر روی گیاه آفتاب‌گردان (دانش‌فر، 1397) در شرایط آلودگی با فلز سنگین سرب و همزیستی با قارچ میکوریزا صورت گرفت نتایج نشان داد که با افزایش غلظت فلز سنگین میزان درصد کلونیزاسیون کاهش پیدا کرد، که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد. فلزات سنگین رشد و توسعه گیاه را تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش طول ریشه می‌شوند (نیکولیک و همکاران، 2008) که می‌تواند یکی از دلایل کاهش درصد کلونیزاسیون در این پژوهش باشد.

نیترژن

نتایج حاصل از آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر سطوح مختلف کادمیوم و گونه‌های قارچ میکوریزا و اثرات متقابل آن‌ها بر میزان نیترژن برگ گشنیز در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار گردید (جدول 4). مقایسه میانگین (جدول 4) اثرات متقابل کادمیوم و قارچ میکوریزا نشان داد میزان نیترژن در تیمارهای میکوریزایی و شاهد با افزایش غلظت کادمیوم روند کاهشی داشت با این تفاوت که این روند کاهشی در گیاهان غیرهمزیست به مراتب بیشتر بود. کمترین میزان نیترژن بدست آمده در تیمار 80 میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک نترات کادمیوم و عدم تلقیح با قارچ میکوریزا به میزان 2/5 درصد بود و بیشترین مقدار آن مربوط به تیمار 20 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نترات کادمیوم و مایه‌زنی قارچ میکوریزا *Funnetiformis mosseae* به میزان 3/1 درصد مشاهده شد که در مقایسه با قارچ *Rhizophagus intraradices* در همین سطح تنش (20 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نترات کادمیوم) در جذب نیترژن مؤثرتر بود. در پژوهشی که بر روی گیاه ریحان (اصغری‌پور و

سطح تنش مشاهده شد، اما قارچ میکوریزا نتوانست تأثیری در بهبود این صفت در این سطح از تنش داشته باشد. اما در سطح سوم آلودگی کادمیوم (40 میلی‌گرم بر کیلوگرم نترات کادمیوم) قارچ‌های میکوریزا باعث بهبود پایداری غشاء در مقایسه با شاهد شدند. در غلظت بالای فلزات سنگین همزیستی میکوریزایی کاهش پیدا می‌کند (چن و همکاران، 2004). یکی دیگر از آسیب‌های که فلزات سنگین به گیاه وارد می‌کند را می‌توان تخریب ساختار غشاء به علت پراکسیداسیون لیپیدی نام برد (میشرا و اگراول، 2009). غلظت بالای کادمیوم منجر به افزایش نشت یونی می‌شود، که به دنبال آن تخریب غشای سلول گیاهان را به دنبال خواهد داشت (کائور و همکاران، 2016) و همین امر می‌تواند دلیلی بر کاهش شاخص پایداری غشاء در این تحقیق باشد. در این پژوهش قارچ *Funnetiformis mosseae* با افزایش 24 درصدی پایداری نقش موثرتری در مقابل با قارچ *Rhizophagus intraradices* ایفاء کرد. در پژوهشی که بر روی گیاه نعنای فلفلی صورت گرفت، نتایج حاکی از این بود که همزیستی با قارچ باعث بهبود پایداری غشاء در این گیاه شد (پیردشتی و همکاران، 1396) که با نتایج حاصل از این تحقیق مطابقت دارد. قارچ‌های میکوریزا از طریق کلات کردن فلزات سنگین در میسلیم‌های خارجی باعث افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش فلزات سنگین می‌شوند (ذولفقاری و همکاران، 2015).

محتوای نسبی آب برگ (RWC)

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر سطوح مختلف کادمیوم و قارچ میکوریزا بر محتوای نسبی آب برگ گشنیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول 4). مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارها نشان داد که با افزایش سطح کادمیوم خاک، محتوای نسبی آب برگ گشنیز به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد؛ بطوری که افزایش آن در گیاهان تلقیح شده با قارچ بیشتر از گیاهان تلقیح نشده با قارچ بود. بیشترین محتوای نسبی آب برگ (65/92 درصد) در سطح 80 میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک نترات کادمیوم و مایه‌زنی قارچ *Rhizophagus intraradices* مشاهده شد، هرچند از نظر آماری اختلاف معنی‌داری بین تیمارها در این سطح مشاهده نشد. نتایج این پژوهش با نتایج سایر محققین که بر روی گیاهان آفتاب‌گردان (شیرمردی و همکاران، 1389)، گل گندم (برین و همکاران، 1394) و لوبیا سبز (محمد خانی و همکاران، 1393) صورت گرفت کاملاً همخوانی دارد. مطالعات نشان داده است که قارچ‌های میکوریزا باعث کاهش تولید اتیلن شده و با توسعه

جدول 2- نتایج تجزیه واریانس تأثیر قارچ‌های میکوریزا بر خصوصیات رشدی گشنیز تحت تنش کادمیوم

میانگین مربعات																
منابع تغییرات	درجه آزادی	ارتفاع بوته	طول شاخه جانبی	تعداد شاخه جانبی	طول میانگره	تعداد میانگره	تعداد برگ	عرض برگ	وزن برگ	وزن خشک برگ	قطر ساقه	طول ریشه	قطر ریشه	وزن تر ساقه	وزن خشک ساقه	وزن تر ریشه
کادمیوم	3	1446/09	92/60	9/11	15/58	10/93	12/22	8/92	30/45	0/55	0/26	405/64	0/45**	15/62	0/91	0/034**
مایکوریزا	2	342/40	15/02	3/37	2/009	4/45	11/37	5/03	6/61	0/18	1/38	341/52	0/15**	2/75	0/16	0/038**
کادمیوم × مایکوریزا	6	52/80**	0/92**	1/40**	0/59**	0/97**	0/41**	0/15*	0/49**	0/01**	0/01**	18/29**	0/04**	0/37**	0/02**	0/004**
خطا	24	0/51	0/07	0/67	0/04	0/18	0/10	0/05	0/04	0/07	0/0009	0/56	0/001	0/02	0/004	0/0009

ns، * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

جدول 3- مقایسه میانگین تأثیر قارچ‌های میکوریزا بر خصوصیات رشدی گشنیز تحت تنش کادمیوم

