کارایی هیف‌های بیرونی قارچ‌های میکوریزای آربسکولار در انتقال عناصر کادمیم، روی و فسفر در شبدر سفید

آیدا معدنی*، امیر لکزیان، غلامحسین حق نیا و رضا خراسانی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۳/۱۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۰/۲۷)

چکیده

کلونیزه شدن ریشه‌های گیاه با قارچ میکوریزای آربسکولار باعث تغییر میزان دسترسی گیاه به عناصر گوناگون می‌شود. برای بررسی کارایی هیف‌های بیرونی قارچ میکوریزا در انتقال عناصر، محیط‌های رشد ریشه و رشد هیف با غشای نایلونی ۳۰ میکرومتر از هم جدا شدند. گیاهان مایه‌زنی شده با دو گونه قارچ میکوریزا *G. mosseae* و*G. intraradices* در بخش ریشه‌ای گلدان کشت شدند. شش ترکیب فلزی (روی ۴۰۰، کادمیم ۲۵، فسفر ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نمونه خاک، روی و کادمیم، روی و کادمیم و فسفر به همان غلظت‌ها و شاهد بدون فلز) به بخش هیفی گلدان‌ها افزوده شدند. این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل در سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد وزن خشک گیاه و غلظت فسفر در اندام‌های هوایی شبدر سفید میکوریزایی در برابر گیاهان غیرمیکوریزایی به گونه چشمگیری افزایش یافت. قارچ *G. mosseae* در برابر *G. intraradices* تأثیر بیشتری بر غلظت فسفر در گیاه شبدر داشت. هر دو گونه قارچ سبب انتقال بیشتر عنصر روی به اندام هوایی و ریشه گیاه شبدر سفید شدند. غلظت روی در تیمار فسفر همراه با روی در اندام هوایی و ریشه شبدر کاهش یافت. هر دو گونه قارچ میکوریزا غلظت کادمیم در ریشه گیاهان میکوریزایی را در برابر گیاهان غیرمیکوریزایی به گونه چشمگیری افزایش دادند. میان دو گونه قارچ، گونه *G. intraradices* باعث انباشتگی بیشترکادمیم در ریشه‌های گیاه شبدر شد. در مجموع یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که میکوریزایی شدن شبدر سبب انتقال بیشترعناصر فسفر و روی به اندام‌های هوایی می شود ولی سبب تثبیت بیشتر کادمیم در بخش ریشه‌ای گیاه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کادمیم، روی، فسفر، *G. mosseae*، *G. intraradices*

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: madani.aida@yahoo.com

مقدمه

قارچ‌های میکوریزای آربسکولار از فراوان‌ترین ریز موجودات خاک هستند که با داشتن رابطه همزیستی با گیاهان عالی کارکردهای ویژه‌ای در خاک دارند (۲۴). یکی از اصلی‌ترین کارکردهای قارچ میکوریزی آربسکولار در سیستم‌های کشاورزی افزایش دسترسی ریشه‌های گیاه به عناصر غذایی می‌باشد (۶). در واقع قارچ میکوریزا با گسترش در محیط خاک پیرامون ریشه باعث جذب عناصر معدنی نسبتاً غیرفعالی مانند فسفر از خاک به گیاه میزبان می‌شود (۶ و ۱۱ و ۲۰). تاکنون پژوهش‌های بسیاری در زمینه تأثیر قارچ میکوریزا در افزایش جذب عناصر غذایی انجام شده، به گونه‌ای که در گزارشی درباره عنصر فسفر غلظت و میزان جذب این عنصردر گیاهان میکوریزایی چندین برابر گیاهان غیرمیکوریزایی گزارش شده است (۳). از دیگر پیامدهای قارچ میکوریزا در اکوسیستم‌های طبیعی کاهش جذب عناصر سنگین در مقادیر بالا از خاک به گیاه میزبان می‌باشد (۱و۲۹).

به نظر می‌رسد قارچ میکوریزا به گونه غیرمستقیم با افزایش جذب فسفر از یک سو و افزایش رشد گیاه از سوی دیگر مایه کاهش پیامدهای زیانبار عناصر سنگین در گیاه میزبان می‌شود (۷). هر چند برخی پژوهش‌های دیگر مکانیسم کاهش جذب عناصر سنگین از خاک به گیاه میزبان با قارچ میکوریزا را وابسته به گنجایش بالای نگه‌داری عناصر سنگین توسط هیفه‌های قارچ درون ریشه‌ای و برون ریشه‌ای در محیط فراریشه دانسته‌اند (۱۹). گزارش شده است که در نتیجه غیرفعال شدن عناصر سنگین در درون ریشه و پیرامون محیط ریشه، انتقال عناصر به اندام‌های هوایی گیاه میزبان کاهش می‌یابد (۴ و ۲۵). در پژوهشی در این زمینه آشکار شد که غلظت کادمیم در نسبت ریشه به اندام هوایی در گیاهان میکوریزایی تقریباً ۳ برابر این نسبت در گیاهان غیرمیکوریزایی بود (۱۲). در آزمایشی دیگر میزان غیر فعال شدن عنصر روی در درون ریشه یا پیرامون ریشه‌های گیاه شبدر با افزایش کاربرد سولفات روی به خاک افزایش یافت (۲۹). انجام چنین فرآیندی می‌تواند از راه ته نشست دورن یاخته ای کاتیون‌های فلزی با فسفات یا جذب یون‌های فلزی به دیواره هیفه‌های قارچ رخ دهد (۲۷). همان‌گونه که برخی پژوهندگان انباشتگی بیش از ۱۲۰۰ppm روی در میسیلیوم گونه *G. mosseae* همزیست با گیاه ذرت و توانایی بالای گونه‌های *گلوموس* را در جذب روی و کادمیم گزارش کردند (۳ و ۹ و ۱۳).

