نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار
جلد ششم، شماره اول، ۱۳۹۵
http://ejsms.gau.ac.ir

تأثیر قارچ میکوریزا– آربوسکولار بر گیاه‌پالایی کادمیم توسط گل جعفری زینتی (*Tagetes erecta*)

زهرا شکری[۱]، *ناصر برومند[۲]، مهدی سرچشمه‌پور[۳] و حمیدرضا علیزاده[۴]

[۱]دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه جیرفت، [۲]استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه جیرفت،
[۳]استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، [۴]استادیار گروه گیاه‌پزشکی، دانشگاه جیرفت

تاریخ دریافت: ۹۴/۱/۳۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۱۶

چکیده

سابقه و هدف: گیاه‌پالایی یک روش زیستی است که در آن از گیاهان مختلف برای از بین بردن آلودگی محیطی از جمله آلودگی ناشی از تجمع عناصر سمی مانند کادمیم، مس، سرب، کروم و غیره در خاک استفاده می‌کنند. گیاهانی که توان بالایی در جذب عناصر سنگین و آلاینده‌ها دارند برای این روش مشخص و معرفی می‌گردند. شناسایی گیاهانی که مصرف خوراکی ندارند یا اندام‌های غیرخوراکی که ذخیره‌ای هستند در گیاه‌پالایی از اهمیت بیش‌تری برخوردار است. همزیستی قارچ‌های میکوریزی به افزایش جذب و انتقال عناصر سنگین با تحرک کم و همچنین عناصر کم‌مصرف کمک می‌کند. هدف از این پژوهش بررسی توان گل جعفری در جذب و انتقال عنصر کادمیوم و در نتیجه توان گیاه‌پالایی این گیاه زینتی و همچنین نقش همزیستی میکوریز در جذب و پالایش این عنصر بوده است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش مایه تلقیح میکوریزا آربوسکولار از طریق جداسازی قارچ از ریشه گل جعفری تهیه و تکثیر آن با گیاهان شبدر و سورگوم در شرایط گلخانه‌ای انجام شده و تأثیر همزیستی قارچ میکوریزا آربوسکولار بر غلظت و انتقال کادمیم از ریشه به اندام هوایی در گل جعفری در شرایط گلخانه‌ای بررسی گردید. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی با پنج سطح کادمیم (۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک) با استفاده از نمک کلرید کادمیم ($CdCl_2.H_2O$) و دو سطح میکوریزا (با و بدون میکوریزا) با چهار تکرار انجام شد.

یافته‌ها: نتایج آزمایش نشان داد که غلظت کادمیم در اندام هوایی بین ۳/۹۱ تا ۹۴/۹ و در ریشه بین ۴/۲۳ تا ۱۵۱میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بوده که در غلظت بالا باعث ایجاد سمیت در گیاه شد. علائم سمیت در گیاهان غیرمیکوریزی شدت بیش‌تری نشان داد. همچنین تأثیر میکوریز و آلودگی کادمیوم بر فاکتورهای رشد و جذب کادمیوم در ریشه و جذب فسفر در ریشه و اندام هوایی معنی‌دار گردید و همزیستی میکوریز باعث تجمع بیش‌تر عنصر کادمیوم در ریشه و کاهش نسبی انتقال آن به اندام هوایی گیاه گردید. از طرفی اثرات متقابل قارچ مایکوریز و کادمیوم در تمامی صفات اندازه‌گیری شده (به‌استثنای شاخص کلرفیل) معنی‌دار گردید.

نتیجه‌گیری: در مجموع یافته‌های این پژوهش نشان داد که تلقیح گل جعفری با میکوریزا سبب انتقال بیش‌تر عناصر مانند فسفر به اندام هوایی گیاه شد، همچنین سبب تثبیت و تجمع بیش‌تر عنصر کادمیم در بخش ریشه‌ای گیاه گردید. بهبود قابل‌توجه شاخص کلروفیل و شاخص‌های رشد از اثرات دیگر میکوریز در شرایط آلودگی در گیاه جعفری است.

واژه‌های کلیدی: میکوریزا، انتقال، فلزات سنگین، گل‌های زینتی

* مسئول مکاتبه: nbroomand@yahoo.com

مقدمه

افزایش جذب سطوح بالای فلزات سنگین خاک توسط گیاهان از طریق مکانیسم‌های مختلفی صورت می‌گیرد. برقراری رابطه همزیستی میکوریزی از جمله این مکانیسم‌ها است که با افزایش قدرت تحمل گیاه به تنش فلزات سنگین، منجر به پاکسازی خاک‌های آلوده می‌گردد. قارچ‌های میکوریز آربوسکولار گروه مهمی از قارچ‌های میکوریزی هستند که توان برقراری رابطه همزیستی با ۸۰٪ گیاهان را دارند (۳۳). گیاهان منابع کربن مورد نیاز قارچ را در اختیار آن قرار می‌دهند و قارچ با داشتن توانایی در جذب آب و عناصر غذایی از خاک، گیاه را حمایت می‌کند. هیف‌های قارچی باعث سرعت بخشیدن به بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه می‌شوند که همین باعث می‌شود گیاه در برابر تنش‌های زنده و غیرزنده مقاومت داشته باشد (۲۲). مکانیسم‌هایی که قارچ میکوریز آربوسکولار به‌وسیله آن‌ها کاهش تنش فلزات سنگین را در گیاهان اعمال می‌کند شامل کلات شدن و بی‌تحرکی فلزات سنگین در میسلیوم‌های خارجی، بهبود تغذیه معدنی به‌ویژه فسفر، تغییر pH ریزوسفر و غیره می‌باشد (۸، ۱۵). در بررسی اثر قارچ‌های میکوریزی بر روی گیاه لوبیا در خاک‌های آلوده به عنصر کادمیم پژوهشگران نشان دادند که با افزایش کادمیم به خاک، زیست‌توده و رشد ریشه گیاه کاهش یافت ولی در حضور قارچ‌های میکوریزی فلز کادمیم نتوانست اثر منفی معنی‌داری بر زیست‌توده گیاه داشته باشد (۴). در همین آزمایش عنصر کادمیم فعالیت فتوسنتزی گیاه لوبیا را کاهش داد و این کاهش در گیاهان میکوریزی ۱۵-۳۱٪ و در گیاهان غیرمیکوریزی ۶۲-۷۶٪ گزارش شد. رضوانی و همکاران (۲۰۱۱) دریافتند که تلقیح میکوریزا به سویا باعث افزایش ۶۰ درصدی جذب فسفر در مقایسه با گیاه شاهد شد (۳۱). اسماعیل‌پور و امانی (۲۰۱۴) تأثیر تلقیح گیاه کاهو با قارچ میکوریزا بر عناصر درشت مغذی نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم را مثبت ارزیابی کردند (۱۲).