کادمیوم (میلی گرم بر کیلوگرم)	مایکوریزا	ارتفاع (سانتی متر)	طول شاخه جانبی (سانتی متر)	تعداد شاخه جانبی	طول میانگره (سانتی متر)	تعداد میانگره	تعداد برگ	عرض برگ شاخه فرعی (میلی متر)	طول برگ (میلی متر)	عرض برگ (میلی متر)	وزن برگ (گرم)	وزن خشک برگ (گرم)	قطر ساقه (میلی متر)	طول ریشه (سانتی متر)	قطر ریشه (میلی متر)
0	0	69/73 ^c	11/66 ^c	5/22 ^{a-c}	10/56 ^a	8/89 ^c	9/56 ^{bc}	5/67 ^{a-c}	26/23 ^b	25/05 ^b	5/99 ^{bc}	0/86 ^{bc}	83/60 ^{cd}	2/32 ^f	1/80 ^{ab}
20	1	76/23 ^a	14/96 ^a	5/78 ^a	10/56 ^a	9/89 ^{a-c}	10/78 ^a	5/33 ^{b-d}	27/99 ^a	26/17 ^a	8/82 ^a	1/23 ^a	92/11 ^a	2/82 ^a	1/88 ^a
40	2	73/28 ^b	14/50 ^a	5/66 ^{ab}	10/44 ^a	9/89 ^{a-c}	10/33 ^{ab}	5/44 ^{a-d}	27/74 ^a	26/12 ^a	6/60 ^b	0/91 ^b	91/13 ^a	2/77 ^a	1/86 ^a
80	0	66/20 ^d	10/24 ^d	4/89 ^{b-d}	10/00 ^{abc}	10/33 ^{ab}	8/72 ^{cd}	5/11 ^{cd}	25/97 ^b	24/23 ^{cd}	5/52 ^{d-f}	0/64 ^{de}	82/24 ^d	2/14 ^g	1/66 ^{c-e}
	1	72/67 ^b	12/86 ^b	5/22 ^{a-c}	10/44 ^a	10/56 ^a	10/22 ^{ab}	6/22 ^a	26/34 ^b	25/26 ^b	5/70 ^{b-d}	0/87 ^{bc}	88/46 ^b	2/73 ^{ab}	1/76 ^{a-c}
	2	70/13 ^c	12/12 ^{bc}	5/00 ^{a-d}	10/22 ^{ab}	10/44 ^{ab}	9/67 ^{bc}	6/11 ^{ab}	25/94 ^b	24/727 ^{bc}	5/07 ^{c-e}	0/76 ^{cd}	88/10 ^b	2/65 ^{bc}	1/71 ^{b-d}
	0	57/80 ^f	9/34 ^e	4/67 ^{c-e}	8/89 ^d	9/89 ^{a-c}	7/67 ^e	4/67 ^{de}	23/34 ^{de}	23/40 ^e	3/41 ^{f-h}	0/46 ^{fg}	77/54 ^e	2/00 ^h	1/48 ^g
	1	67/33 ^d	10/76 ^d	5/00 ^{a-d}	9/78 ^{bc}	10/56 ^a	10/00 ^{ab}	6/00 ^{ab}	24/98 ^c	24/51 ^{b-d}	4/44 ^{d-g}	0/60 ^{ef}	84/97 ^c	2/62 ^c	1/61 ^{d-f}
	2	63/00 ^e	10/37 ^d	4/78 ^{c-e}	9/56 ^c	10/44 ^{ab}	9/67 ^{bc}	5/33 ^{b-d}	24/87 ^c	24/24 ^{cd}	4/03 ^{e-g}	0/63 ^{de}	84/78 ^c	2/57 ^{cd}	1/58 ^{e-g}
	0	31/55 ⁱ	5/46 ^g	1/44 ^f	6/44 ^f	6/44 ^d	6/00 ^f	2/00 ^g	22/77 ^c	22/41 ^f	2/19 ^h	0/31 ^h	63/23 ^f	1/76 ⁱ	0/99 ^h
	1	52/78 ^g	6/65 ^f	4/22 ^{de}	8/22 ^e	9/11 ^{bc}	8/33 ^{de}	4/11 ^{ef}	23/67 ^d	24/04 ^{c-e}	3/10 ^{gh}	0/55 ^{e-g}	79/12 ^e	2/52 ^d	1/50 ^{fg}
	2	49/67 ^h	6/33 ^f	4/00 ^e	8/11 ^e	8/56 ^c	8/11 ^{de}	3/78 ^f	23/72 ^d	23/94 ^{de}	3/18 ^{f-h}	0/44 ^{gh}	78/35 ^e	2/42 ^e	1/49 ^{fg}

⁰، ¹ و ²: به ترتیب نشان دهنده عدم تلقیح، تلقیح *Funnetiformis mosseae* و تلقیح با *Rhizophagus intraradice*.

فسفر را کاهش می‌دهد (اکای و همکاران، 2007). قارچ میکوریزا با تولید آنزیم فسفاتاز، فسفات تثبیت شده در خاک را به شکل قابل جذب برای گیاه تبدیل می‌کند (سانگ، 2005). همچنین قارچ‌های میکوریزا با مکانسیم‌هایی از جمله کلات کردن فلزات سنگین، تغییر pH ریزوسفر، جذب آب و عناصر غذایی کم تحرک از جمله فسفر سبب افزایش مقاومت و رشد گیاه در مواجهه با تنش‌های محیطی از جمله فلزات سنگین می‌شوند (کریمی و همکاران، 2011).

پتاسیم

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول 4) نشان می‌دهد که تأثیر مایه‌زنی قارچ میکوریزا (در سطح احتمال یک درصد) و کادمیوم (در سطح احتمال پنج درصد) بر غلظت عنصر پتاسیم برگ گشسینز معنی‌دار شد؛ اما اثرات متقابل آنها بر این صفت معنی‌داری نداشت. بیشترین غلظت پتاسیم در گیاهان تیمار شده با قارچ *Funnnetiformis mosseae* به مقدار 5/8 درصد بود که نسبت به شاهد به میزان 27/3 درصد افزایش داشت. با افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک از غلظت این عنصر در گیاه کاسته شد. کمترین درصد پتاسیم (4/78) در تیمار 80 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیتروژن کادمیوم بود. در پژوهش‌هایی که بر روی گیاه انیسون (یوسفی‌راد و همکاران، 1394) و خارمریم (سیروس‌مهر و همکاران، 1396) در شرایط تلقیح با میکوریزا صورت گرفت، نتایج نشان داد که قارچ میکوریزا توانسته باعث افزایش میزان پتاسیم برگ گیاه نسبت به تیمار شاهد شود که با نتایج این پژوهش در یک‌راستا می‌باشد. قارچ‌های میکوریزا می‌توانند به بهبود تغذیه‌ای از جمله افزایش غلظت پتاسیم در گیاه کمک کنند (همر و همکاران، 2011).