با توجه به یافته‌های گزارش شده درباره انتقال عناصر توسط قارچ میکوریزا به گیاهان در پژوهش کنونی تلاش شده با نگاهی دقیق‌تر و با جداسازی محیط رشد هیف قارچ از محیط رشد ریشه گیاه به بررسی نقش هیفه‌های بیرونی قارچ میکوریزا در انتقال عناصر فسفر، روی و کادمیم پرداخته شود. هم‌چنین مقایسه‌ای میان کارکرد گیاهان میکوریزایی و غیرمیکوریزایی و میان دو گونه قارچ *گلوموس* در نتیجه حضور عناصر فسفر، روی و کادمیم انجام شود.

مواد و روش‌ها

آزمایش در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، با طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل در سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل دو گونه قارچ میکوریزای آربسکولار *G. mosseae* و *G. intraradices* به‌ترتیب M1 و M2 و بدون میکوریزا (NM)، و ۶ ترکیب فلزی (روی ۴۰۰ (Zn)، کادمیم ۲۵ (Cd)، روی و کادمیم به‌ترتیب ۴۰۰ و ۲۵ (ZnCd)، فسفر ۵۰ (P)، فسفر، روی و کادمیم به‌ترتیب ۵۰، ۴۰۰ و ۲۵ (PZnCd) میلی‌گرم درکیلوگرم نمونه خاک و بدون فلز (C)) بودند. برای آماده‌سازی سیستم کشت در این آزمایش، گلدان‌هایی در ابعاد ۱۰×۱۵×۱۵ طراحی شدند. در فاصله ۵ سانتی‌متری از لبه گلدان غشایی با اندازه منافذ ۳۰ میکرومتر کار گذاشته شد. خاصیت این غشا به گونه‌ای است که ریشه‌های گیاه شبدر سفید با توجه به قطری که دارند قادر به عبور از غشا نیستند در حالی‌که هیفه‌های قارچ از این غشا عبور می‌کنند. به این ترتیب با بهره‌گیری از غشای نایلونی گلدان‌ها به دو بخش هیفی و بخش ریشه‌ای تقسیم می‌شوند که

با این ویژگی می‌توان به بررسی نقش هیف‌های بیرونی قارچ در جذب عناصر و کارکرد این قارچ‌ها به دور از تاثیرات محیط فراریشه و ریشه پرداخت (شکل ۱).

خاک به‌کار رفته در این آزمایش یک خاک لوم شنی بود که از ژرفای ۳۰-۰ سانتی‌متری مزرعه پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد در استان خراسان رضوی آماده شد. اسیدیته خاک ۷/۳، کربن آلی ۰/۲۳ درصد، نیتروژن کل ۰/۰۱۷ درصد، فسفر فراهم ۵/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و پتاسیم فراهم خاک ۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. سترون کردن نمونه‌های خاک در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۰ دقیقه در دو مرحله و با فاصله ۲۴ ساعت، به کمک دستگاه اتوکلاو انجام شد. عناصر روی و کادمیم به ریخت نمک سولفاتی و فسفر به ریخت محلول منوکلسیم فسفات (CaH_2PO_4) بر پایه تیمارهای آزمایشی به خاک بخش هیفی هر گلدان به‌کار رفت. در بخش ریشه‌ای گلدان، نمونه‌های خاک با مواد مایه‌زنی دو گونه قارچ میکوریزای آربسکولار *G. mosseae* و *G. intraradice* آمیخته شدند و ماده مایه‌زنی سترون شده به خاک شاهد افزوده شد. انواع مواد مایه‌زنی قارچ به‌کار رفته در این آزمایش حاوی محیط کشت خاک، ریشه‌های میکوریزایی گیاه شبدر سفید، اسپور قارچی، هیف‌های خارجی قارچ میکوریزا بود که به مقدار ۱۰ در صد وزنی وزنی با نمونه‌های خاک هر گلدان مخلوط شدند.