گل‌های جعفری *Targets erecta* از خانواده *Asteraceae* (از تیره کمپوزه یا مرکبه) هستند که یک گیاه علفی معطر، با برگ‌های قطعه قطعه پر مانند و معمولاً در فضای سبز شهرها کشت می‌شود (۳). گل جعفری یک گل زینتی در دسترس در بسیاری مناطق دنیا هست (۲۶، ۳۵) و به‌عنوان یک گیاه با پتانسیل بالا برای گیاه پالایی مناطق آلوده به آرسنیک پیشنهاد شده است (۷). دیگر مطالعات همچنین نشان داد که گل جعفری پتانسیل بالایی برای گیاه پالایی کادمیم با سطوح کادمیم متفاوت از ۰/۶ تا ۶۸/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک دارد (۲۵). گل‌های جعفری زینتی به‌دلیل داشتن ریشه‌های میکوریزی هم از لحاظ زیبایی فضای سبز و هم از لحاظ پاکسازی محیط زیست به‌عنوان یک گیاه زیست پالا از اهمیت بالایی برخوردار هستند.

امروزه برای حل معضل اثرات سمی عناصر سنگین در خاک از روش‌های بیولوژیک مثل گیاه‌پالایی و همزیستی ریشه گیاهان زینتی با میکروارگانیسم‌ها استفاده می‌کنند که در کشور ما در این زمینه پژوهش‌های ناچیزی صورت گرفته است. هدف از پژوهش حاضر بررسی رفتار همزیستی قارچ میکوریزا- آربوسکولار با گل جعفری زینتی در غلظت‌های بالای کادمیم در خاک بود که با اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک گیاهی و غلظت کادمیم و فسفر در ریشه و اندام هوایی انجام پذیرفت.

مواد و روش‌ها

قارچ میکوریزی: این پژوهش در شرایط آزمایشگاه و گلخانه انجام شد. نمونه‌برداری از ریشه و خاک اطراف گل جعفری از مناطق مورد مطالعه (منطقه جیرفت و عنبرآباد) و همچنین مناطق آلوده به فلزات سنگین در منطقه سرچشمه رفسنجان انجام شد. تعیین درصد کلنیزاسیون ریشه به روش گیوانتی و موس (۱۹۸۰)، تعیین مقادیر EC در عصاره گل اشباع (۳۲)، pH در گل اشباع (۲۸) و بافت خاک به روش هیدرومتری اندازه‌گیری شد (۵).

برای تولید مایه تلقیح میکوریزا ابتدا تعداد ۳۹ نمونه گل جعفری از مناطق ذکر شده جمع‌آوری گردید و پس از تعیین درصد میکوریزی ریشه‌ها، از این تعداد ۲ نمونه که درصد کلنیزاسیون بالایی داشتند، انتخاب و با گیاهان سورگوم و شبدر که به‌دلیل دارا بودن دوره رشد مناسب و گستردگی ریشه در خاک، به‌عنوان گیاهان میزبان جهت تکثیر مایه تلقیح قارچی، کشت گردیدند. داخل گلدان‌های ضدعفونی شده با الکل ۷۰٪ مخلوطی از شن و خاک استریل (با نسبت ۳ به ۱) ریخته شد. به مقدار ۱۰۰ گرم از ریشه‌های میکوریزی با درصد بالا به‌صورت یک تا چند لایه به گلدان‌ها اضافه شد. بذرهای جوانه زده شبدر و سورگوم که قبلاً ضدعفونی (به‌وسیله هیپوکلریدسدیم ۱/۵ درصد به‌مدت ۲ دقیقه و نیز الکل ۷۰٪) شده‌اند، داخل گلدان‌ها کشت گردیدند. بعد از رشد کافی در طی ۴۵ روز، گیاهان برداشت شده و پس از تعیین درصد کلنیزاسیون ریشه‌ها، نمونه‌ای که دارای بیش‌ترین درصد بود، انتخاب گردید. خاک، هیف‌ها، اسپورها و ریشه‌های میکوریزی درون آن به‌عنوان مایه تلقیح (جمعیت) برای کشت اصلی استفاده شد.

آماده‌سازی خاک و اعمال تیمارهای آزمایشی و کاشت گیاه: نمونه‌برداری خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری انجام شد. خاک از الک ۴ میلی‌متری گذرانده و در اتوکلاو (دمای ۱۲۱ درجه و فشار ۱۵ اتمسفر به‌مدت ۲۰ دقیقه) سترون گردید. سطوح کادمیم شامل صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک به‌صورت ساخت محلول‌های آبی به خاک اضافه شد. برای رسیدن به حالت تعادل، یک ماه در کیسه‌های پلاستیکی با حفظ رطوبت FC نگهداری شد.

تهیه گیاهچه و انتقال به گلدان و برداشت گیاه: بذرهای خریداری شده در مخلوطی از خاک و پیت ماس به نسبت ۴:۱ کشت شد. گیاهان مطلوب و یک شکل در مرحله ۴ برگی انتخاب و به گلدان‌های اصلی منتقل شدند. برای انجام تیمارهای قارچ میکوریزا آربوسکولار، به مقدار ۱۰۰ گرم به خاک هر گلدان اضافه و نشا به داخل گلدان منتقل شد. برای گیاهان شاهد همان مقدار مایه تلقیح استریل شده در اتوکلاو اضافه گردید. بعد از رشد مطلوب تعداد آن‌ها به ۴ گیاهچه در هر گلدان کاهش داده شد. در طی دوره رشد برای رسیدن به حالت تعادل میزان رطوبت خاک در حد FC نگه داشته شد (۱). برای ایجاد یکنواختی جای گلدان‌ها هر ده روز یکبار جابجا گردید. پس از رشد گیاهان طی یک دوره ۱۰۰ روزه، برداشت اندام هوایی و ریشه گیاهان به‌طور جداگانه انجام شد.

طرح آزمایش و تجزیه آماری: این آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کامل تصادفی در چهار تکرار انجام شد فاکتورهای مورد مطالعه پنج سطح کادمیم (۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک) و دو تیمار قارچ (میکوریزا و بدون میکوریزا) بودند. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها

با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک و پنج درصد با نرم‌افزار SAS و MSTATC و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel انجام شد.

اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک گیاهی: اندازه‌گیری شاخص کلروفیل برگ‌ها توسط دستگاه کلروفیل‌سنج (Spad-502plus) قبل از برداشت گیاهان، پس از ۸۵ روز انجام گرفت. پس از برداشت گیاهان و شست‌شوی ریشه توسط آب مقطر، اندام هوایی و ریشه جدا گردید سپس وزن تر نمونه‌ها توسط ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. مقداری ریشه برای تعیین درصد کلنیزاسیون جدا کرده و به روش ذکر شده درصد کلنیزاسیون در ریشه اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها در پاکت کاغذی پیچیده شده و به‌مدت ۴۸ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. سپس جرم خشک نمونه‌ها توسط ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. نمونه‌های گیاهی به روش خشک سوزانی (اسید کلریدریک ۲ نرمال) هضم شد و اندازه‌گیری کادمیم با استفاده از دستگاه جذب اتمی (Analyst 400)، (۳۶) و فسفر به روش رنگ‌سنجی وانادات- مولیبدات، (۹) با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر ($T80^+$) انجام گرفت.

محاسبه مقدار کارایی گیاه در انتقال کادمیم از ریشه به اندام هوایی: برای تعیین کارایی گیاه در انتقال کادمیم از ریشه به اندام هوایی از رابطه زیر استفاده شد (۱۳).

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

نتایج و بحث

میزان کلنیزاسیون ریشه توسط قارچ‌های میکوریزا: تأثیر سطوح کادمیم و میکوریزا و اثرات متقابل آن‌ها بر درصد کلنیزاسیون در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۱). افزایش کادمیم باعث کاهش معنی‌دار میانگین درصد کلنیزاسیون گردید، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار کلنیزاسیون مربوط به صفر و ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک به‌ترتیب با ۴۶/۲ و ۱۸/۶ درصد بود، که تقریباً ۲/۵ برابر نسبت به سطح شاهد کاهش پیدا کرده است. پژوهش‌های انجام گرفته توسط آندرید و همکاران (۲۰۰۴) بر روی گیاه سویا نیز نشان داد که افزایش عنصر کادمیم سبب کاهش درصد کلنیزاسیون قارچ‌های میکوریزی در ریشه و تعداد اسپور قارچ هم در مرحله گلدهی و هم در مرحله نهایی رشد سویا می‌شود (۲). این نتایج با یافته‌های ویسن‌هورن و همکاران (۱۹۹۵) در بررسی تأثیر قارچ‌های میکوریزی بر گیاه ذرت در پالایش خاک‌های آلوده به فلز کادمیم هم‌خوانی دارد (۳۷). با افزایش سطوح کادمیم خاک تأثیر تیمار میکوریزا کاهش یافت به‌عبارت دیگر کادمیم، کلنیزاسیون قارچ‌های میکوریزا را کاهش می‌دهد.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برخی صفات اندازه‌گیری شده گل جعفری تلقیح شده با میکوریزا تحت شرایط تنش فلز سنگین کادمیم.

Table 1. Results of some of the measured traits in marigold inoculated with mycorrhiza under the stress of cadmium.

کلنیزاسیون Colonization	وزن خشک ریشه Weight of dry root	وزن خشک اندام هوایی Weight of dry shoot	ارتفاع بوته Hight of plant	درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییرات Sources of variance
10701**	1.97**	21.7**	89.5**	1	قارچ میکوریز (M) Mycorrhizal fungi
209**	0.581**	3.10**	0.45.2**	4	کادمیم (D) Cadmium
209**	0.091**	0.101**	14.0**	4	D*M
2.41	0.004	0.024	0.506	30	خطا Error
9.47	13.1	11.9	4.27		(CV%)

ns، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

ns, * and ** non/significance in the level of 1 and 5 percent, respectively.

جدول ۲- مقایسه میانگین اثرات متقابل سطوح کادمیم و تیمار میکوریزا بر برخی صفات اندازه‌گیری شده در گیاه گل جعفری.

Table 2. Mean comparison of the mutual effect of cadmium level and mycorrhizal treatment on some of the measured traits in marigold plant.

سطح کادمیم cadmium level					تلقیح میکوریز mycorrhizal inocculation	صفت trait
Cd_5	Cd_4	Cd_3	Cd_2	Cd_1		
11.8^{bc}	12.1^{b}	12.7^{b}	12.9^{b}	14.6^{a}	+	ارتفاع بوته (cm)
5.37^{f}	7.7^{e}	10.1^{d}	10.9^{cd}	15.2^{a}	-	hight of plant
1.32^{e}	1.72^{d}	1.96^{cd}	2.28^{b}	2.96^{a}	+	وزن خشک اندام هوایی
0.121^{c}	0.211^{bc}	0.283^{b}	0.605^{a}	1.68^{a}	-	(g pot^{-1}) weight of dry shoot
0.285^{c}	0.601^{b}	0.725^{b}	1.04^{a}	1^{a}	+	وزن خشک ریشه
0.083^{e}	0.122^{d}	0.241^{c}	0.322^{b}	0.721^{a}	-	(g pot^{-1}) weight of dry root
18.6^{d}	27.9^{c}	34.9^{b}	35.9^{b}	46.2^{a}	+	درصد کلنیزاسیون
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	Colonization percentage

میانگین‌های مربوط به اثرات متقابل هر صفت که دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک هستند فاقد تفاوت معنی‌دار به روش آزمون دانکن در سطح یک درصد می‌باشند (Cd_1، Cd_2، Cd_3، Cd_4، Cd_5 به‌ترتیب سطوح ۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک و + و – به‌ترتیب تلقیح میکوریز و بدون میکوریز می‌باشد).

Means of the mutual effects which have at least one letter in common were not significant using Duncan test at 1% level (Cd_1, Cd_2, Cd_3, Cd_4, Cd_5 show levels of 0, 100, 200, 400 and 800, mg cadmium Kg^{-1} soil and +,- are inoculation with and without mycorrhizal, respectively).

ارتفاع گیاه، وزن خشک اندام هوایی و ریشه: تأثیر سطوح کادمیم و میکوریزا و اثرات متقابل آن‌ها بر ارتفاع گیاه، وزن خشک اندام هوایی و ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۱). ارتفاع بوته‌ها در تیمار میکوریزی و تیمارهای شاهد با افزایش غلظت فلز کادمیم روند کاهشی داشتند با این تفاوت که روند کاهشی در گیاهان بدون میکوریزا شدیدتر بود. در تیمارهای میکوریزی کم‌ترین ارتفاع گیاه مربوط به سطح ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک با میانگین ارتفاع ۱۱/۹ سانتی‌متر بود که ۱۲۳ درصد نسبت به سطح شاهد (صفر میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک) کاهش داشت. در تیمارهای بدون میکوریزا کم‌ترین ارتفاع گیاه مربوط به سطح ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک با میانگین ارتفاع ۵/۳۷ سانتی‌متر بود که ۲۸۲ درصد نسبت به سطح شاهد کاهش نشان داد (جدول ۲).

در تیمارهای میکوریزی میانگین وزن خشک اندام هوایی از ۲/۹۶ گرم در سطح شاهد به ۱/۳۲ گرم در گلدان در سطح ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک رسید که ۱۶۴ درصد کاهش داشت و در تیمارهای بدون میکوریزا میانگین وزن خشک اندام هوایی از ۱/۶۸ در سطح شاهد به ۰/۱۲ گرم در گلدان در سطح ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک رسید که ۱۴ برابر کاهش یافت (جدول ۲). وزن خشک ریشه در تیمارهای میکوریزی از ۱ در سطح شاهد به ۰/۲۸ گرم در گلدان در سطح ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک رسید که ۳/۵۷ برابر کاهش نشان داد. در تیمارهای بدون میکوریزا وزن خشک ریشه از ۰/۷۲ در سطح شاهد به ۰/۰۸ گرم در گلدان در سطح ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک رسید که ۹ برابر کاهش داشته است (جدول ۲). این نتایج با یافته‌های هورست (۲۰۰۴) و همچنین هگداز و همکاران (۲۰۰۱) در بررسی تجمع کادمیم در گیاهان میکوریزی مطابقت دارد (۱۹، ۱۸). بررسی‌ها نشان می‌دهد که فلز کادمیم بر تقسیم و رشد سلول‌ها، رشد کلی گیاه، تقسیم سلولی منطقه مریستمی و تنظیم رشد و نمو گیاهان اثر می‌گذارد (۱۰). همچنین مطالعات نشان می‌دهد که فلزات سنگین مانند کادمیم، نیکل و روی باعث بروز ناهنجاری‌های کروموزومی شده و در نتیجه باعث کاهش رشد گیاه می‌گردد (۲۹). افزایش غلظت کادمیم باعث کاهش در وزن خشک ریشه و بخش هوایی گردید، کاهش رشد ناشی از سمیت کادمیم، به‌علت کاهش فتوسنتز و تنفس، کاهش متابولیسم کربوهیدرات‌ها و ایجاد کلروز که منجر به کاهش رشد و به دنبال آن توده زنده نیز کاهش می‌یابد (۱۶). از طرفی افزایش وزن خشک گیاهان میکوریزی را می‌توان به توان بالای جذب و انتقال عناصر غذایی از جمله فسفر به کمک هیفه‌های بیرونی قارچ نسبت داد (۲۱).

غلظت کادمیم اندام هوایی و ریشه: با افزایش سطح کادمیم در خاک غلظت کادمیم در اندام هوایی گیاه افزایش یافت، تأثیر سطوح کادمیم و اثرات متقابل آن‌ها بر غلظت کادمیم اندام هوایی در سطح یک درصد معنی‌دار گردید. افزودن مایه‌تلقیح میکوریز باعث افزایش نه درصدی غلظت کادمیم در اندام هوایی نسبت به گیاهان بدون میکوریزا گردید اما این افزایش در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار نبود (جدول ۳). افزایش کادمیم باعث افزایش معنی‌دار

میانگین غلظت کادمیم اندام هوایی گردید، به این صورت که در تیمارهای میکوریزی میانگین غلظت کادمیم اندام هوایی از ۴/۴۹ در سطح شاهد به (mg kg^{-1}) ۹۵/۰ در سطح ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک رسید و در تیمارهای بدون میکوریزا میانگین غلظت کادمیم اندام هوایی از ۳/۹۱ در سطح شاهد به (mg kg^{-1}) ۷۱/۲ در سطح ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک رسیده بود (جدول ۴).

تأثیر سطوح کادمیم و میکوریزا و اثرات متقابل آن‌ها بر میزان غلظت کادمیم ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۳). با توجه به نتایج مقایسه میانگین، در تیمارهای میکوریزی میانگین غلظت کادمیم ریشه از ۳۳/۲ در سطح شاهد به (mg kg^{-1}) ۱۵۱ در سطح ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک رسید که ۴/۵ برابر افزایش داشته و در تیمارهای بدون میکوریزا میانگین غلظت کادمیم ریشه از ۴/۲۳ در سطح شاهد به (mg kg^{-1}) ۲۸۱ در سطح ۲۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک رسیده بود و به‌دلیل مقاومت کم‌تر گیاه در سطوح بالاتر کادمیم، در گیاهان غیرمیکوریزی جذب کاهش یافت و در سطح ۴۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک به مقدار ۵۳/۶ و در تیمار ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک به مقدار ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در گیاه رسید (جدول ۴).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برخی صفات اندازه‌گیری شده گل جعفری تلقیح‌شده با میکوریزا تحت شرایط تنش فلز سنگین کادمیم.

Table 3. Results of some of the measured traits in marigold inoculated with mycorrhiza under the stress of cadmium.

منابع تغییرات Sources of variance	درجه آزادی Degree of freedom	کادمیم اندام هوایی Cadmium of shoot	کادمیم ریشه Cadmium of root	فسفر اندام هوایی Phosphore of shoot	فسفر ریشه Phosphore of root	شاخص کلروفیل Chlorophyll level	فاکتور انتقال Transfer factor
قارچ میکوریز (M) mycorrhizal fungi	1	141^{ns}	11556**	1391**	1482**	8439**	6.05**
کادمیم Cadmium (D)	4	7547**	8925**	497**	366**	373**	4.08**
D*M	4	356**	11715**	60**	45**	15.5^{ns}	2.92**
خطا error	30	38.4	331	10	2	55.6	0.021
(CV%)		15.2	24.9	20.9	11.7	22.6	20.4

^{ns}، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

^{ns}, * and ** non/significance in the level of 1 and 5 percent, respectively.

جدول ٤- مقایسه میانگین اثرات متقابل سطوح کادمیم و تیمار میکوریزا بر برخی صفات اندازه‌گیری شده در گیاه گل جعفری.

Table 4. Mean comparison of the mutual effect of cadmium level and mycorrhizal treatment on some of the measured traits in marigold.

سطح کادمیم Cadmium level					تلقیح میکوریز Mycorrhizal inocculation	صفت Trait
Cd_5	Cd_4	Cd_3	Cd_2	Cd_1		
94.9^{a}	63.8^{c}	25.3^{ef}	23.4^{f}	4.49^{g}	+	کادمیم اندام هوایی (mg kg^{-1}) Cadmium of shoot
71.2^{b}	53.9^{d}	33.3^{e}	30.9^{ef}	3.91^{g}	-	
151^{a}	128^{a}	84.7^{b}	51.1^{c}	33.9^{cd}	+	کادمیم ریشه (mg kg^{-1}) Cadmium of root
10.5^{d}	53.5^{c}	128^{a}	82.7^{b}	4.23^{d}	-	
0.088^{c}	0.130^{b}	0.263^{ab}	0.232^{ab}	0.248^{ab}	+	فسفر اندام هوایی (٪) Phosphore of shoot
0.001^{d}	0.006^{d}	0.056^{c}	0.132^{b}	0.155^{b}	−	
0.141^{cd}	0.190^{bc}	0.171^{bc}	0.219^{b}	0.354^{a}	+	فسفر ریشه (%) Phosphore of root
0.007^{e}	0.017^{e}	0.103^{d}	0.167^{bc}	0.191^{bc}	-	
0.624^{cd}	0.523^{cde}	0.294^{ef}	0.462^{de}	0.131f	+	فاکتور انتقال Transfer factor
3.48^{a}	0.751^{bc}	0.272^{ef}	0.481^{de}	0.959^{b}	−	

میانگین‌های مربوط به اثرات متقابل هر صفت که دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک هستند فاقد تفاوت معنی‌دار به روش آزمون دانکن در سطح یک درصد می‌باشند (Cd_1، Cd_2، Cd_3، Cd_4، Cd_5 به‌ترتیب سطوح ۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک و + و − به‌ترتیب تلقیح میکوریز و بدون میکوریز می‌باشد).

Means of the mutual effects which have at least one letter in common were not significant using Duncan test at 1% level (Cd_1, Cd_2, Cd_3, Cd_4, Cd_5 show levels of 0, 100, 200, 400 and 800, mg cadmium Kg^{-1} soil and +,- are inoculation with and without mycorrhizal, respectively).

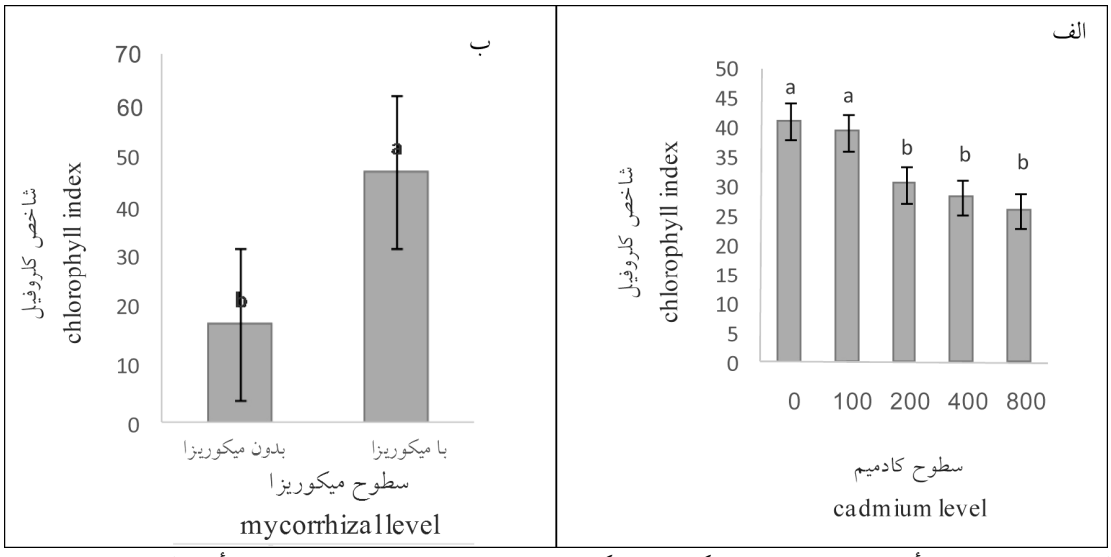
با افزایش غلظت کادمیم خاک، غلظت کادمیم اندام هوایی و ریشه گیاه افزایش یافت. در تیمارهای میکوریزی افزایش غلظت کادمیم در ریشه‌ها بیش از اندام هوایی بود که ممکن است به‌دلیل انباشته شدن کادمیم در ریشه در اثر فعالیت هیف‌های میکوریزی و در نتیجه کاهش انتقال آن به‌سمت اندام‌های هوایی می‌باشد. بسریل و همکاران (۲۰۰۲) در بررسی اثر قارچ‌های میکوریزی بر روی گیاه لوبیا در خاک‌های آلوده به عنصرکادمیم نشان دادند غلظت کادمیم ریشه گیاهان میکوریزی ۲۰-۵۰ برابر غلظت آن در ساقه بود (۴). گونزالز و همکاران (۲۰۰۵) و برادلی و بورت (۱۹۸۲)، اظهار نمودند که قارچ‌های میکوریزی انتقال سرب و کادمیوم را به ساقه گیاه کاهش می‌دهند (۱۵، ۶). با توجه به این نتایج کادمیم در ریشه‌های گیاه و در هیف‌ها و میسیلیوم‌ها ذخیره می‌گردد و از انتقال آن به اندام هوایی تا حدود زیادی جلوگیری به عمل می‌آید که نوعی مکانیسم برای کاهش اثرات سمی کادمیم در اندام هوایی بوده و در نیل به هدف گیاه‌پالایی کادمیم مؤثر می‌باشد. غلظت کادمیم ریشه با افزایش سطوح کادمیم خاک افزایش یافت، در گیاهان بدون میکوریزا بالاترین غلظت برای سطح ۲۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک گزارش شد و در سطوح بالاتر کادمیم خاک غلظت این فلز در گیاه کاهش پیدا کرد که ممکن است علت آن کاهش رشد

گیاه به‌دلیل افزایش کادمیم خاک و در نتیجه سمیت این عنصر در خاک باشد. در گیاهان تلقیح‌شده با میکوریزا با افزایش سطوح کادمیم خاک، غلظت کادمیم در ریشه افزایش یافت، احتمال می‌دهیم که در این تیمارها حضور قارچ میکوریزا توانسته است تا حدودی از سمیت ناشی از فلز کادمیم کاسته و مقادیر بالایی از این فلز را جذب و در ریشه انباشته کند.

غلظت فسفر: تأثیر سطوح کادمیم و میکوریزا و اثرات متقابل آن‌ها بر میزان فسفر اندام هوایی و ریشه، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۳). با افزایش غلظت کادمیم خاک، مقدار فسفر اندام هوایی و ریشه، درگیاهان میکوریزی و گیاهان شاهد کاهش یافت. با توجه به نتایج مقایسه میانگین، در تیمارهای میکوریزی میانگین غلظت فسفر اندام هوایی از ۰/۲۴۸ در سطح شاهد به ۰/۰۸۸ درصد در سطح ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک رسید که ۲/۸ برابر کاهش داشت. در تیمارهای بدون میکوریزا میانگین غلظت فسفر اندام هوایی از ۰/۱۵۵ درصد در سطح شاهد به ۰/۰۰۱ درصد در سطح ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک رسید که ۱۵۵ برابر کاهش یافت (جدول ۴). با توجه به نتایج مقایسه میانگین، در تیمارهای میکوریزی میانگین غلظت فسفر ریشه از ۰/۳۵۴ در سطح شاهد به ۰/۱۴۱ درصد در سطح ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک رسید که ۲/۵ برابر کاهش یافت و در تیمارهای بدون میکوریزا میانگین غلظت فسفر ریشه از ۰/۱۹۱ درصد در سطح شاهد به ۰/۰۰۷ درصد در سطح ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک رسید که تقریباً ۲۷ برابرکاهش یافت (جدول ۴). این نتایج با یافته‌های کلیرونوماس (۲۰۰۳) و کریستی و همکاران (۲۰۰۴) مطابقت دارد (۲۴ و ۸). با افزایش غلظت کادمیم، مقدار فسفر در اندام هوایی کاهش یافت ولی این کاهش در گیاهان بدون میکوریزا شدیدتر بود. تیمار با قارچ میکوریزا باعث جذب فسفر در شرایط غلظت بالای کادمیم گردید. مکانیسم‌های مختلفی در ارتباط با تأثیر میکوریزا بر رشد رویشی گیاهان ذکر شده، یکی از مهم‌ترین این مکانیسم‌ها تأثیر میکوریزا بر جذب عناصر غذایی از جمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم خاک است و زمانی که غلظت فلز سنگین در خاک بالا می‌رود از تحرک فسفر و سرعت انتشار این عنصر در خاک کاسته می‌شود. قارچ‌های میکوریزا قادرند با استفاده از گسترش ریسه‌های خارجی و تغییر مرفولوژی ریشه گیاهان، سطح جذب ریشه و انتقال مواد غذایی به ریشه را افزایش دهند (۲۰). همچنین تولید و ترشح آنزیم فسفاتاز توسط ریسه‌های میکوریزا باعث می‌شود که فسفات غیرمحلول و تثبیت شده در خاک به فرم محلول درآید و برای ریشه قابل‌جذب گردد (۳۴).

شاخص کلروفیل: تأثیر سطوح کادمیم و میکوریزا بر میزان شاخص کلروفیل معنی‌دار شد، اما اثرات متقابل آن‌ها معنی‌دار نگردید (جدول ۳). همان‌طورکه در نتایج ذکر شد میزان کلروفیل با افزایش غلظت کادمیم در خاک هم در گیاهان میکوریزی و هم در گیاهان بدون میکوریزا کاهش یافت ولی به‌طورکلی در گیاهان میکوریزی این شاخص ۱۵۶ درصد بیش‌تر از گیاهان بدون میکوریزا بود. میزان این شاخص در اثر سمیت کادمیم در سطح ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک نسبت به سطح شاهد، ۵۹ درصد کاهش یافت (شکل ۱). حقیری (۱۹۷۳) کاهش ۵۰ درصدی کلروفیل را در برگ‌های گیاهان موجود در معرض ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر کادمیم گزارش کرده‌اند که مقدار کلروفیل با افزایش غلظت کادمیم کاهش یافت (۱۷).

کاهش ذخیره کلروفیل در برگ‌ها به‌علت مهار مراحل مختلف بیوسنتز کلروفیل است. مهار بیوسنتز کلروفیل احتمالاً به‌وسیله مهار سنتز دلتاآمینولولینیک اسید و مهار تشکیل پروتوکلروفیلیدرودکتاز می‌باشد. همچنین جایگزین شدن یون منیزیم مرکزی کلروفیل به‌وسیله فلزات سنگین صدمه دیگری است که باعث جلوگیری از به دام انداختن نور فتوسنتزی و در نتیجه از بین رفتن کلروفیل و کاهش فعالیت فتوسنتز می‌شود (۳۰). کاهش محتوای کلروفیل می‌تواند دلیلی مستقیم برای کاهش فعالیت فتوسنتزی و در نتیجه کاهش تثبیت کربن در اثر غلظت‌های بالای فلزات سنگین باشد. بالا بودن میزان کلروفیل در گیاهان گندم همزیست با قارچ در مقایسه با گیاهان شاهد می‌توان به این نتیجه رسید که احتمالاً به‌علت وجود رابطه مثبت بین غلظت فسفر و مقدار کلروفیل کل در گیاهان میکوریزی نقش قارچ میکوریزا در فراهم نمودن فسفر مورد نیاز گیاه به‌عنوان عامل انرژی در طی فتوسنتز تأیید می‌شود (۱۱).



شکل ۱- الف) نمودار تأثیر سطوح کادمیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) بر شاخص کلروفیل، ب) نمودار تأثیر میکوریزا بر شاخص کلروفیل.

Figure 1. (a) The effect of cadmium level on chlorophyll index (b) the effect of mycorrhiza on chlorophyll index.

انتقال کادمیم از ریشه به اندام هوایی: تأثیر سطوح کادمیم و میکوریزا و اثرات متقابل آن‌ها بر میزان انتقال کادمیم از ریشه به اندام هوایی، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۳). نتایج نشان داد با افزایش غلظت کادمیم در خاک فاکتور انتقال (نسبت بین کادمیم اندام هوایی به کادمیم ریشه) کاهش یافت. همچنین شاخص انتقال در گیاهان میکوریزی کم‌تر از گیاهان غیرمیکوریزی بود. به‌طوری‌که با افزایش غلظت کادمیم خاک، فاکتور انتقال در گیاهان میکوریزی سطح ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک نسبت به سطح شاهد تقریباً ۵ برابر کاهش پیدا کرد (جدول ۴). همچنین فاکتور انتقال در گیاهان غیرمیکوریزی سطح ۲۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک نسبت به سطح شاهد تقریباً ۳/۵ برابر کاهش پیدا کرد (جدول ۴). اما سطح ۴۰۰ و ۸۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک این نسبت افزایش یافت که

می‌تواند این‌گونه توجیه شود که در این تیمارها به‌دلیل کاهش رشد ریشه و اندام هوایی در اثر سمیت کادمیم غلظت این فلز در ریشه کاهش یافته و در نتیجه این نسبت افزایش یافت. امانی‌فر و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کرده‌اند با افزایش غلظت سرب در خاک شاخص انتقال کاهش یافت (۱). در پژوهشی انجام شده بر روی جذب فلزات سنگین کادمیم و روی توسط گیاه شبدر سفید این شاخص در گیاهان میکوریزایی ۱۰-۲۰ برابر کم‌تر از گیاهان غیرمیکوریزایی گزارش شده است (۲۷).

فاکتور انتقال محاسبه شده نیز نشان می‌دهد که با افزایش غلظت کادمیم در خاک میزان تجمع این فلز در ریشه گیاهان افزایش می‌یابد. صرف‌نظر از تأثیر ساختارهای قارچی در کمپلکس کردن فلز و کاهش انتقال به بخش هوایی عوامل دیگری می‌توانند دلیلی برای کاهش انتقال فلز باشند. یکی از دلایلی که می‌توان برای کاهش انتقال کادمیم به بخش هوایی گیاهان بیان کرد با توجه به این‌که انتقال فلز به اندام هوایی از طریق آوندهای چوبی صورت می‌گیرد و عامل انتقال در این آوندها، شیب هیدرواستاتیک و شیب پتانسیل آب است، بنابراین با کاهش رشد گیاهان در اثر افزایش غلظت کادمیم، میزان تبخیر و تعرق کاهش و میزان انتقال در این آوندها نیز کاهش می‌یابد (۲۳). از عوامل تعیین‌کننده در رها شدن یون‌ها به درون آوند چوبی میزان تعرق گیاه، وضعیت کربوهیدرات‌های ریشه و تنفس ریشه می‌باشد. کاهش هر سه مورد ذکر شده سبب کاهش رها شدن یون‌ها به درون آوند چوبی می‌گردد (۲۳). با توجه به اثر بازدارنده فلز سنگین بر شدت فتوسنتز، تولید کربوهیدرات‌ها کاهش می‌یابد و به تبع آن میزان انتقال این مواد در ریشه‌ها نیز کم می‌شود. از طرف دیگر کربوهیدرات‌ها سوبسترای اصلی برای تنفس هستند، بنابراین با کاهش میزان فتوسنتز تأمین کربوهیدرات‌ها برای ریشه‌ها و حتی قارچ همزیست محدود شده و تنفس آن‌ها کاهش می‌یابد (۱). بعد دیگری که در مورد جذب فلز می‌توان مطرح کرد نحوه جذب فلز به ریشه‌ها می‌باشد. تا زمانی که یک اختلاف شیب غلظت فلز میان درون و بیرون ریشه‌ها حاکم باشد کادمیم با پدیده جذب غیرفعال و در جهت شیب غلظت وارد ریشه‌ها می‌شود ولی با افزایش غلظت کادمیم داخل ریشه، جذب عمدتاً به شکل فعال ادامه پیدا خواهد کرد. با توجه به این‌که جذب فعال با مصرف انرژی انجام گرفته و وابسته به فعالیت‌های متابولیکی گیاه است، با افزایش غلظت کادمیم خاک و به تبع آن مسمومیت سلول‌های گیاهی و کاهش فعالیت‌های متابولیکی، به‌طورکلی، جذب کادمیم از محلول خاک به ریشه‌ها کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد همزیستی میکوریزا- آربوسکولار با گیاه گل جعفری نقش مثبتی در گیاه پالایی عنصر سنگین کادمیم دارد، بنابراین این همزیستی سمیت را کاهش می‌دهد. با توجه به این‌که گیاه گل جعفری گیاه زینتی است و مورد مصرف دام و انسان قرار نمی‌گیرد می‌تواند برای رفع آلودگی خاک استفاده شود. پیشنهاد می‌شود این گیاه با سایر گونه‌های قارچ میکوریزا آربوسکولار و نیز برای انواع فلزات سنگین مورد آزمایش قرار گیرد.

منابع

1.Amanifar, S., Aliasgharzad, N., Najafi, N., Oustan, Sh., and Bolandnazar, S. 2010. Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Lead Phytoremediation by Sorghum (Sorghum b icolor L.). J. Soil Water. 22: 1. 155-170.

2.Andrade, S.A.L., Abreu, C.A., Abreu, M.F., and Silveria, A.P.D. 2004. Influence olead additions on arbuscular mycorrhiza and Rhizobium symbioses under oybean. Appl. Soil Ecol. 26: 2. 123-131.

3.Assar, A.A., and Echini, K.M. 2011. Alleviation of drought stress of marigold (*Tagetes erecta*) plants by using arbuscular mycorrhizal fungi, Saudi. J. Biol. Sci. 18: 93-98.

4.Becerril, F.R., Calantzis Turnau, C., Caussanel, J.P., Belimov, A.A., Gianinazzi, S., Strasser, R.J., and Pearson, V.G. 2002. Cadmium accumulation and buffering of cadmium industed stress by arbuscular mycorrhiza in three *Pisum sativum* L. genotypes. J. Exp. Bot. 53: 371. 1177-1185.

5.Bouycos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size of soil. J. Agron. 56: 464-465.

6.Bradley, R., and Burt, A.J. 1982. The biology of mycorrhiza in the Ericaceae. VIII. The role of mycorrhizal infection in heavy metal resistance. New Phytologist. 91: 2. 197-209.

7.Chintakovid, W., Visoottiviseth, P., Khokiattiwong, S., and Lauengsuchonkul, S. 2008. Potential of the hybrid marigolds for arsenic phytoremediation and income generation of remediators in Ron Phibun District, Thailand. Chemosphere. 70: 1532-1537.

8.Christie, P., Li, X.L., and Chen, B.D. 2004. Arbuscular mycorrhiza can depress translocation of zinc to shoots of host plants in soils moderately polluted with zinc. Plant and Soil. 261: 209-217.

9.Cottenie, A. 1980. Soil and plant Testing. FAO Soil Bulletin, No. 38/2.

10.Das, P., Samantaray, S., and Rout, G.R. 1997. Studies on cadmium toxicity in plants: a review. Environ. Poll. 98: 29-36.

11.Demir, S. 2004. Influence of arbuscular mycorrhiza on some physiological growth parameters of pepper. Turk. J. Biol. 28: 85-90.

12.Esmaielpour, B., and Amani, N. 2014. Investigating the effect of mycorrhizal inoculation on growth and uptake of nutrients in lactuca sativa cv Syaho. J. Soil Manage. Sust. Prod. 4: 2. 49-69.

13.Gabo's, M.A., Abreu, C.A., and Cosine, A.R. 2009. EDTA assisted phytoremediation of a Pub contaminated soil: Metal leaching and uptake by jack beans. Sciatica. Agricola. 66: 506-514.

14.Giovannetti, M., and Moses, B. 1980. An evaluation of technique to measure vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. New Photo. 84: 489-500.

15.Gonzalez-Guerrero, M., Alcon-Aguilar, C., Mooney, M., Balderas, A., MacDiarmid, C.W., Edie, D.J., and Ferrol, N. 2005. Characterization of a Gloms intraradices gene encoding a putative Zn transporter of the cation diffusion facilitator family. Fungal Genetics and Biology. 42: 2. 130-140.

16.Gouia, H., Ghorbal, M.H., and Meyer, C. 2001. Effect of cadmium on activity of nitrate reductase and on other enzymes of the nitrate assimilation pathway in bean. Plant Physiol. 38: 629-638.

17.Haghiri, F. 1973. Cadmium uptake by plants. J. Environ. Qual. 2: 93-96.

18.Hegedus, A., Erdi, S., and Horvath, G. 2001. Comparative studies of H_2O_2 detoxifying enzymes in green and greening barley seedling under cadmium stress. Plant Sci. 160: 1085-1093.

19.Horst, V. 2004. Further root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi in already mycorrhizal plants in suppressed after a critical level of root colonization. J. Plant Physiol. 161: 339-341.

20.James, B., Rode, D., Loretta, U., Reynaldo, E., and Tariq, H. 2008. Effect of vesicular arbuscular mycorrhiza (VAM) fungi inoculation on coppicing ability and drought resistance of Sienna Spectabilis. Pak. J. Bot. 40: 5. 2217-2224.
21.Jankong, P., and Visoottiviseth, P. 2008. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on plants growing on arsenic contaminated soil. Chemosphere. 72: 1092-1097.
22.Khaosaad, T., García-Garrido, J.M., Steinkellner, S., and Vierheilig, H. 2007. Take-all disease is systemically reduced in roots of mycorrhizal barley plants. Soil Biol. Biochem. 39: 727-734.
23.Kholdbryn, B., and Islamzadeh, T. 2002. Mineral nutrition of higher plants. In two volumes Shiraz University Press. (In Persian)
24.Klironomos, J.N. 2003. Variation in plant response to native and exotic arbuscular mycorrhizal fungi. Ecol. 84: 2292-2301.
25.Lal, K., Minhas, P.S., Chaturvedi, S.R.K., and Yadav, R. 2008. Extraction of cadmium and tolerance of three annual cut flowers on Cd-contaminated soils. Bioresource Technol. 99: 1006-1011.
26.Ma, Q., Xu, X., GAO, Y., Wang, Q., and Zhao, J. 2008. Optimisation of supercritical carbon dioxide extraction of lutein esters from marigold (*Tagetes erect* L.) with Soybean oil as a co-solvent. Int. J. Food Sci. Tech. 43: 1763-1769.
27.Madani, A., Lakzian, A., Haghnia, Gh., and Khorasani, R. 2013. Contribution of External Hyphae of Arbuscular Mycorrhizal Fungi to Transfer Cadmium, Zinc and Phosphorus to White Clover. J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour. Water and Soil Sci. 17: 63. 37-46.
28.Mclean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement, P 199-223. In: A.L. Page (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties, 2ne ed. Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, WI.
29.Michaelis, A., Takehisa, R., and Aurich, O. 1986. Ammonium chloride and zinc sulfate pretreatments reduce the yield of chromatid aberrations induced by TEM and maleic hydrazide in Vicia faba. Mutal. Res. 173: 187-191.
30.Prasad, M., and Strazalka, K. 1999. Impact of heavy metals on photosynthesis. J. Exp. Bot. 41: 314-320.
31.Rezvani, M., Afshang, B., Gholizadeh, A., and Zaefarian, F. 2011. Evaluation of mycorrhizal fungus and phosphate rock effectiveness on growth and uptake of phosphorous in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). J. Soil Manage. Sust. Prod. 1: 2. 97-117.
32.Rhoades, J.D. 1986. Soluble salts, P 167-179. In: A.L. Page (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties, 2nd ed. American Society of Agronomy and Soil Society of American, Madison, WI. USA.
33.Smith, S.E., and Read, D.J. 2008. Mycorrhizal Symbiosis, 3rd edition. Academic Press, London, UK.
34.Song, H. 2005. Effects of VAM on host plant in the condition of drought stress and its Mechanisms. Elec. J. Biol. 1: 3. 44-48.
35.Sowbhagya, H.B., Sampathu, S.R., and Krishnamurthy, N. 2004. Natural colorant from marigold-chemistry and technology. Food Rev. Int. 20: 33-50.
36.Waling, I., Vark, W.V., Hobe, V.J.G., and Vanderlee, J.J. 1989. Soil and Plant Analysis a Series of Syllabi. Part7. Plant Analysis Procedures. Wageningen Agricultural University.
37.Weissenhorn, I., Mench, M., and Leyval, C. 1995. Bioavailability of heavy metals and carbuncular4mycorrhiza in a sewage sludge amended sandy soil. Soil Biol. Biochem. 27: 3. 287-296.

J. of Soil Management and Sustainable Production, Vol. 6(1), 2016
http://ejsms.gau.ac.ir

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on cadmium phytoremediation by marigold (*Tagetes erecta*)

Z. Shokri[1], *N. Boroomand[2], M. Sarcheshmeh Pour[3] and H.R. Alizadeh[4]
[1]M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science, University of Jiroft, [2]Assistant Prof., Dept. of Soil Science, University of Jiroft, [3]Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Shahid Bahonar University of Kerman, [4]Assistant Prof., Dept. of Plant Protection, University of Jiroft
Received: 04/20/2015; Accepted: 01/06/2016

Abstract

Background and Objectives: Phytoremediation is a biological method by which plants are used to remove environmental pollution caused by toxic elements such as accumulation of cadmium, copper, lead, chromium, etc. from soil. Plants with high capability in the uptake of heavy elements and pollutants in this method are identified and introduced. Identification of nonedible plants or their organs is of higher importance in phytoremediation. Symbiosis of the mycorrhizal fungi (AMF) helps the plant to increase uptake and translocation of low mobility nutrients and also micronutrients. The aim of the present study was to investigate the capability of the marigold in uptake and transfer of cadmium and consequently the phytoremediation of the plant and the effect of symbiosis of mycorrhiza in uptake and refinement of cadmium.

Materials and Methods: In this research, arbuscular mycorrhizal inoculant was produced through the isolation of fungi from the roots of marigold and its inoculation with clover and sorghum under greenhouse conditions. Moreover, the symbiotic effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the concentration and transfer of cadmium from the roots to the shoots in Marigold was studied under greenhouse conditions. The experiment was conducted using a factorial design based on randomized complete blocks with five levels of Cd (0, 100, 200, 400, 800 mg kg^{-1} soil), using the soluble form of $CdCl_2.H_2O$ and two levels of mycorrhizal inoculation (non- inoculated and inoculated) with four replications.

Results: Greenhouse test results showed concentrations of cadmium in shoots ranges between 3.91 to 94.9 and in roots between 4.23 and 151 $mg.kg^{-1}$, which causes toxicity in the plant, with more severe symptoms of toxicity in non-mycorrhizal plants. Also the effect of mycorrhiza and cadmium pollution on growth factors and uptake of cadmium in the root and phosphorous uptake in the root and shoot was statistically significant and mycorrhizal symbiosis caused higher concentration of cadmium in root and relative decrease in its transfer to shoot. On the other hand, the mutual effects of mycorrhizal fungus and cadmium in all the measured traits (except for chlorophyll) were statistically significant.

Conclusion: In general, the results of the present study showed that inoculation of the marigold with mycorrhiza results in higher transfer of elements such as phosphorous to the shoot of the plant and caused higher concentration of cadmium in the root of the plant. Considerable increase of chlorophyll and graoth levels was other effects of mycorrhiza on marigold in the polluted conditions.

Keywords: Mycorrhizal fungi, Transportation, Heavy metal, Ornamental plants

* Corresponding Authors; Email: nbroomand@yahoo.com