کلسیم

مقایسه میانگین اثرات متقابل کادمیوم و قارچ میکوریزا نشان داد (جدول 4) که با افزایش غلظت کادمیوم در حضور قارچ‌های میکوریزا غلظت این عنصر در اندام هوایی گیاه نسبت به تیمارهای عدم تلقیح قارچ به طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد به طوری که بالاترین مقدار آن (2/92 درصد) در تیمار شاهد و مایه‌زنی قارچ *Funnnetiformis mosseae* بدست آمد؛ که در مقایسه با قارچ *Rhizophagus intraradices* مؤفق‌تر در جذب کلسیم عمل کرد. در سطوح ۴۰، ۲۰ و ۸۰ (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک نیتروژن کادمیوم) تفاوت معنی‌داری بین دو قارچ مشاهده نشد. در حالی که کمترین مقدار (1/5 درصد) آن در تیمار 80 میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک نیتروژن کادمیوم و بدون تلقیح قارچ میکوریزا مشاهده گردید که

همکاران، 1395) و تریچه (جایاکوماری و همکاران، 2007) که به ترتیب در شرایط فلزات سنگین سرب و کبالت صورت گرفت نتایج نشان داد که با افزایش غلظت فلز سنگین از میزان غلظت نیتروژن در اندام هوایی این گیاهان کاسته شد که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد که علت این کاهش در غلظت نیتروژن این است که فلز سنگین کادمیوم می‌تواند در متابولیسم نیتروژن و پروتئین اختلال ایجاد کند (بور و همکاران، 2000). علت افزایش میزان نیتروژن در گیاهان تیمار شده با قارچ میکوریزا می‌تواند این امر باشد که مسیلیوم‌های خارجی (هیفاها) قارچ آربوسکولار در سطح خاک گسترده شده و جذب نیتروژن را برای گیاه فراهم می‌کنند (هاوکیوز و جورج، 2001). قارچ‌های میکوریزا همچنین با اسیدی کردن خاک‌های ناحیه ریزوسفر ریشه گیاه به جذب NH_4^+ حتی در شرایطی که NH_4^+ شکل غالب N در محیط نیست، نقش بسزایی دارند (نیومان و ایخارد، 2010). در پژوهشی که بر روی گیاه کاهو (اسماعیل‌پور و امانی، 1397) در شرایط هم‌زیستی با میکوریزا صورت گرفت، نتایج بیانگر این بود که تلقیح با میکوریزا باعث افزایش معنی‌داری میزان نیتروژن در برگ نسبت به تیمار عدم تلقیح شد که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.

فسفر

تأثیر کادمیوم و قارچ‌های میکوریزا و اثرات متقابل آنها بر میزان فسفر برگ گشسینز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول 4). غلظت فسفر در تیمارهای هم‌زیست با میکوریزا به مراتب بالاتر از تیمارهای غیرهم‌زیست بود، به طوری که کمترین مقدار فسفر در تیمار 80 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیتروژن کادمیوم و بدون اعمال قارچ میکوریزا مشاهده شد. با توجه به نتایج جدول (جدول 4) مقایسه میانگین غلظت فسفر در تیمار شاهد از 0/101 درصد به 0/075 درصد در تیمار 80 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیتروژن کادمیوم رسید که معادل 1/34 برابر کاهش پیدا کرد. در بالاترین سطح تنش (80 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیتروژن کادمیوم) تفاوت معنی‌داری بین دو گونه قارچ میکوریزا بر جذب فسفر مشاهده نگردید. نتایج این تحقیق با تحقیقی که بر روی گیاه جعفری زینتی (شکری و همکاران، 1395) در شرایط تنش فلز سنگین کادمیوم و هم‌زیستی قارچ‌های میکوریزا صورت گرفت مطابقت داشت. این امر با اثر فلزات سنگین بر کاهش تثبیت فسفر و حلالیت آن به اثبات می‌رسد (کانگ و همکاران، 2002). علاوه بر این انرژی مورد نیاز برای جذب فعال فسفر توسط ATP فراهم می‌گردد و کادمیوم با تأثیر منفی بر تولید آن، جذب

با نتایج آزمایشی که بر روی گیاه ریحان (صغری‌پور و همکاران، 1395) صورت گرفت همخوانی دارد. در پژوهشی که بر روی گیاه کاهو (کانترل و همکاران، 2001) صورت گرفت، نتایج حاکی از این بود که در حضور قارچ مایکوریزا جذب کلسیم در گیاهان تلقیح شده به مراتب بالاتر از گیاهان تلقیح نشده بود. بین دو عنصر کلسیم و کادمیوم اثرات آنتاگونیستی وجود دارد (بات و همکاران، 2014). کلسیم در ساخت دیواره سلولی و در فعال‌سازی آنزیم‌ها و بویژه در تقسیم و طولیل شدن سلول‌ها نقش بسزایی دارد؛ به طوری که بدون حضور کلسیم بافت‌های مریستمی از رشد کافی برخوردار نمی‌شوند و در نتیجه رشد ریشه محدود می‌شود (سالاردینی، 1387).

منیزیم

آنالیز آماری نشان داد که اثرات متقابل تیمارها و اثر ساده کادمیوم بر غلظت عنصر منیزیم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول 4). با افزایش غلظت کادمیوم در خاک غلظت این عنصر در گیاه به طور معنی‌داری کاهش یافت، در حالی که بین تیمار شاهد و بالاترین سطح کادمیوم (80 میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم) در شرایط عدم تلقیح با قارچ مایکوریزا به میزان 19/77 درصد کاهش مشاهده گردید. بالاترین جذب منیزیم در حضور قارچ *Funnetiformis mosseae* و سطح 20 میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم مشاهده گردید. در مابقی سطوح تنش (80، 40، 0 میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم) از نظر آماری تفاوت معنی‌داری بین دو گونه قارچ مایکوریزا مشاهده نشد. در تحقیقاتی که بر روی گیاه ریحان (صغری‌پور و همکاران، 1395) و شاهی (اسدی کرم، 1395) که به ترتیب در شرایط تنش فلزات سنگین سرب و مس انجام شدند؛ نتایج بیانگر این بود که با افزایش سطح تنش میزان منیزیم در اندام هوایی گیاه کاهش پیدا کرد. نتایج نشان داد که قارچ مایکوریزا توانسته اثر مثبتی بر غلظت منیزیم در گیاه داشته باشد. در همین راستا تحقیقی که بر روی گیاه بادرنجبویه (عباس‌زاده و ذاکریان، 1393) در شرایط همزیستی با قارچ‌های مایکوریزا *Funnetiformis mosseae* و *Rhizophagus intraradices* صورت گرفت، بیانگر این بود که قارچ مایکوریزا توانست اثر معنی‌داری بر غلظت این عنصر داشته باشد که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد.