شبدر سفید، گیاه میزبان قارچ‌ها در این پژوهش بود. برای جلوگیری از هرگونه آلودگی، بذرهای شبدر سفید پیش از کاشت برای ۱۰ دقیقه در محلول ۳ درصد هیپوکلریت سدیم گندزدایی سطحی شدند. سپس ۲۰ بذر جوانه‌دار شبدر سفید در بخش ریشه‌ای گلدان، کشت شدند. در دوره آزمایش رطوبت خاک در حد ۷۰ درصد ظرفیت زراعی با آب مقطر ثابت نگه‌داری شد. پس از ۱۲ هفته از زمان کشت، کارهای برداشت گیاه و جداسازی اندام هوایی از روی خاک و جداسازی ریشه‌ها با شستشوی خاک پیرامون ریشه انجام شد. نمونه‌های گیاهی برای ۷۲ ساعت در درون آون با دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. نمونه‌های خشک شده توزین و سپس آسیاب و برای انجام تجزیه شیمیایی در ظروف پلاستیکی نگه‌داری شدند. نمونه‌های خشک و آسیاب شده گیاه از روش هضم تر (هضم با اسید نیتریک و پرکلریک) عصاره‌گیری و غلظت عناصر کادمیم و روی در عصاره به‌دست آمده با دستگاه جذب اتمی مدل (Shimadzu, AA-670) در طیف خاص هر عنصر اندازه‌گیری شدند (۲۱). فسفر نمونه‌های گیاهی با روش مولیبدات آمونیوم با دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UV/vis spectrophotometer wpA s2000) تعیین گردید (۲۲). پردازش آماری داده‌های به‌دست آمده به کمک نرم‌افزار MSTATC و مقایسه میانگین‌ها با روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج به‌دست آمده از این آزمایش در جدول ۱ نشان داد که کلونیزه شدن ریشه‌های گیاه شبدر سفید با قارچ میکوریزای آربسکولار مایه افزایش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی گیاهان میکوریزایی در برابر گیاهان غیرمیکوریزایی شد. به‌طوری‌که افزایش وزن خشک در گیاهان میکورزایی ۴ تا ۵ برابر گیاهان غیر میکوریزایی بود (جدول ۱). افزایش وزن خشک گیاهان میکوریزایی در پژوهشی همانند که با هدف بررسی تأثیر هیف‌های خارجی در جذب کاتیون‌های فلزی در دو سطح مختلف فسفر انجام شد نیز نتایج یکسانی در برداشت. بدین گونه که وزن خشک اندام هوایی گیاهان میکوریزایی در برابر گیاهان غیرمیکوریزایی نزدیک ۴ برابر بیشترگزارش شد (۱۵). نتایج به‌دست آمده هم‌چنین مشخص کرد که تیمار عناصر مختلف بر وزن خشک اندام هوایی گیاهان غیر میکوریزایی تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۱). به نظر می‌رسد عدم تحرک عناصر فسفر، روی و کادمیم در خاک و عدم وجود سیستم ریشه‌ای گسترده در مورد گیاهان غیر میکوریزایی باعث شده که تفاوت معنی‌داری بین وزن خشک اندام هوایی در بین تیمارهای غیرمیکوریزایی مشاهده نشود. در حالی‌که در مورد تیمارهای

شکل ۱. سیستم کشت دو بخشی (بخش هیفی و بخش ریشه‌ای)

جدول ۱. برهم کنش قارچ میکوریزا و عناصرکادمیم، روی و فسفر بروزن خشک اندام هوایی شبدر سفید برحسب گرم بر گلدان

	تیمارهای عناصر					
ماده مایه‌زنی	C	P	Zn	Cd	ZnCd	PZnCd
NM	۱/۲ f	۱/۲ f	۱/۲ f	۱/۳ f	۱/۲ f	۱/۲ f
G. mosseae	۵/۶ bc	۶/۲ a	۵/۶ bc	۵/۳ d	۵/۴ cd	۵/۵ bc
G. intraradices	۵/۹ b	۵/۴ cd	۵/۵ cd	۵/۳ d	۵/۱ e	۵/۵ cd

ناهمانندی اعداد درون جدول با حروف یکسان در سطح اطمینان ۵٪ معنی‌دار نمی‌باشند

میکوریزایی در پی کاربرد عناصر به بخش هیفی گلدان، بالاترین میزان وزن خشک اندام هوایی در تیمارهای مایه‌زنی شده با *G. mosseae* در تیمار فسفر بود و در باره *G. intraradices* در تیمار شاهد دیده شد. از سویی کاربرد کادمیم در تیمارهای میکوریزایی نسبت به شاهد مایه کاهش معنی‌دار کارکرد گیاهان میکوریزایی در مورد هر دو گونه قارچ گردید هر چند تفاوت بین دو گونه قارچ معنی‌دار نبود (جدول ۱).

در مورد کاربرد عنصر روی در تیمارهای مایه‌زنی شده با *G. mosseae* تفاوت معنی‌داری در وزن خشک اندام هوایی در مقایسه با شاهد دیده نشد، هرچند این تفاوت بین تیمار روی و تیمار فسفر معنی‌دار بود. اما وزن خشک اندام هوایی در تیمار روی در گیاهان مایه‌زنی شده با *G. intraradices* در برابر شاهد کاهش معنی‌داری نشان داد. هرچند اختلاف در وزن خشک اندام هوایی گیاهان میکوریزایی در تیمارهای مختلف بسیار جزیی بود. زو و همکاران (۲۹) با کاربرد غلظت‌های مختلف روی (۵۰-۱۰۰-۲۰۰-۴۰۰ ppm) در گیاه شبدر نیز کاهش بسیار اندکی در وزن خشک گیاهان میکوریزایی گزارش کردند. لی و همکاران (۱۶) نیز در آزمایش خود در گلدان‌های چند بخشی یافته‌های همانندی با این یافته‌ها گزارش کردند. بدین گونه که در تیمار غلظت ۱۰۰۰ ppm عنصر روی هیچ‌گونه کاهش چشمگیری در وزن خشک اندام هوایی دیده نشد. در پژوهشی دیگر با کاربرد کاتیون‌های فلزی روی، مس، کادمیم و نیکل در گیاه خیار نیز کاهش کارکرد گیاه چشمگیر نبود (۱۵). البته باید یادآور شد که برخی تفاوت‌های پژوهش‌های انجام شده و این پژوهش وابسته به ناهمانندی گیاه، ژنوتیپ قارچ به‌کار رفته، روش تلقیح و روش تحقیق می‌باشد.