روی و آهن

همانطور که در جدول 4 نشان داده شده است، اثر عوامل کادمیوم و قارچ مایکوریزا و اثرات متقابل آنها

بر روی غلظت عناصر روی و آهن در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید. مقایسه میانگین داده‌ها (جدول 4) نشان داد که با افزایش سطح کادمیوم غلظت این عناصر در تمامی تیمارها به طور معنی‌داری کاهش یافت. بیشترین غلظت عنصر روی در تیمار بدون آلودگی کادمیوم (سطح صفر) و حضور قارچ *Rhizophagus intraradices* به مقدار 121 میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. غلظت عنصر آهن در تیمار 80 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم در مقایسه با تیمار شاهد با کاهش 42/1 درصدی همراه بود. در بالاترین سطح کادمیوم (80 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم) تفاوت معنی‌داری بین دو سطح قارچ مایکوریزا بر غلظت این دو عنصر مشاهده نشد. محققین به این مطلب پی بردند که بین کادمیوم و عناصر کم مصرفی مثل آهن و روی رقابتی بر سر انتقال از طریق پروتئین سلول‌های ناقل موجود در غشای سلولی برقرار است (شارما و همکاران، 2008). به دلیل تأثیرات آنتاگونیستی که بین دو عنصر کادمیوم و آهن موجود است (ونگ و همکاران، 1984)، می‌توان آن را یکی از دلایل کاهش غلظت آهن در حضور کادمیوم در این پژوهش دانست. قارچ‌های مایکوریزا با ایجاد همزیستی با ریشه گیاهان باعث بهبود جذب عناصر کم مصرف مانند روی و آهن می‌شوند (سایا و همکاران، 2012). همچنین با ترشح سیدروفورها کمک به جذب آهن و کاهش سمیت فلزات سنگین در گیاهان می‌شوند (میشر و همکاران، 2016). نتایج این تحقیق با سایر تحقیقاتی که بر روی گیاهانی از جمله بنگ دانه (خداوردیلو و همکاران، 1396)، خارزن‌بابا (علیلو و همکاران، 1395) کاملاً همخوانی دارد.

کادمیوم

با افزایش غلظت کادمیوم در خاک، غلظت این عنصر در اندام هوایی گیاه افزایش پیدا کرد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد (جدول 4) که اثر متقابل کادمیوم و قارچ مایکوریزا در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید. غلظت این عنصر هم در تیمارهای مایکوریزا و هم در تیمار شاهد با افزایش سطح کادمیوم روندی افزایشی داشت. به این صورت که در تیمار شاهد میانگین غلظت کادمیوم در اندام هوایی از 0/33 میلی‌گرم بر کیلوگرم به 30/2 میلی‌گرم بر کیلوگرم در سطح 80 میلی‌گرم در کیلوگرم نیترات کادمیوم رسید. نتایج نشان داد که قارچ‌های مایکوریزا توانستند در بالاترین سطح آلودگی (80 میلی‌گرم در کیلوگرم نیترات کادمیوم)، باعث کاهش چشمگیر غلظت کادمیوم در اندام هوایی گیاه شوند. با توجه به نتایج این تحقیق قارچ *Rhizophagus*

کادمیوم (80 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم) کمترین مقادیر برای این صفات به‌دست آمد؛ ولی با افزودن کادمیوم به خاک باعث افزایش محتوای نسبی آب برگ و غلظت عنصر کادمیوم در برگ گیاه گشنیز شد. نتایج این تحقیق نشان داد که همزیستی با قارچ‌های میکوریزا بر روی خصوصیات رشدی، بیوشیمیایی و غلظت عناصر در گیاه گشنیز تأثیر چشمگیری داشت و تغییرات معنی‌داری در تمامی صفات مورد بررسی ایجاد کرد و باعث ایجاد مقاومت در گیاه در برابر فلز سنگین کادمیوم شدند. قارچ *Funnetiformis mosseae* بر روی صفات رشدی تأثیر بهتری نسبت به قارچ *Rhizophagus intraradices* داشت. قارچ‌های میکوریزا توانستند به طور معنی‌داری باعث بهبود جذب عناصر غذایی در شرایط تنش کادمیوم در گیاه گشنیز شوند. با توجه به نتایج این تحقیق قارچ *Rhizophagus intraradices* بیشترین کارایی را در کاهش سمیت کادمیوم داشت؛ ولی در جذب سایر عناصر غذایی تفاوت معنی‌داری بین دو گونه قارچ مشاهده نشد. در نهایت طبق نتایج این پژوهش تلقیح با قارچ‌های میکوریزا جهت بهبود رشد گیاه گشنیز در شرایط آلودگی با فلز سنگین کادمیوم توصیه می‌گردد.

intraradices نقش مؤثرتری در کاهش حضور فلز سنگین کادمیوم در اندام هوایی گیاه گشنیز در مقایسه با قارچ *Funnetiformis mosseae* ایفا کرد. در پژوهشی که بر روی گیاه تنباکو (جانسونکوا همکاران، 2005) در شرایط آلودگی با فلز سنگین کادمیوم و مایه‌زنی با قارچ *Rhizophagus intraradices* صورت گرفت، نتایج نشان که قارچ میکوریزا توانست غلظت این عنصر را در اندام هوایی گیاه کاهش دهد. سمیت فلزات سنگین در محیط به غلظت آن در محلول خاک بستگی دارد. مقدار کادمیوم در گیاهان رشد کرده در خاک‌های آلوده، به غلظت کل کادمیوم موجود در خاک وابسته است (آلوی، 2001).

نتیجه‌گیری

فلزات سنگین را می‌توان یکی از آلاینده‌های اکوسیستم نام برد که به دلیل اثرات فیزیولوژیکی خاص خود بر روی موجودات زنده حتی در غلظت‌های پایین هم از اهمیت بالایی برخوردار هستند. با توجه به نتایج به دست آمده، با افزایش سطح کادمیوم در خاک، خصوصیات رشدی گیاه، شاخص پایداری غشاء، درصد کلونیزاسیون و نیز جذب عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم، کلسیم، آهن و روی در برگ گیاه گشنیز به طور معنی‌داری کاهش یافت، به‌طوری‌که در بالاترین سطح

جدول 4- نتایج تجزیه واریانس تأثیر قارچ‌های مایکوریزا بر محتوی نسبی آب برگ، شاخص پایداری غشاء، درصد همزیستی و غلظت عناصر گشسینز تحت تنش کادمیوم

میانگین مربعات

منابع تغییرات	درجه آزادی	محتوای نسبی آب برگ	شاخص پایداری غشاء	درصد کلونیزاسیون	غلظت نیتروژن (درصد)	غلظت فسفر (درصد)	غلظت پتاسیم (درصد)	غلظت کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	غلظت کلسیم (درصد)	غلظت منیزیم (درصد)	غلظت روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	غلظت آهن (میلی‌گرم بر کیلوگرم)
کادمیوم	3	49/40 ^{**}	1140/26 ^{**}	2901/88 ^{**}	0/281 ^{**}	0/0017 ^{**}	2/15 [*]	620/21 ^{**}	0/876 ^{**}	0/063 ^{**}	1464/57 ^{**}	168038 ^{**}
مایکوریزا	2	9/20 ^{**}	25/10 ^{**}	4644/11 ^{**}	0/093 ^{**}	0/0004 ^{**}	5/25 ^{**}	51/73 ^{**}	0/266 ^{**}	/006 [*]	162/47 [*]	22345 [*]
کادمیوم × مایکوریزا	6	1/49 ^{**}	68/56 ^{**}	229/52 ^{**}	0/021 [*]	0/0002 ^{**}	0/62 ^{ns}	48/07 ^{**}	0/143 [*]	0/007 ^{**}	309/11 ^{**}	36867 ^{**}
خطا	24	0/44	0/09	4/11	0/007	0/00005	0/556	3/86	0/042	0/0015	40/32	5518

^{ns}، * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

جدول 5- مقایسه میانگین تأثیر قارچ‌های مایکوریزا بر خصوصیات رشدی، درصد همزیستی و عناصر غذایی گشسینز تحت تنش کادمیوم

کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	مایکوریزا	وزن تر ساقه (گرم)	وزن خشک (گرم)	وزن تر ریشه (گرم)	وزن خشک ریشه (گرم)	شاخص پایداری غشاء (درصد)	محتوای نسبی آب برگ (درصد)	درصد کلونیزاسیون	غلظت نیتروژن (درصد)	غلظت فسفر (درصد)	غلظت کلسیم (درصد)	غلظت منیزیم (درصد)	غلظت روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	غلظت آهن (میلی‌گرم بر کیلوگرم)
0	0	5/16 ^b	1/18 ^{bc}	0/21 ^{cd}	0/08 ^c	78/31 ^a	57/33 ^h	29/67 ^d	2/73 ^{b-d}	0/10 ^{b-d}	2/18 ^b	0/69 ^{b-d}	612/17 ^{c-e}	0/33 ^f
0	1	6/88 ^a	1/43 ^a	0/36 ^a	0/08 ^c	77/18 ^b	59/23 ^{gh}	79 ^a	2/80 ^b	0/12 ^{ab}	2/92 ^a	0/72 ^{b-d}	815/39 ^{a-c}	1/50 ^{ef}
0	2	6/57 ^a	1/55 ^a	0/29 ^{a-c}	0/12 ^{bc}	77/61 ^{ab}	59/41 ^{fg}	74 ^{ab}	2/83 ^{ab}	0/13 ^a	2/26 ^b	0/80 ^{ab}	764/22 ^{b-d}	1/67 ^{ef}
20	0	4/86 ^{bc}	1/09 ^{cd}	0/15 ^{de}	0/12 ^{bc}	75/42 ^c	60/82 ^{d-g}	27/67 ^d	2/77 ^{bc}	0/11 ^{a-c}	2/32 ^{ab}	0/77 ^{a-c}	1005/94 ^a	7/67 ^{de}
20	1	5/34 ^b	1/36 ^{ab}	0/28 ^{a-c}	0/19 ^a	74/62 ^c	61/26 ^{c-f}	72/67 ^{ab}	3/08 ^a	0/10 ^{b-d}	2/22 ^b	0/85 ^a	856/06 ^{ab}	9/17 ^d
20	2	4/93 ^b	1/18 ^{bc}	0/33 ^{ab}	0/14 ^{ab}	66/16 ^d	61/49 ^{c-e}	67/67 ^b	2/74 ^{b-d}	0/12 ^{ab}	2/43 ^{ab}	0/71 ^{b-d}	709/22 ^{b-d}	8/00 ^d
40	0	4/74 ^{ef}	0/84 ^{ef}	0/16 ^{de}	0/11 ^{bc}	52/81 ^f	6/17 ^{e-g}	19/33 ^e	2/52 ^{c-e}	0/09 ^{de}	1/96 ^{bc}	0/66 ^{c-e}	606/44 ^{c-e}	12/78 ^{b-d}
40	1	4/17 ^{de}	0/93 ^{de}	0/23 ^{b-d}	0/077 ^c	65/52 ^{de}	62/79 ^{bc}	55/33 ^c	2/71 ^{b-d}	0/10 ^{b-d}	2/15 ^b	0/67 ^{c-e}	715/00 ^{b-d}	10/22 ^{cd}
40	2	4/37 ^{cd}	0/94 ^{de}	0/22 ^{cd}	0/12 ^{bc}	64/61 ^e	6/192 ^{cd}	49/67 ^c	2/63 ^{b-e}	0/09 ^{c-e}	2/10 ^{bc}	0/65 ^{c-e}	705/89 ^{b-d}	9/72 ^d
80	0	2/52 ^g	0/53 ^g	0/12 ^e	0/10 ^{bc}	52/29 ^f	64/18 ^{ab}	12/33 ^f	2/40 ^e	0/07 ^e	1/50 ^c	0/55 ^e	430/89 ^e	30/22 ^a
80	1	3/48 ^f	0/76 ^{ef}	0/17 ^{de}	0/07 ^c	52/50 ^f	64/74 ^{ab}	26/67 ^d	2/53 ^{c-e}	0/09 ^{de}	1/85 ^{bc}	0/61 ^{de}	598/67 ^{c-e}	17/39 ^b
80	2	3/37 ^f	0/72 ^{fg}	0/15 ^{de}	0/10 ^{bc}	52/80 ^f	65/92 ^a	23/67 ^{de}	2/48 ^{de}	0/09 ^{de}	1/90 ^{bc}	0/60 ^{de}	552/22 ^{de}	16/00 ^{bc}

⁰، ¹ و ²: به ترتیب نشان دهنده عدم تلقیح، تلقیح *Funnetiformis mosseae* و تلقیح با *Rhizophagus intraradices*.