نتایج در باره عنصر فسفر نیز نشان داد که گیاهان میکوریزایی در برابر گیاهان غیرمیکوریزایی توان جذب فسفر بیشتری داشتند (جدول ۲). بدین گونه که در این آزمایش میزان غلظت فسفر در گیاهان میکوریزایی نزدیک ۲ تا ۳ برابر گیاهان غیرمیکوریزایی بود و نشانه های کمبود فسفر در برگ گیاهان غیرمیکوریزایی به خوبی آشکار بود. افزایش جذب فسفر در

جدول ۲. غلظت فسفر (میلی‌گرم در کیلوگرم) در گیاهان میکوریزایی و غیرمیکوریزایی در تیمارهای گوناگون عناصر در خاک

	تیمارهای عناصر					
ماده مایه‌زنی	C	P	Zn	Cd	ZnCd	PZnCd
NM	۲۸۰/۵ i	۲۷۹/۰ i	۲۶۹/۱ i	۲۷۳/۸ i	۲۷۳/۴ i	۲۷۷/۷ i
G. mosseae	۱۰۲۲/۰ b	۱۱۴۳/۰ a	۸۷۳/۶ de	۴۶۱/۹ h	۷۵۶/۴ f	۹۲۷/۸ cd
G. intraradices	۸۶۲/۰ e	۹۸۲/۵ bc	۸۴۵/۷ e	۵۲۵/۳ g	۷۴۲/۸ f	۸۲۰/۰ e

ناهمانندی اعداد درون جدول با حروف یکسان در سطح اطمینان ۵٪ معنی‌دار نمی‌باشند.

گیاهان میکوریزایی در برابر گیاهان غیرمیکوریزایی تاکنون در بررسی‌های بسیاری گزارش شده است (۳ و۱۷). افزایش وزن خشک گیاهان میکوریزایی را نیز می‌توان وابسته به توان بالای جذب و انتقال فسفر به کمک هیف‌های بیرونی قارچ دانست (۱۸). در آزمایش انجام شده هم‌چنین آشکار شد که در تیمارهای غیرمیکوریزایی ناهمانندی چشمگیری در جذب فسفر در پی کاربرد عناصر مختلف رخ نداد. ولی با کاربرد عناصر مختلف به خاک توان انتقال فسفر به کمک هیف‌های بیرونی قارچ به گیاهان میکوریزایی تغییر کرد.

به‌طوری‌که غلظت فسفر در گیاهان مایه‌زنی شده با هر کدام از گونه‌های *G. mosseae* و *G. intraradices* در تیمار فسفر بیشترین اندازه بود. به گونه‌ای که درصد کارایی هیف‌های بیرونی قارچ میکوریزای آربسکولار در جذب فسفر در مورد گونه *G. mosseae* معادل ۷۵/۶ درصد و در باره گونه *G. intraradices* معادل ۷۱/۶ درصد اندازه‌گیری شد. در برابر آن کاربرد عناصر روی و کادمیم به بخش هیفی گلدان‌ها پیامد وارونه‌ای بر جذب و غلظت فسفر در اندام هوایی گیاهان میکوریزایی داشت و غلظت فسفر در اندام هوایی گیاه در تیمار هر دو گونه قارچ کاهش یافت. این کاهش در غلظت فسفر در گیاهان مایه‌زنی شده با گونه *G. mosseae* بسیار بیشتر بود. کاربرد کادمیم در خاک غلظت فسفر در گیاهان مایه‌زنی شده با هر دو گونه قارچ را به گونه بسیار چشمگیری کاهش داد. کاربرد عنصر کادمیم به بخش هیفی گلدان‌ها مایه کاهش تقریباً ۵۰ درصدی در غلظت فسفر گیاهان میکوریزایی شد. در پژوهشی گزارش شد که بالا رفتن غلظت عناصر سنگین در خاک باعث کاهش توان هیف‌های بیرونی قارچ‌های میکوریزی در انتقال فسفر به گیاه میزبان می‌شود (۱۵).

در آزمایش انجام شده هم‌چنین کارایی هیف‌های قارچ در انتقال روی نیز بررسی شد. درباره عنصر روی باید یادآور شد که این عنصر در مقادیر کم یک عنصر ضروری و در مقادیر بالا به‌عنوان یک عنصر زهری برای گیاه به شمار می‌رود. همان‌گونه که در بررسی‌ها نشان داده شده است، هنگامی‌که غلظت این عنصر در خاک از حد بحرانی بالاتر می‌رود کاهش جذب روی در گیاهان میکوریزایی رخ می‌دهد(۴). اما دراین آزمایش با کاربرد غلظت بالای روی که معادل ۴۰۰ ppm بود افزون بر این که هیچ‌گونه کاهش در وزن خشک اندام هوایی گیاه دیده نشد با افزایش کاربرد عنصر روی در تیمارها جذب روی در اندام هوایی و ریشه گیاهان میکوریزایی در برابر گیاهان غیرمیکوریزایی به گونه چشمگیری افزایش یافت (جداول ۳ و ۴). شاید جداسازی محیط رشد ریشه از محیط رشد هیف و خاک آلوده در این آزمایش ریشه را از آسیب مستقیم عنصر روی جلوگیری کرده باشد و با ایجاد رابطه هم‌زیستی و رشد هیف‌های قارچ انتقال این عنصر توسط هیف‌ها در مقادیر لازم به گیاه میزبان انجام شده باشد. همان‌گونه که در مطالعات انجام شده در گلدان‌های چند بخشی نیز نتایج مشابهی درباره جذب روی به‌دست آمده است (۲و ۴).