فهرست منابع:

1. اسدی‌کرم، ا، اسرار، ز. و کرامت، ب. 1395. تأثیر کاربرد متیل‌جاسمونات بر محتوای پرولین و جذب عناصر مس، آهن، روی و منیزیم در گیاه شاهی (*Lepidium sativum*) تحت سمیت مس. مجله پژوهش‌های گیاهی. 29(2): 243-253.
2. اسماعیل‌پور، ب. و امانی، ن. 1393. بررسی تأثیر تلقیح با قارچ میکوریز بر رشد و جذب عناصر " غذایی کاهو رقم "سیاهو (*Lactuca sativa L.*). مجله مدیریت خاک و تولید پایدار. 4(2): 49-69.
3. امامی، ع. 1375. روش‌های تجزیه گیاه. انتشارات مؤسسه تحقیقات خاک و آب. نشریه فنی شماره 82، ص. 128.
4. اصغری‌پور، م، پاداش، ع. و قنبری، ا. 1395. اثر سالیسیلیک اسید بر غلظت برخی عناصر غذایی، پروتئین و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ریحان (*Ocimum basilicum*) تحت تنش سرب. زیست‌شناسی گیاهی ایران. 8(27): 17-32.
5. برین، م، رسولی صدیقانی، م. و خداوردیلو، ح. 1394. بررسی تأثیر مایه‌زنی میکروبی بر خصوصیات کمی و کیفی گیاه گل‌گندم (*Centaurea cyanus*) در یک خاک آلوده به کادمیم. نشریه زیست‌شناسی خاک. 3(2): 137-149.
6. پیردشتی، ه، خالوندی، م، عامریان، م، برادران فیروزآبادی، م. و غلامی، ا. 1396. برهمکنش قارچ *Piriformospora indica* با گیاه نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) بر کمیت و کیفیت اسانس و برخی پارامترهای فیزیولوژیک تحت تنش شوری. فرایند و کارکرد گیاهی. 21(6): 169-184.
7. تبریزی، ل، محمدی، س، دلشاد، م. و متشع‌زاده، ب. 1394. تأثیر قارچ مایکوریزا بر رشد و عملکرد گیاه دارویی رزماری (*Rosmarinus officinalis L.*) در شرایط تنش سرب و کادمیوم. فصلنامه علوم محیطی. 2: 37-48.
8. خداوردیلو، ح، کریمی، ا. و رسولی صدیقانی، م. 1396. پیامد مایه زنی میکروبی بر رشد، جذب آهن و روی و پاسخ بیوشیمیایی بنگ‌دانه (*Hyoscyamus niger*) در تنش سرب. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). 31(5): 1340-1354.
9. دانش‌فر، ا، اصغرزاده، ن، اوستان، ش. و خوش‌رو، ب. 1397. نقش قارچ *Rhizophagus irregularis* در تعدیل جذب سرب توسط آفتابگردان. دانش کشاورزی و تولید پایدار. 28(1): 37-50.
10. ذوالفقاری، م، ناضری، و، سفیدکن، ف. و رجالی، ف. 1393. بررسی تأثیر گونه‌های مختلف مایکوریزا بر ویژگی‌های رشدی و میزان اسانس گیاه دارویی ریحان *Ocimum basilicum*. مجله تولیدات گیاهی، 37(4): 47-56.
11. سیروس‌مهر، ع، مزارعی، ا. و بابایی، ز. 1396. تأثیر قارچ مایکوریزا بر برخی خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی خارمریم (*Silybum maranum (L.) Gaertn.*) تحت تنش خشکی. تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران. 33(4): 620-635.
12. سالاردینی، ع. ا. 1387. حاصلخیزی خاک، انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، چاپ هشتم. ص. 200-300.
13. شمشیرگران، ز، سعید نعمت‌پور، ف. و صفی‌پور افشار، ا. 1394. تأثیر همزیستی میکوریزیایی بر رشد، برخی صفات فیزیولوژیکی و تجمع کادمیوم در گیاه سیاهدانه (*Nigella sativa L.*). فرآیند و کارکرد گیاهی. 5(17): 133-144.
14. شیرمردی، م، ثواقبی، غ، خاوازی، ک، فرحبخش، م، رجالی، ف. و سادات، ع. 1389. بررسی برهمکنش قارچ میکوریز و باکتری سودوموناس بر پتانسیل آب برگ و عملکرد دو رقم آفتابگردان (*Heliantus annuus L.*) در یک خاک شور. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. 41: 221-228.
15. شگری، ز، برومند، ن، سرچشمه‌پور، م. و علیزاده، ح. 1394. تأثیر قارچ میکوریزا- آربوسکولار بر گیاه پالایی کادمیم توسط گل جعفری زینتی (*Tagetes erecta*). نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار. 6(1): 191-204.

16. عباس‌زاده، ب. و ذاکریان، ف. 1393. میزان جذب عناصر در بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) تحت تاثیر دو گونه قارچ آریسکولار، قارچ شبه مایکوریزا و ورمی کمپوست. تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران. 22(1): 47-59.
17. عماد، م. 1378. شناسایی گیاهان دارویی، صنعتی، مرتعی و جنگلی. جلد دوم. انتشارات توسعه روستایی. ص. 160.
18. نورانی آزاد، ح. و کفیل زاده، ف. 1390. تأثیر سمیت کادمیوم بر رشد، قندهای محلول، رنگیزه‌های فتوسنتزی و برخی آنزیمها در گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.). زیست شناسی ایران. 24(6): 858-867.
19. محمدی، س.، تبریزی، ل.، دلشاد، م. و متشع‌زاده، ب. 1392. بررسی رشد و عملکرد گیاه دارویی همیشه بهار (*Calendula officinalis* L.) در شرایط همزیستی با قارچ مایکوریزا آربوسکولار و تنش فلزهای سنگین. نشریه کشاورزی بوم شناختی. 3(2): 48-59.
20. محمد خانی، ز.، برادران فیروزآبادی، م.، پارسائیان، م. و قربانی، ه. 1393. اثر محلول پاشی آسکوربات بر عملکرد و برخی از ویژگی های فیزیولوژیک لوبیا سبز تحت شرایط جذب برگی سرب و نیکل. پژوهش در اکوسیستم های زراعی. 1(4): 1-11.
21. یوسفی‌راد، م.، معصومی زواریان، ا. و اصغری، م. 1394. بررسی اثرات قارچ میکوریزا بر روی خصوصیات کمی و کیفی گیاه دارویی انیسون (*Pimpinella anisum*) تحت تنش شوری. فصلنامه گیاهان دارویی. 56(4): 139-148.
22. نورانی آزاد، ح. و کفیل زاده، ف. 1390. تأثیر سمیت کادمیوم بر رشد، قندهای محلول، رنگیزه های فتوسنتزی و برخی آنزیمها در گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.). زیست شناسی ایران. 24(6): 858-867.
23. Agrawal, S.B. and Mishra, S. 2009. Effects of supplemental ultraviolet-B and cadmium on growth, antioxidants and yield of *Pisum sativum* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 72(2): 610-618.
24. Akay, A. and Koleli, N. 2007. Interaction between cadmium and zinc in barley (*Hordeum vulgare* L.) grow under field conditions. *Bangladesh Journal of Botany* 36: 13-19.
25. Alloway, B.J., 2001. *Heavy Metals in Soil*. New York: John Wiley and sons Inc, pp. 20-28.
26. Alloway. B. I. 2005. *Heavy metals in soils: Lead*. BLackieand son Ltd. Glasgow and London, pp. 177-196.
27. Alloway, BJ. 2010. *Heavy Metals in Soil (Third edition)*. John Wiley and Sons, New York, USA.
28. Annan, K., Kojo, A.I., Cindy, A., Samuel, AN. and Tunkumgnen, BM. 2010. Profile of heavy metals in some medicinal plants from Ghana commonly used as components of herbal formulations. *Pharmacognosy Research* 2(1): 41-50.
29. Bhat, N.A, Mir, A.H., Lal, E.P. and Rather, M.A. 2014. Antagonistic effect of calcium (Ca²⁺) on cadmium (Cd) viz. chlorophyll, protein and oil yield of mustard plant (*Brassica juncea* L.) var. pusa bold. *International Journal of Development Researc* 4(3): 683-687.
30. Biro, I., and Takacs, T. 2007. Effects of *Glomus mossea* strains of different origin on plant macro and micronutrient uptake in Cd polluted and unpolluted soils. *Acta Agronomica Hungarica* 55(2): 183-192.
31. Brennan, E.W. and Lindsay, W.L. 1998. Reduction and oxidation effect on the solubility and transformation of iron oxides. *Soil Science Society of America Journal* 62(4): 930-937.
32. Burd, G.I., Dixon, D.G. and Glick, B. 2000. Plant growth-promoting bacteria that decrease heavy metal toxicity in plants. *Canadian Journal of Microbiology* 46(3): 237-245
33. Cantrell, I.C. and Linderman, R.G. 2001. Preinoculation of lettuce and onion with VA mycorrhizal fungi reduces deleterious effects of soil salinity. *Plant and Soil* 233(2): 269-281.

34. Chen, B.D., Liu, Y., Shen, H., Li, X.L. and Christie, P. 2004. Uptake of cadmium from an experimentally contaminated calcareous soil by arbuscular mycorrhizal maize (*Zea mays* L.). *Mycorrhiza* 14(6): 347-354.
35. Ghoulam, C., Foursy, A. and Fares, K. 2002. Effects of salt stress on growth inorganic ions and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in five sugar beet cultivars. *Environmental and Experimental Botany* 47(1): 39-50.
36. Curaqueo, G., Schoebitz M., Borie F., Caravaca F. and Roldan A. 2014. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and addition of composted olive-mill waste enhance plant establishment and soil properties in the regeneration of a heavy metal-polluted environment. *Environmental Science and Pollution Research* 21(12): 7403-7412.
37. Cong, T., ChunRong, Z. and HuaiMan, C. 2002. Effect of heavy metals on phosphorus retention by typic udic Ferrisols. *Equilibrium and Kinetics. Pedospher* 12(1):15-24.
38. Dalp, Y. 1993. Vesicular Arbuscular Mycorrhiza. In: Carter, M. R. (ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Lewis Publisher, pp. 287-301
39. Das, P., Samantaray, S. and Rout. G.R. 1997. Root studies on cadmium toxicity in plants: A review. *Environmental Pollution* 98(1): 29-36.
40. Demir, S. 2005. Influence of arbuscular mycorrhiza on some physiological growth parameters of pepper. *Turkish Journal of Biology* 28(2-4): 85-90
41. Gonzalez-Guerrero, M., Azcon-Aguilar, C., Mooney, M., Valderas, A., MacDiarmid, C.W., Eide, D.J., and Ferrol, N. 2005. Characterization of a *Glomus intraradices* gene encoding a putative Zn transporter of the cation diffusion facilitator family. *Fungal Genetics and Biology* 42(2): 130-140.
42. Gurrea, N.B., de Almeida Melo, E. and Mancini Filho, J. 2005. Antioxidant compounds from coriander (*Coriandrum sativum*) etheric extract. *Journal of Food Composition and Analysis*, 18(2-3): 193-199.
43. Hammer, E.C., Nasr, H., Pallon, J., Olsson, P.A. and Wallander, H. 2011. Elemental composition of arbuscular mycorrhizal fungi at high salinity. *Mycorrhiza* 21(2):117-129.
44. Hawkins, H.J. and George, E., 2001. Reduced 15 Nnitrogen transport through arbuscular mycorrhizal hypha to *Triticum aestivum* L. supplied with ammonium vs. nitrate nutrition. *Annals of Botany* 87(3): 303-311.
45. *Heavy Metals in Soil*. New York: John Wiley and sons Inc, pp. 20-28.
46. Huang, Z., Pan, X.D., Wu, P.G., Han, J.L. and Chen, Q. 2014. Heavy metals in vegetables and the health risk to population in Zhejiang China. *Food Control* 36(1): 248-252.
47. Janouskova, M., Pavlikova, D., Macek, T. and Vosatka, M. 2005. Influence of arbuscular mycorrhiza on the growth and cadmium uptake of tobacco with inserted metallothionein gene. *Applied Soil Ecology* 29(3): 209-214.
48. Jayakumari, K., Jaleel, CA. and Vijayarengan, P. 2007. Changes in growth, biochemical constituents, and antioxidant potentials in radish (*Raphanus sativus* L.) under Cobalt stress. *Turkish Journal of Biology* 31(3): 127-136.
49. Karimi, A., Khodaverdiloo, H., Sepehri, M. and Rasouli Sadaghiani, M.H. 2011. Arbuscular mycorrhizal fungi and metal contaminated soils. *African Journal of Microbiology Research* 5(13): 1571-1576.
50. Kaur, N. and Jhanji, S. 2016. Effect of soil cadmium on growth, photosynthesis and quality of *Raphanus sativus* and *Lactuca sativa*. *Journal of Environmental Biology* 37(5): 993-997.
51. Khan, N.A., Ahmad, I., Singh, S. and Nazar, R. 2006. Variation in growth, photosynthesis and yield of five wheat cultivars exposed to cadmium stress. *World Journal of Agricultural Sciences* 2(2): 223-226.
52. Lasat, M.M. 2002. Phytoextraction of toxic metals—A review of biological mechanisms. *Journal of Environmental Quality* 31(1): 109-120