با دقت به نتایج به‌دست آمده هم‌چنین مشخص شد که با کاربرد فسفر به همراه روی در تیمارها غلظت روی در اندام هوایی و ریشه گیاهان مایه‌زنی شده با هر دو گونه قارچ به مراتب کمتر شده است. این موضوع تا حدی به برهم‌کنش

جدول ۳. برهم کنش قارچ میکوریزا و عناصر کادمیم، روی و فسفر بر غلظت روی (میلی‌گرم در کیلوگرم) در اندام هوایی شبدر سفید

	تیمارهای عناصر					
ماده مایه‌زنی	C	P	Zn	Cd	ZnCd	PZnCd
NM	۵۲/۹ h	۵۳/۸ h	۵۳/۶ h	۵۰/۳ h	۵۶/۸ h	۵۳/۴ h
G. mosseae	۶۸/۲ fg	۶۹/۲ fg	۱۱۱/۹ c	۳۷/۲ i	۸۵/۷ e	۷۲/۷ f
G. intraradices	۶۳/۶ g	۷۰/۵ fg	۱۶۷/۳ a	۳۶/۷ i	۱۲۴/۳ b	۹۹/۴ d

ناهمانندی اعداد درون جدول با حروف یکسان در سطح اطمینان ۵٪ معنی‌دار نمی‌باشند.

جدول ۴. برهم کنش قارچ میکوریزا و عناصر کادمیم، روی و فسفر بر غلظت روی (میلی‌گرم در کیلوگرم) در ریشه گیاه شبدر سفید

	تیمارهای عناصر					
ماده مایه‌زنی	C	P	Zn	Cd	ZnCd	PZnCd
NM	۷۶/۰ fg	۷۵/۵ fg	۷۵/۰ fg	۷۷/۰ fg	۷۸/۰ fg	۷۹/۰ fg
G. mosseae	۷۸/۷ fg	۸۱/۰ f	۱۴۸/۵ c	۷۱/۵ g	۹۶/۸ e	۹۹/۷ de
G. intraradices	۶۴/۰ h	۷۸/۹ fg	۲۹۸/۶ a	۵۹/۹ h	۲۰۰/۵ b	۱۰۵/۷ d

ناهمانندی اعداد درون جدول با حروف یکسان در سطح اطمینان ۵٪ معنی‌دار نمی‌باشند.

موجود میان فسفر و روی بر می‌گردد. در پژوهش‌های بسیاری به برهم‌کنش میان فسفر و روی اشاره شده است اما هنگامی‌که این برهم‌کنش با تأثیر قارچ میکوریزا توأم می‌باشد موضوع پیچیده‌تر خواهد بود (۱۴و ۱۹). بعضی اوقات در اثر کاربرد فسفر جذب فسفرو روی هر دو افزایش می‌یابد و در مواردی فقط جذب فسفر زیاد شده و جذب روی محدود می‌شود. در واقع می‌توان گفت قارچ میکوریزا برای جذب عناصر کمیاب نظیر روی تعادل برقرار می‌کند. به‌طوری‌که در شرایط کمبود جذب عنصر روی زیاد و در شرایط بیشبود جذب این عنصر کم می‌شود. هم‌چنین با توجه به نتایج، غلظت روی در تمام تیمارها در ریشه گیاهان بیشتر از اندام هوایی بود. کمترین میزان غلظت روی در هر دو بخش ریشه و اندام هوایی گیاهان میکوریزایی در تیمار کادمیم اندازه‌گیری شد.

نتایج به‌دست آمده در مورد غلظت روی در نسبت ریشه به اندام هوایی گیاه شبدر در جدول ۵ نیز نشان داد که این نسبت در گیاهان مایه‌زنی شده با *G. mosseae* در سه تیمار شاهد، فسفر، روی و کادمیم در برابر گیاهان غیر میکوریزایی کاهش معنی‌داری نشان داد. به نظر می‌رسد در تیمارهای گفته شده غلظت بیشتر عنصر روی در اندام هوایی گیاهان میکوریزایی مایه این اختلاف شده است. با توجه به نتایج جدول ۵ هم‌چنین مشخص شد که کاربرد کادمیم به بخش هیفی گلدان‌ها مایه افزایش معنی‌دار غلظت روی در نسبت ریشه به اندام هوایی گیاهان مایه‌زنی شده با *G. mosseae* شد. به‌طوری‌که بیشترین غلظت روی در نسبت ریشه به اندام هوایی در این تیمار مشاهده شد. از طرفی در گیاهان مایه‌زنی شده با گونه *G. intraradices* نیز نتایج مشابهی به‌دست آمد. به‌طوری‌که غلظت روی در نسبت ریشه به اندام هوایی گیاهان میکوریزایی در سه تیمار شاهد، فسفر، فسفر و روی و کادمیم در برابر گیاهان غیر میکوریزایی کاهش معنی‌داری نشان دادند. بیشترین اندازه غلظت روی در مورد گیاهان مایه‌زنی شده با گونه

جدول ۵. برهم کنش قارچ میکوریزا و عناصر کادمیم، روی و فسفر بر غلظت روی (میلی‌گرم در کیلوگرم) در نسبت ریشه به اندام هوایی گیاه شبدر سفید

	تیمارهای عناصر					
ماده مایه‌زنی	C	P	Zn	Cd	ZnCd	PZnCd
NM	۱/۴ de	۱/۴ de	۱/۴ e	۱/۵ cde	۱/۴ e	۱/۵ cde
G. mosseae	۱/۲ fg	۱/۲ fg	۱/۳ ef	۱/۹ a	۱/۱ g	۱/۴ e
G. intraradices	۱/۰ g	۱/۱ g	۱/۸ ab	۱/۶ bc	۱/۶ bcd	۱/۱ g

ناهمانندی اعداد درون جدول با حروف یکسان در سطح اطمینان ۵٪ معنی‌دار نمی‌باشند.

جدول ۶. برهم کنش قارچ میکوریز و عناصر کادمیم، روی و فسفر بر غلظت کادمیم (میلی‌گرم در کیلوگرم) در اندام هوایی شبدر سفید

	تیمارهای عناصر					
ماده مایه‌زنی	C	P	Zn	Cd	ZnCd	PZnCd
NM	۵/۱ a	۵/۰ a	۵/۳ a	۵/۱ a	۵/۴ a	۵/۳ a
G. mosseae	۱/۱ de	۱/۷ c	۱/۳ cd	۵/۰ a	۵/۰ a	۳/۲ b
G. intraradices	۱/۳ cd	۱/۳ cd	۰/۶ e	۴/۸ a	۵/۰ a	۴/۸ a

ناهمانندی اعداد درون جدول با حروف یکسان در سطح اطمینان ۵٪ معنی‌دار نمی‌باشند.

G. intraradices در تیمار روی مشاهده شد.

نتایج آزمایش درباره کادمیم نیز به درستی نشان داد که‌قارچ میکوریزا باعث کاهش فراهمی این عنصر در شرایط سمیت برای گیاه می‌شود. بدین گونه که میزان کادمیم در اندام هوایی گیاهان میکوریزایی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. به‌طوری‌که کمترین غلظت کادمیم در اندام هوایی گیاهان مایه‌زنی شده با *G. intraradices* در تیمار عنصر روی اندازه‌گیری شد (جدول ۶). هرچند در مواردی که کادمیم به تیمارها کاربرد شده بود، کاهشی در غلظت کادمیم دیده نشد. به استثنا گیاهان مایه‌زنی شده با *G. mosseae* که با کاربرد فسفر به همراه کادمیم کاهش محسوسی در غلظت کادمیم اندام هوایی مشاهده شد. در مطالعات دیگر نیز به کاهش سمیت کادمیم توسط قارچ میکوریز اشاره شده است (۵ و ۲۸).

در این مطالعه هم‌چنین مشاهده شد که در ریشه گیاهان میکوریزایی غلظت کادمیم بسیار بالا بود. غلظت کادمیم ریشه در گیاهان مایه‌زنی شده با گونه *G. intraradices* در تمام تیمارها بیشتر از این غلظت درگیاهان مایه‌زنی شده با *G. mosseae* بود. به‌طوری‌که بیشترین غلظت کادمیم اندازه‌گیری شده مربوط به ریشه گیاهان مایه‌زنی شده با گونه *G. intraradices* در تیمار کادمیم بود (جدول ۷). این موضوع نشان می‌دهد که ریشه‌های کلونیزه شده با قارچ میکوریزا قابلیت بالایی در تثبیت و عدم انتقال کادمیم به اندام هوایی گیاهان دارند. به نظر می‌رسد با این راهکار قارچ میکوریزا گیاه را در مقابل اثرات مضر عنصر کادمیم حفاظت می‌کند(۱۲). در آزمایشی که تونین و همکاران روی جذب کادمیم توسط قارچ میکوریزا در گیاه شبدر انجام دادند قارچ میکوریزا موجب افزایش معنی‌دار غلظت کادمیم در ریشه‌های گیاه شبدر شد بدون این‌که تأثیری در غلظت کادمیم اندام هوایی بگذارد (۲۶).

نتایج به‌دست آمده از این آزمایش در جدول ۸، درباره غلظت بالای کادمیم در نسبت ریشه به اندام هوایی گیاهان

جدول ۷. برهم کنش قارچ میکوریزا و عناصر کادمیم، روی و فسفر بر غلظت کادمیم (میلی‌گرم در کیلوگرم) در ریشه شبدر سفید

	تیمارهای عناصر					
ماده مایه‌زنی	C	P	Zn	Cd	ZnCd	PZnCd
NM	۵/۷ i	۵/۵ i	۵/۹ i	۵/۲ i	۵/۴ i	۵/۹ i
G. mosseae	۱۰/۵ gh	۷/۰ hi	۷/۰ hi	۱۰۰/۶ b	۷۸/۷ d	۵۲/۰ e
G. intraradices	۱۸/۸ f	۲۱/۱ f	۱۳/۲ g	۱۶۲/۳ a	۸۵/۸ c	۸۴/۴ c

ناهمانندی اعداد درون جدول با حروف یکسان در سطح اطمینان ۵٪ معنی‌دار نمی‌باشند.

جدول ۸. برهم کنش قارچ میکوریزا و عناصر کادمیم، روی و فسفر بر غلظت کادمیم (میلی‌گرم در کیلوگرم) در نسبت ریشه به اندام هوایی گیاه شبدر سفید

	تیمارهای عناصر					
ماده مایه‌زنی	C	P	Zn	Cd	ZnCd	PZnCd
NM	۱/۱ g	۱/۱ g	۱/۱ g	۱/۰ g	۱/۰ g	۱/۱ g
G. mosseae	۱۰/۰ e	۴/۲ f	۵/۹ f	۲۰/۱ b	۱۵/۸ cd	۱۶/۳ cd
G. intraradices	۱۵/۰ d	۱۶/۸ cd	۲۱/۹ b	۳۴/۰ a	۱۷/۲ cd	۱۷/۶ c

ناهمانندی اعداد درون جدول با حروف یکسان در سطح اطمینان ۵٪ معنی‌دار نمی‌باشند.

میکوریزایی در برابر گیاهان غیرمیکوریزایی با دیگر مطالعات در این زمینه موافق است. نسبت کادمیم ریشه به اندام هوایی در گیاهان مایه‌زنی شده با گونه *G. mosseae* از ۱۰ تا ۲۰ برابر و درباره گونه *G. intraradices* از ۱۶ تا ۳۰ برابر بیشتر از گیاهان غیرمیکوریزایی اندازه‌گیری شد. بیشترین غلظت کادمیم در نسبت ریشه به اندام هوایی در گیاهان مایه‌زنی شده با هر دو گونه قارچ در تیمار کادمیم بود. در پژوهشی انجام شده بر روی جذب کادمیم در گیاه لوبیا این نسبت در گیاهان میکوریزایی ۲۰ برابر گیاهان غیرمیکوریزایی گزارش شد (۱). درآزمایشی دیگر بدون هیچ‌گونه کاهشی در عملکرد گیاهان غلظت کادمیم در ریشه‌های شبدر میکوریزایی ۸ برابر ریشه‌های غیرمیکوریزایی اندازه‌گیری شد (۲۶).

نتیجه‌گیری

براساس نتایج به‌دست آمده به نظر می‌رسد با توجه به تأثیر قارچ میکوریزا در عدم انتقال عناصر سنگین به‌خصوص کادمیم از ریشه به اندام هوایی گیاه شبدر و تثبیت این عنصر در ریشه گیاه می‌توان دربرنامه مدیریت خاک‌های مناطق آلوده از این قارچ استفاده نمود. همان‌گونه که در مطالعات انجام شده نیز به نقش این قارچ در تثبیت عناصر در ریشه گیاهان و کاهش توسعه آلودگی در خاک اشاره شده است (۸ و ۱۰). هم‌چنین با به‌کارگیری گونه‌های مقاوم قارچ میکوریزا و بررسی هم‌زیستی موجود میان این قارچ با گونه‌های مختلف گیاهی می‌توان در احیای اکوسیستم‌های تخریب شده از این قارچ استفاده نمود (۲۳). پیشنهاد می‌شود این آزمایش در شرایط خاک‌های قلیایی و اسیدی نیز انجام شود تا فراهمی عناصر و انتقال آنها در این شرایط نیز مورد بررسی قرار گیرد. هم‌چنین مکانیسم‌های احتمالی در کاهش فراهمی برخی عناصر از قبیل فرآیند رسوب عناصر سنگین توسط گرانول‌های پلی فسفات موجود در هیف مورد توجه بیشتر قرار گیرند.

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد به خاطر تأمین امکانات مالی تحقیق و از همکاران گروه علوم خاک به خاطر تهیه مواد آزمایشگاهی تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Andrade, S. A. L., R. A. Jorge and A. P. D. Silveira. 2005. Cadmium effect on the association of jackbean (*Canavalia ensiformis*) and arbuscular mycorrhizal fungi. Agric. Sci. 62: 389-394.
2. Cavagnaro, T. R., S. Dickson and F. A. Smith. 2010. Arbuscular mycorrhizas modify plant responses to soil zinc addition. Plant and Soil 329: 307-313.
3. Chen, B. D., X. L. Li and P. Christie. 2001. A modified glass bead compartment cultivation system for studies on nutrient and trace metal uptake by arbuscular mycorrhiza. Chemosphere 42: 185-192.
4. Chen, B. D., X. L. Li, H. Q. Tao, P. Christie and M. H. Wong. 2003. The role of arbuscular mycorrhiza in zinc uptake by red clover growing in a calcareous soil spiked with various quantities of zinc. Chemosphere 50: 839–846.
5. Chen, B. D., Y. Liu, H. Shen, X. L. Li and P. Christie. 2003. Uptake of cadmium from an experimentally contaminated calcareous soil by arbuscular mycorrhizal maize (*Zea mays* L.). Mycorrhiza 14: 347-354.
6. Feddermann, N., F. Roger, T. Boller and M. Elfstrand. 2010. Functional diversity in arbuscular mycorrhiza – the role of gene expression, phosphorous nutrition and symbiotic efficiency. Fungal Ecol. 3: 1-8.
7. Gaur, A. and A. Adoholeya. 2004. Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. Current Sci. 86: 528-534.
8. Hildebrandt, U., M. Regvar and H. Bothe. 2007. Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance. Phytochemistry 68: 139-146.
9. Janoušková, M. and D. Pavlíková. 2010. Cadmium immobilization in the rhizosphere of arbuscular mycorrhizal plants by the fungal extraradical mycelium. Plant and Soil 332:511-520.
10. Janoušková, M., D. Pavlíková and M. Vosátka. 2006. Potential contribution of arbuscular mycorrhiza to cadmium immobilisation in soil. Chemosphere 65: 1959-1965.
11. Jansa, J., R. Finlay, H. Wallander, F. Smith and E. Smith. 2011. Role of mycorrhizal symbioses in phosphorus cycling. Soil Biol. 100: 137-168.
12. Joner, E. J. and C. Leyval. 1997. Uptake of 109Cd by roots and hyphae of a *Glomus mosseae* / *Trifolium subterraneum* mycorrhiza from soil amended with high and low concentrations of cadmium. New Phytol. 135: 353–360.
13. Joner, E. J., C. Leyval and R. Briones. 2000. Metal binding capacity of arbuscular mycorrhizal mycelium. Biol. and Fertil. Soils 226: 227–234.
14. Lambert, D. H., D. E. baker and H. Cole. 1979. The role of mycorrhizas in the intractions of phosphorus with Zinc, Copper and other elements. Soil Sci. Soc. Am. J. 43: 976-980.
15. Lee, Y. J. and E. George. 2005. Contribution of mycorrhizal hyphae to the uptake of metal cations by cucumber plants at two levels of phosphorus supply. Plant and Soil 278: 361–370.
16. Li, X. L. and P. Christie. 2001. Changes in soil solution Zn and pH and uptake of Zn by arbuscular mycorrhizal red clover in Zn contaminated soil. Chemosphere 42: 201–207.
17. Li, X. L., E. George, H. Marschner and J. L. Zhang. 1997. Phosphorus acquisition from compacted soil by hyphae of a mycorrhizal fungus associated with red clover (*Trifolium pretense*). Can. J. Bot. 75: 723–729.
18. Liang, C., T. Li, Y. Xiao and M. Liu. 2009. Effects of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi on maize grown in multi-metal contaminated soils. Intl. J. Phytoremed. 11: 692-703
19. Lin, A., C. Hamel, R. I. Hamilton, B. L. Ma and D. L. Smith. 2000. Acqusition of Cu, Zn, Mn and Fe by mycorrhizal maize (*Zea mays* L.) grown in soil at different P and micronutrient levels. Mycorrhiza 9: 331-336.
20. Neumann, E. and E. George. 2004. Colonisation with the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* (Nicol. and Gerd.) enhanced phosphorus uptake from dry soil in *Sorghum bicolor (L.).* Plant and Soil 261: 245–255.
21. Rayan, J. R., G. Estefan and A. Rashid. 2001. Soil and plant analysis laboratory manual. 2nd ed., ICARDA. Syria.
22. Richards, L. A. 1954. diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA. Agriculture hand book. No: 60. Washington.
23. Shetty, K. G., B. A. D. Hetrick and A. P. Schwab. 1995. Effects of mycorrhizae and fertilizer amendments on zinc tolerance of plants. Environ. Pollut. 88: 307–314.

24. Siddiqui, Z. A., M. S. Akhtar and K. Futai. 2008. Mycorrhizae: Sustainable Agriculture and Forestry. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany.
25. Tao, H. Q. 1997. Effect of arbuscular mycorrhiza on resistance of red clover to heavy metal Zn and Cd pollution, MS thesis, China Agricultural University, Beijing.
26. Tonin, C., P. Vandenkoornhuyse, E. J. Joner, J. Straczek and C. Leyval. 2001. Assessment of arbuscular mycorrhizal fungi diversity in the rhizosphere of Viola calaminaria and effect of these fungi on heavy metal uptake by clover. Mycorrhiza10: 161–168.
27. Tullio, M., F. Pierandrei, A. Salerno and E. Rea. 2003. Tolerance to cadmium of vesicular arbuscular mycorrhizae spores isolated from a cadmium-polluted and unpolluted soil. Biol. and Fertil. Soils 37: 211–214.
28. Weissenhorn, I., C. Leyval, G. Belgy and J. Berthelin. 1995. Arbuscular mycorrhizal contribution to heavy metal uptake by maize (*Zea mays* L.) in pot culture with contaminated soil. Mycorrhiza 5: 245–251.
29. Zhu, Y., P. Christie and A. S. Laidlaw. 2001. Uptake of Zn by arbuscular mycorrhizal white clover from Zn-contaminated soil. Chemosphere 42: 193–199.

Contribution of External Hyphae of Arbuscular Mycorrhizal Fungi to Transfer Cadmium, Zinc and Phosphorus to White Clover

A. Madani*, A. Lakzian, GH. Haghnia and R. Khorasani [1]

(Received : June 8-2011 ; Accepted : Jan. 17-2012)

Abstract

Mycorrhizal fungus colonization of roots may modify plant metal acquisition. In order to study the role of external hyphae of mycorrhizal fungi in metals transferring, the root and hyphal growth zone were separated by 30 µm nylon meshes. Plants were inoculated with *G. mosseae* and *G. intraradices* and grown in the root compartment. Six combinations of metals (400 mg of Zn, 25 mg of Cd, 400 mg of Zn + 25 mg of Cd, 50 mg P, 50 mg of P+ 400 mg of Zn + 25 mg of Cd, and no metal kg^{-1} soil sample) were added to the hyphal compartments. This experiment was carried out as a completely randomized design (CRD) with factorial arrangement in three replications. The results showed that dry shoot weight and phosphorus concentration in mycorrhizal treatments increased significantly compared with non mycorrhizal treatments. of the two fungal species, *G. mosseae* had more effect on phosphorus concentration in white clover plant. AM fungi increased the Zn concentration in shoot and root of white clover. AM fungi also significantly increased cadmium concentration in root of mycorrhizal treatments compared to non mycorrhizal plants. of the two fungal species, *G. intraradices* accumulated more cadmium in clover roots. ALL in all the results demonstrated that AM fungi increased phosphorus and Zn transferring to the shoots while cadmium transferring was decreased by stabilizing in the roots.

Keywords: Cadmium, Zinc, Phosphorus, *G. mosseae*, *G. intraradices*

1. Dept. of Soil Sci., College of Agric., Ferdowsi Univ. of Mashhad, Mashhad, Iran.
*: Corresponding Author, Email: madani.aida@yahoo.com