53. Leyval, C., Joner, E., Del Val, C. and Haselwandter, K. 2002 Potential of arbuscular mycorrhizal fungi for bioremediation. In: Gianinazzi, S., Schuepp, H., Barea J.M. and Haselwandter K. (eds) Mycorrhizal Technology in Agriculture. Birkhäuser Verlag/Switzerland, Pp. 175-186.
54. Long, X.X., Yang, X.E. and Ni, W.Z. 2002. Current status and perspective on phytoremediation of heavy metal polluted soils. *Journal of Applied Ecology* 13: 757- 62.
55. Mishra, V., Gupta, A., Kaur, P., Singh, S., Singh, N., Gehlot, P. and Singh, J. 2016. Synergistic effects of Arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteria in bioremediation of iron contaminated soils. *International Journal of Phytoremediation* 18(17): 697-703.
56. McIntyre, T. 2003. Phytoremediation of heavy metals from soils. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology* 78: 97-123.
57. Neumann, E. and Eckhard, G. 2010. Nutrient Uptake: The Arbuscular Mycorrhiza Fungal Symbiosis as a Plant Nutrient Acquisition Strategy. Pp. In: Koltai, H. and Kampulink, Y. (eds). *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function*. Pp. 137-167.
58. Nikolic, N., Kogic, D., Pilipovic, A., Pajivic, S., Krstic, B., Borisev, M. and Orlovic, S. 2008. Responses of hybrid poplar to cadmium stress photosynthetic characteristics, cadmium and proline accumulation and antioxidant enzyme activity. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica* 50(2): 95-103.
59. Orłowska, E., Godzik, B. and Turnau, K. 2012. Effect of different arbuscular mycorrhizal fungal isolates on growth and arsenic accumulation in *Plantago lanceolata* L. *Environmental Pollution* 168: 121-130.
60. Qindar, A. 1995. Potassium and sodium contents of shoot and laminae of rice cultivars and their sodicity tolerance. *Journal of Plant Nutrition* 18: 2281-2286.
61. Philips, JM. and Hayman, DS. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of British Mycological Society* 55: 158-161.
62. Rehman, F., Khan, F.A., Varshney, D., Naushin, F. and Rastogi, J. 2011. Effect of cadmium on the growth of tomato. *Journal of Biology and Medicine* 3(2): 187-190.
63. Rai, V. and Mehrotra, S. 2008. Chromium-induced changes in ultra morphology and secondary metabolites of *Phyllanthus amarus* Schum & Thonn. an hepatoprotective plant. *Environmental Monitoring Assessment* 147(1-3): 307-315.
64. Ryan, J., Estefan, G. and Jaldappa, S. 2000. Spectrophotometric determination of selenium (IV) using methdilazine hydrochloride. *Turkish Journal of Chemistry* 24: 287-290.
65. Saia, S., Ruisi, P., Garcia-Garrido, J.M., Benitez, E., Amato, G., and Giambalvo, D. 2012. Can arbuscular mycorrhizal fungi enhance plant nitrogen capture from organic matter added to soil? 17 Nitrogen Workshop. 26 to 29 June, Wexford, Ireland.
66. Sairam, RK. and Srivastava, GC. 2002. Changes in antioxidant activity in sub-cellular fractions of tolerant and susceptible wheat genotypes in response to long term salt stress. *Plant Science* 162(6): 897-904
67. Sharma, R.K., Agrawal, M., and Agrawal, S.B. 2008. Interactive effects of cadmium and zinc on carrots: Growth and biomass accumulation. *Journal of Plant Nutrition* 31(1): 19-34.
68. Sharmila, P., Kumari, P.K., Singh, K., Prasad, N.V.S.R.K. and Pardha-Saradhi, P. 2017. Cadmium toxicity-induced proline accumulation is coupled to iron depletion. *Protoplasma* 254(2): 763-770.
69. Song, H. 2005. Effects of VAM on host plant in the condition of drought stress and its Mechanisms. *Electronic Journal of Biology* 1(3): 44-48.
70. Smith, S.E. and Read, D.J. 2008. *Mycorrhizal Symbiosis*, 3rd edition. Academic Press, London, UK.

71. Street, R.A., Kulkarni, M.G., Stirk, W.A., Southway, C. and Van Staden, J. 2007. Toxicity of metal elements on germination and seedling growth of widely used medicinal plants belonging to hyacinthaceae. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 79(4): 371-376.
72. Wong, MK., Chuah, GK., Koh, LL., Ang, KP. and Hew, CS. 1984. The uptake of cadmium by *Brassica chinensis* and its effect on plant zinc and iron distribution. *Environmental and Experimental Botany* 24(2): 189-195.

Influence of Mycorrhizal Fungi Inoculation on Growth Characteristics, Membrane Stability, Relative Water Content and Elements Uptake of Coriander under Cadmium Stress

F. Mohammadifard and M. Moghaddam¹

M.Sc. Student, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad; E-mail: fariba.mohammdifard@gmail.com

Associate Professor., Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad; E-mail: m.moghadam@um.ac.ir

Received: December, 2019 & Accepted: May, 2020

Abstract

Heavy metals are one of the pollutants in the ecosystem. They are of great importance due to their specific physiological effects on living organisms, even at low concentrations. Cadmium is one of the most important heavy metals due to its high mobility in the soil, and high solubility in water and soil. For this purpose, a pot experiment was carried out in a completely randomized design with factorial arrangement and two factors and three replications at the Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, to evaluate the growth characteristics, membrane stability, relative water content and uptake of some nutrients in coriander (*Coriandrum sativum L.*) under heavy metal stress and mycorrhizal inoculation. The first factor was cadmium nitrate in 4 levels of 0, 40, 20, 80 mg/kg soil, and the second factor was mycorrhiza in 3 levels (without fungi inoculant, *Funnetiformis mosseae*, and *Rhizophagus intraradices*). The results showed that with increasing stress levels, the membrane stability index, root colonization percentage, and the concentration of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, iron, and zinc in coriander were significantly reduced. While increasing cadmium concentration in soil, increased significantly cadmium concentration and relative water content of leaf ($p \leq 0.01$). However, the mycorrhiza inoculation reduced the harmful effects of cadmium in the plant. The highest concentrations of nitrogen (3.08%), phosphorus (0.126%), calcium (2.92%), magnesium (0.85%), and zinc (121 mg/kg) were observed in mycorrhizal fungi application. *Funnetiformis mosseae* was more effective than *Rhizophagus intraradices* with a 42% decrease in cadmium concentration of leaf at the highest level of soil cadmium contamination (80 mg/kg cadmium nitrate). Inoculation with mycorrhizal fungi (especially *Funnetiformis mosseae*) increased plant tolerance against cadmium stress. So, plants inoculated with mycorrhizal fungi had higher growth and yield than non-inoculated plants, and their application in these conditions is recommended.

Keywords: Cadmium, Growth Properties, Mycorrhizal Fungi, Nutrient, Relative Water Content

¹ Corresponding author: Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad