پژوهش‌های خاک / الف / جلد ۳۸ / شماره۲ تابستان/ ۱۶۵/۱۴۰۳-۱۸۰
https://doi.org/10.22092/IJSR.2024.365604.743

نقش قارچ میکوریز گونه *Funneliformis mosseae* در جذب، انتقال و الگوی تجمع زیستی کادمیوم و مس در گیاه پسته

نرگس روحانی*

استادیارگروه زیست شناسی. دانشگاه پیام نور. تهران.ایرانN_rohani@pnu.ac.ir

« مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۳/۲/۱۱ و پذیرش:۱۴۰۳/۸/۱

چکیده

سمیت فلزات به دلیل ماندگاری، عدم تجزیه پذیری زیستی و نیز تجمع زیستی آنها در اندام های گیاهان و جانوران زنده یک مسئله زیست محیطی مهم محسوب می شود. یکی از روش‌های قابل استفاده برای کاهش اثرات مخرب ناشی از فلزات سنگین به ویژه مس و کادمیوم، در اندام گیاهان و جانوران زنده، استفاده از قارچ‌های میکوریز می باشد. این پژوهش برای تعیین اثر قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae* بر رشد و میزان جذب و انتقال کادمیوم و مس, در گیاه پسته رقم احمد آقایی در پاسخ به افزایش غلظت مس و کادمیوم خاک انجام گرفت. آزمایش مذکور به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه سطح مس (غلظت‌های ۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم در لیتر نیترات مس) وچهار سطح کادمیوم (غلظت‌های ۰، ۲۰۰ و ۶۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر نیترات کادمیوم) در دو وضعیت تلقیح شده با قارچ میکوریز*F. mosseae* و بدون مایه تلقیح میکوریزی اجرا شد. در همه گیاهان شاهد و تیمار شده با کادمیوم و مس، طول و وزن خشک ریشه و ساقه گیاهان میکوریزی از گیاهان غیرمیکوریزی بیشتر بود. بر اساس نتایج میزان کادمیوم و مس انتقال یافته از ریشه به بخش هوایی (فاکتور انتقال) در گیاهان به طور معنی داری پایین تر از گیاهان غیرمیکوریزی بود. نتایج نشان داد که فاکتور تجمع زیستی کادمیوم و مس در گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریزی به طور معنی داری پایین تر از گیاهان غیر میکوریزی بوده است. بنابراین با توجه به نتایج همزیستی با قارچ *F. mosseae* باعث تثبیت و تجمع بیشتر کادمیوم و مس در ریشه گردیده است.

واژه های کلیدی: گیاه پالایی، فاکتور انتقال، فلز سنگین،همزیستی

*-آدرس ایمیل نویسنده مسئول: N_rohani@pnu.ac.ir

CC BY

مقدمه

به دلیل کمبود منابع آبی در آینده می بایست از آب های صنعتی یا فاضلاب های شهری برای آبیاری باغات استفاده نمود که دارای برخی عناصر سنگین از جمله کادمیوم و مس هستند. کادمیوم یکی از فلزات سنگین دو ظرفیتی است که در طبیعت بیشتر در سنگ های معدنی همراه با روی یافت می شود. این عنصر از طریق فعالیت های معدن کاوی، تمایز مواد اولیه خاک، آبکاری فلزات، استفاده از سوخت های فسیلی، کود های فسفاته و حشره کش ها در کشاورزی و از طریق فاضلاب های شهری و صنعتی وارد خاک می شود (FAO, UNEP, 2020; Kirkham, 2006). تاکنون نشان داده شده که کادمیوم موجب بسیاری از تغییرات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمایی و ساختاری درگیاهان مثل مهار رشد و جوانه زنی، کاهش جذب عناصر غذایی، زرد شدن برگ و نکرروزه شدن آن ها، تغییر ساختار سلول به ویژه کلروپلاست و تسریع پیری می شود (Benavides et al,2005;Mishra,2009). مس یکی از اجزای تشکیل دهنده پروتئین کلروپلاست یعنی پلاستوسیانین است. این عنصر همچنین بخشی از زنجیره انتقال الکترون را تشکیل می دهد که دو سیستم فتوشیمیایی فتوسنتز را به هم مرتبط می سازد. قارچهای میکوریز به لحاظ توانایی گیاه در جذب مواد غذایی، حفظ فعالیت آنزیم ها(Colla,2008) و افزایش غلظت کلروفیل(Rabie,2005) خطرات ناشی از تنش ها را کاهش داده و باعث افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش های زیستی و غیرزیستی می شوند. تلقیح گیاهان با قارچ های میکوریز آربوسکولار باعث مقاومت به تنش های ناشی از خشکی، شوری، حمله پاتوژن ها و فلزات سنگین می شود (Ouziad,2005).سازوکارهایی که قارچ میکوریز آربوسکولار برای کاهش تنش فلزات سنگین برای گیاهان به کار می برد شامل کلات شدن و غیر پویایی فلزات سنگین در میسیلیوم های خارجی، بهبود تغذیه معدنی به ویژه فسفر تغییر pH ریزوسفر و غیره می باشد(Joner et al., 2000;Christie et al., 2004;Guerrero,2005). سازوکارهای دیگر تحمل فلزات سنگین ممکن است شامل رقیق شدگی از طریق افزایش رشد ساقه یا ریشه، اتصال به گرانولهای پلی فسفات و ذخیره آن ها در داخل پلاستید ها و دیگر اندامک های غشا دار باشد (Harahap et al., 2018). علاوه بر این، قارچ میکوریز آربوسکولار جذب فلزات توسط گیاهان را از خاک و انتقال آن به ریشه و اندام هوایی تحت تاثیر قرار می دهد که به نوع فلز، گیاه و گونه قارچ بستگی دارد.

ویژگی های اختصاصی گیاهان مناسب برای استفاده در تثبیت گیاهی آلاینده های فلزی عبارتند از: ۱- متحمل بودن نسبت به غلظت های بالای فلزات سنگین ۲- تولید مقادیر زیاد زیتوده ریشه ای به منظور جذب درونی یا سطحی یون های فلزی و جلوگیری از تحرک آنها و ۳- ناتوانی گیاه در انتقال مقادیر زیاد آلاینده های فلزی از ریشه به اندام هوایی. در تکنیک تثبیت گیاهی، گیاهان مستقر در مکان های آلوده به جای خارج نمودن آلاینده ها از خاک، به واسطه جذب فلزات در درون یا بر سطح ریشه های خود و یا رسوب در ناحیه ی ریزوسفر، آنها را تثبیت و غیر متحرک می سازند. تثبیت گیاهی در خاک های با بافت مناسب به منظور کاهش خطر آبشویی و حرکت آلاینده های فلزی به سمت آبهای زیرزمینی و همچنین جلوگیری از جابه جایی آنها توسط باد به مناطق مجاور غیر آلوده کارآیی دارد(Berti and cunninggham,2000).از طرف دیگر قابلیت جذب زیستی آلاینده های فلزی به منظور ورود به زنجیره های غذایی نیز کاهش خواهد یافت(Lasat ,2002). پسته اهلی (*Pistacia vera*) متعلق به تیره *Anacardiaceae* و یکی از محصولات مهم تجاری در مناطق خشک و نیمه خشک است که با نام ایران در آمیخته

و تولید آن درکشور ایران سابقه تاریخی و طولانی دارد (Radmehr, 2010; Bagheri *et al*., 2012). پسته گیاهی است که سالهاست در مناطقی از ایران کشت و پرورش داده می شود. یکی از این مناطق استان کرمان شهرستان رفسنجان است که در نزدیکی معادن مس سرچشمه قرار دارد. بنابراین با توجه به اهمیت اقتصادی قابل توجه پسته و اثرات سوء ناشی از سمیت مس در مناطق پسته کاری به خصوص در اطراف معادن مس (Shamsadin et al., 2015) و نیز استفاده از کودهای فسفات توسط پسته کاران در این مناطق که حاوی مقادیر بالایی از کادمیوم هستند (Jazaeri et al., 2015). راهکارهای افزایش مقاومت و تحمل گیاه پسته در این مناطق باید مورد توجه بیشتری قرار گیرد که با توجه به همین مسئله و اینکه در گیاه پسته در این زمینه, پژوهشهای زیادی صورت نگرفته, این تحقیق با هدف بررسی نقش قارچ *Funneliformis mosseae* در رشد و میزان جذب و انتقال کادمیوم و مس در گیاه پسته انجام گرفت که در همین راستا گیاه پسته با قارچ میکوریز *F. mosseae* تلقیح شده و با گیاهان فاقد همزیستی میکوریزی تحت شرایط سمیت ناشی از کادمیوم و مس مقایسه شدند.

مواد و روش ها

برای انجام این تحقیق از گیاه پسته رقم احمدآقایی استفاده شد. این تحقیق در قالب طرح کاملا تصادفی به صورت فاکتوریل با ۳ تکرار انجام گردید. بذر های مذکور از پژوهشکده پسته در رفسنجان (موسسه تحقیقات پسته کشور) تهیه شد. برای جوانه زنی، بذرهای سالم پسته انتخاب و با آب مقطر چندین بار شسته شدند و سپس به مدت ۱۰ دقیقه در محلول آب ژاول ۵٪ ضدعفونی گردیده و مجدد با آب مقطر شسته شدند. بعد از آن به مدت ۴۸ ساعت در آب مقطر در تاریکی قرار داده شدند. در طی این مدت نیز آب روی بذرها تعویض شد. سپس بذور در لای پارچه ای نخی مرطوب درمحیطی گرم (دمای ۱±۲۸ درجه سانتیگراد) و تاریک قرار داده شدند تا جوانه بزنند. جوانه زنی بذرها پس از حدود یک هفته صورت گرفت. سپس بذرهای جوانه زده به گلدان منتقل شدند. در هر گلدان (با ارتفاع ۱۲ سانتیمتر و قطر دهانه ۸ سانتیمتر) ۲ عدد بذر پسته جوانه زده کاشته شد. گلدانها شامل پرلیت استریل بوده (Lee et al.,2005) که نیمی از تعداد کل گلدانها با قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae* آغشته شدند. ماده تلقیح موردنظر از کلینیک گیاه‌پزشکی ارگانیک شهرستان اسد آباد همدان تهیه شد که فقط حاوی گونهٔ *F. mosseae*میکوریزایی به همراه ریشه، هیف و خاک بود. تعداد اسپور در هر گرم از مایه تلقیح شمارش شد که حدود ۱۰۰ عدد اسپور در هر گرم از مایه تلقیح محاسبه گردید. در زمان کاشت ۲۵ گرم مایه تلقیح قارچی در کنار هر بذر جوانه زده گذاشته و سپس روی آن با پرلیت پوشانده شد. گلدانها در گلخانه، تحت شرایط نوری ۱۶ ساعت نور و ۸ ساعت تاریکی، با شدت نور ۸۵۰ لوکس ، رطوبت ۷۵ درصد و دمای ۲±۲۵ درجه سانتیگراد در روز و دمای ۲±۱۷ درجه سانتیگراد در شب نگهداری شدند. در ابتدا با توجه به نیاز آبی آبیاری با آب مقطر صورت گرفت. زمانی که تعداد برگها به ۳ تا ۴ عدد رسید، آبیاری با محلول غذایی هوگلند (pH : ۵/۸±۰/۱) آغاز شد. هر ۲ روز یکبار آبیاری با ۲۰ میلی لیتر محلول هوگلند (0.5 mM KNO_3, 400 µM $Ca(NO_3)_2$, 10 µM Fe-EDTA, 0.2 mM $MgSO_4$,, 10 µM H_3BO_3, 2 µM $MnCl_2$, 2 µM $ZnSO_4$, 0.1 µM Na_2MoO_4 and 0.2 µM $CuSO_4$) صورت گرفت. در این فاصله برای جلوگیری از خشک شدن گلدانها از آب مقطر برای آبیاری و جلوگیری از تجمع فلزات استفاده شد. هم زمان با شروع آبیاری با محلول غذایی هوگلند, افزودن مس و کادمیوم به صورت جداگانه و همزمان آغاز شد. اعمال تنش با ۲۰ میلی لیتر محلول نیترات مس در غلظت های ۰، ۳۰۰ و۶۰۰ میلی گرم در لیتر و ۱۰

میلی لیتر محلول نیترات کادمیوم در غلظت های ۰، ۲۰۰و۶۰۰ و ۱۰۰۰میلی گرم در لیترصورت گرفت(Sara et al., 2008; Yurekli and Kucukbay, 2003).

گیاهان بعد از گذشت ۲ ماه از زمان کاشت جمع آوری شدند. به این ترتیب که ریشه و بخش هوایی گیاهان در گروههای تیماری مختلف جدا و صفات مورفولوژیکی شامل طول بخش هوایی و زمینی و نیز وزن خشک آنها اندازه‌گیری گردید. در همین زمان مقداری از ریشه های ظریف انتهایی آنها برای بررسی میزان آغشتگی ریشه ها به قارچ میکوریز جدا و در محلول FAA (فرمالین،اسید استیک، الکل اتیلیک) نگهداری شدند. سایر نمونه ها نیز بعد از اندازه‌گیری صفات مورفولوژیکی، در نیتروژن مایع قرار گرفتند و در فریزر ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

صفات مورفولوژیکی

طول ساقه و ریشه و وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاهان در گروه های تیماری مختلف اندازه‌گیری گردید. برای اندازه گیری وزن خشک، نمونه‌ها در فویل آلومینیومی پیچیده شده و به مدت ۷۲ ساعت درآون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد. سپس وزن خشک نمونه ها بر حسب گرم بر گیاه گزارش گردید.

تعیین درصد کولونیزاسیون ریشه

رنگ آمیزی ریشه‌های واجد میکوریز آربوسکولار و اندازه گیری میزان کولونیزاسیون ریشه ها به این میکوریز با روش راجاپاکز و همکاران (۱۹۹۲) و با استفاده از رنگ فوشین اسیدی انجام شد. پس از شفاف سازی و رنگ آمیزی ریشه‌ها، قطعات ریشه رنگ آمیزی شده در ظروف پتری که در زیر آن کاغذ میلیمتری قرار داده شده بود، به طور تصادفی پخش شدند. پس از آن در زیر میکروسکوپ تشریحی (استریوسکوپ) نقاط برخورد ریشه با خطوط اصلی کاغذ و نیز تعداد نقاط برخوردی که واجد قارچ بودند شمارش شد و نسبت این نقاط دارای قارچ به کل نقاط برخورد بر حسب در صد محاسبه گردید (Giovannetti and Moss,1980).

درصد کولونیزاسیون ریشه = (تعداد کل قطعات کولونیزه شده(واجد اندامهای قارچی) تقسیم بر تعداد کل قطعات مورد مطالعه) ضربدر ۱۰۰

تعیین غلظت کادمیوم ومس

مقدار ۰/۱گرم ازماده خشک گیاه (ریشه واندام هوایی به صورت جداگانه) درنسبت مساوی اسیدنیتریک واسیدپرکلریک‌غلیظ قرارگرفت وبه خوبی هضم گردید. سپس‌محلول اسیدی حرارت داده شد تا بخارات آن‌خارج شود. درمرحله بعد حجم محلول باآب‌مقطر به ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد وبه‌کمک کاغذصافی صاف‌گردید. سپس میزان کادمیوم و مس‌محلول به‌کمک دستگاه جذب اتمی بر حسب میلی گرم بر گرم وزن خشک اندازه‌گیری شد.

محاسبه ی فاکتور انتقال

جهت ارزیابی گیاهان به عنوان گیاه جذبی، فاکتور انتقال محاسبه شد.فاکتور انتقال نشان دهنده ی توانایی گیاه برای حرکت و جابجایی فلزات از ریشه به اندام هوایی می باشد و از رابطه زیر به دست می آید (Jing et al.,2014).

غلظت فلز در ریشه / غلظت فلز در اندام هوایی = فاکتور انتقال

محاسبه ی فاکتور تجمع زیستی

فاکتور تجمع زیستی برای محاسبه ی میزان تجمع فلزات سمی در گیاهان به واسطه ی مقایسه غلظت در محیط

کشت خارجی (مثل خاک یا محیط هوگلند) استفاده می شود (Jing et al.,2014) .

غلظت فلز در محلول هوگلندباشد/ غلظت فلز در اندام هوایی =فاکتور تجمع زیستی

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل‌های آماری طبق آزمایش فاکتوریل با طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار صورت گرفت و داده‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS(نسخه ۱۶) تحت آنالیز واریانس قرار گرفته و اختلاف میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح اطمینان ٪۹۵ مقایسه شدند.

نتایج

تاثیر کادمیوم و مس بر مورفولوژی گیاه پسته در شرایط میکوریزی و غیر میکوریزی

آنالیز آماری داده ها بر طبق جداول تجزیه واریانس (جدول۱، ۲) نشان از معنی دار بودن اثرات متقابل مس و میکوریز و نیز کادمیوم و میکوریز بر صفات مورفولوژیک در سطح احتمال ۱ درصد می باشد ($p\leq ۰/۰۱$).

افزایش غلظت کادمیوم طول ساقه پسته را به طور معنی‌داری کاهش داد که این کاهش در پسته های میکوریزی به طور معنی داری کمتر بود (نمودار۱) . همچنین در این تحقیق با افزایش غلظت مس طول ساقه پسته های میکوریزی و غیر میکوریزی به طور معنی‌داری کاهش یافت که البته طول ساقه پسته های تلقیح شده به طور معنی داری بیشتر از گیاهان غیر میکوریزی بود (نمودار ۱).

افزایش غلظت کادمیوم طول ریشه پسته را به طور معنی داری کاهش داد که این کاهش در پسته های میکوریزی به طور معنی داری کمتر بود (نمودار ۲) و طبق نتایج در غیاب و حضور کادمیوم گیاهان تلقیح شده طول ریشه بیشتری داشتند. طبق نتایج این تحقیق با افزایش غلظت مس طول ریشه پسته های میکوریزی و غیر میکوریزی به طور معنی داری کاهش یافت که در پسته های تلقیح شده با به طور معنی داری رشد ریشه بیشتری بود (نمودار۲).

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) درصد آغشتگی، شاخص های رشدی، میزان کادمیوم ریشه و ساقه

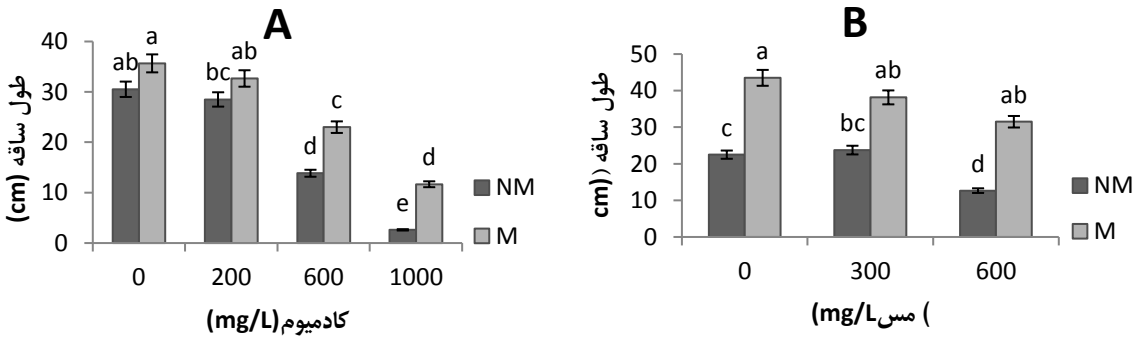
منابع تغییر	درجه آزادی	درصد آغشتگی	طول ریشه	طول ساقه	وزن خشک ریشه	وزن خشک ساقه	میزان کادمیوم ریشه	میزان کادمیوم ساقه
میکوریز	۱	۹۳۵۵/۸۸۶**	۶۱۳/۰۸۳**	۵۷۴/۶۰۵**	۶/۶۷۳**	۲/۶۷۶**	۰/۳۰۹**	۱/۰۸۱**
کادمیوم	۳	۲۱۶/۳۱۱**	۸۳۶/۲۰۱**	۷۱۲/۸۶۵**	۷/۵۹۶**	۱/۹۴۳**	۰/۱۶۱**	۲/۱۹۴**
میکوریز*کادمیوم	۳	۲۰۹/۲۳۲**	۰/۰۸۷*	۵/۰۵۵**	۰/۴۷۷**	۰/۶۵۲**	۰/۰۰۱^{ns}	۰/۴۷۶^{ns}
خطا	۱۴	۱/۶۵۱	۰/۰۴۳	۰/۰۲۹	۰/۶۷۰	۰/۷۸۵	۰/۰۰۲	۰/۰۱

** ،* و ^{ns} به ترتیب معنی داردر سطح احتمال ۱ ، ۵ درصد وغیر معنی دار.

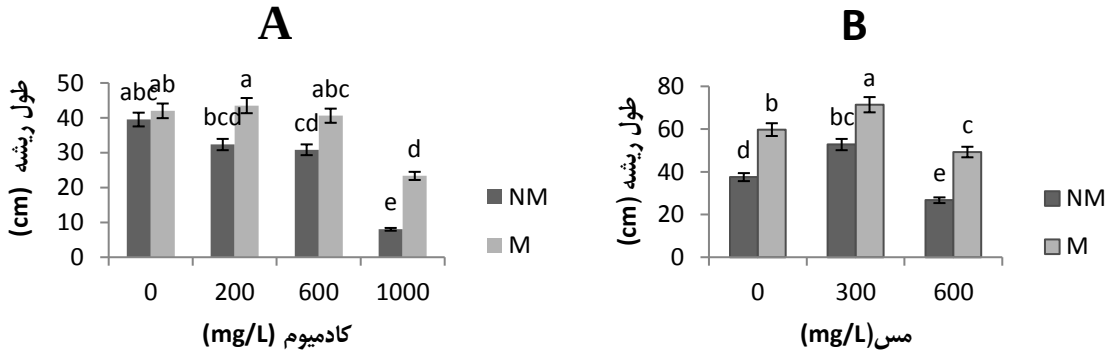
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) درصد آغشتگی، شاخص های رشدی، میزان مس ریشه و ساقه

منابع تغییر	درجه آزادی	درصد آغشتگی	طول ریشه	طول ساقه	وزن خشک ریشه	وزن خشک ساقه	میزان مس ریشه	میزان مس ساقه
میکوریز	۱	۱۰۴۱۶/۰۵۶**	۸۹۷/۸۹۱**	۱۵۴۹/۳۸۹**	۰/۰۰۵**	۰/۰۱۴**	۰/۱۷۹^{ns}	۰/۷۴۵**
مس	۲	۲۰۴/۲۲۲**	۳۹۰/۸۵۲**	۱۵۴/۱۶۷*	۰/۰۰۲**	۰/۰۰۸**	۱۰/۴۹۵**	۱/۴۸۸**
میکوریز*مس	۲	۲۰۴/۲۲۲**	۲/۹۸۹**	۷۰/۳۸۹**	۰/۰۰۱**	۰/۰۰^{ns}	۰/۱۱۰^{ns}	۰/۲۱۳^{ns}
خطا	۱۲	۱/۵۰۰	۷/۴۵۱	۳۹/۰۸۳	۷/۱۸۲	۰/۰۰۱	۰/۵۰۰	۰/۰۶۳

** ،* و ^{ns} به ترتیب معنی داردر سطح احتمال ۱ ، ۵ درصد وغیر معنی دار.



نمودار ۱- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس(B) بر طول ساقه گیاه پسته میکوریزی (M) و غیر میکوریزی(NM)

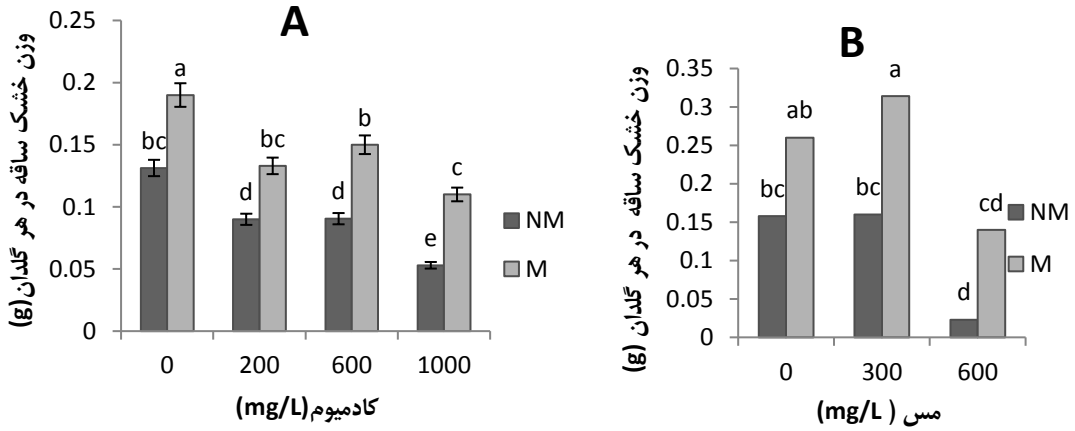


نمودار۲- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس (B) بر طول ریشه گیاه پسته میکوریزی (M) و غیر میکوریزی(NM)

افزایش غلظت کادمیوم وزن خشک ساقه پسته را به طور معنی‌داری کاهش داد که این کاهش در پسته های میکوریزی به طور معنی داری کمتر بود (نمودار۳) و طبق نتایج در غیاب و حضور کادمیوم گیاهان تلقیح شده وزن خشک ساقه بیشتری داشتند.

با افزایش غلظت مس وزن خشک ساقه پسته های غیر میکوریزی کاهش یافت که البته بین غلظت ۰ و ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر تفاوت معنی دار نبود ولی در غلظت ۶۰۰ میلی گرم بر لیتر در پسته های غیر میکوریزی تفاوت معنی دار

بود. پسته های تلقیح شده در غلظت ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر به طور معنی داری رشد بیشتری داشتند در حالی که در غلظت های ۰ و ۶۰۰ میلی گرم بر لیتر این تفاوت معنی دار نبود (نمودار ۳).

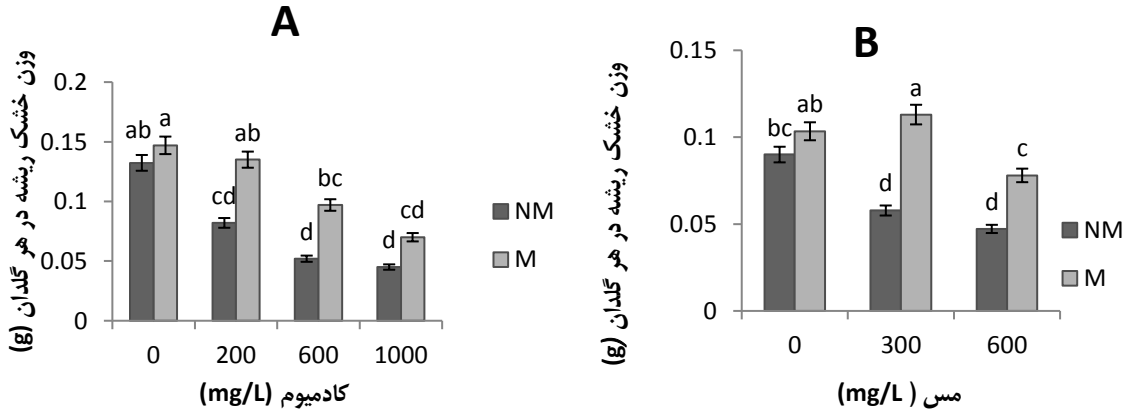


نمودار ۳- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس(B) بر وزن خشک ساقه گیاه پسته میکوریزی (M) و غیر میکوریزی(NM)

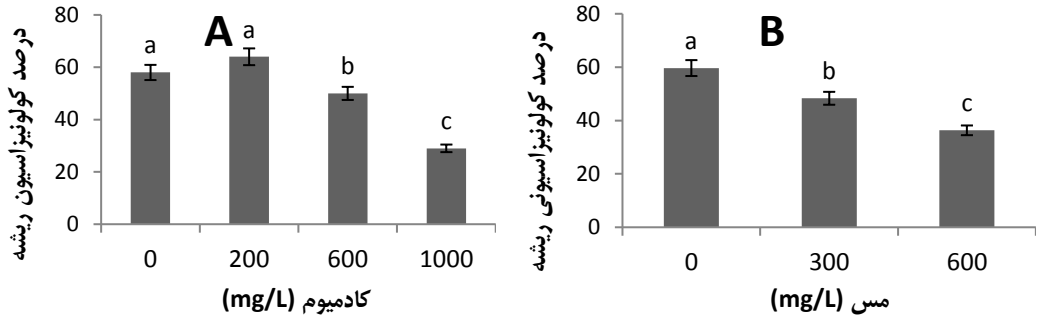
افزایش غلظت کادمیوم وزن خشک ریشه پسته را به طور معنی‌داری کاهش داد که این کاهش در پسته های میکوریزی به طور معنی داری کمتر بود (نمودار ۴) و طبق نتایج در غیاب و حضور کادمیوم گیاهان تلقیح شده وزن خشک ریشه بیشتری داشتند. با افزایش غلظت مس وزن خشک ریشه پسته های غیر میکوریزی کاهش معنی داری پیدا کرد. پسته های تلقیح شده نسبت به پسته های غیر میکوریزی به غیر از حالت شاهد به طور معنی داری وزن خشک بیشتری داشتند و بین پسته های میکوریزی نیز در دو غلظت ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم بر لیتر مس تفاوت معنی دار بود (نمودار ۴).

درصد کولونیزاسیون

نتایج این مطالعه نشان داد درصد کولونیزاسیونریشه نهال های پسته با افزایش غلظت کادمیوم و مس در خاک به طور معنی داری کاهش پیدا کرد (نمودار۵).



نمودار ۴-تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس(B) بر وزن خشک ریشه گیاه پسته میکوریزی (M) و غیر میکوریزی(NM)

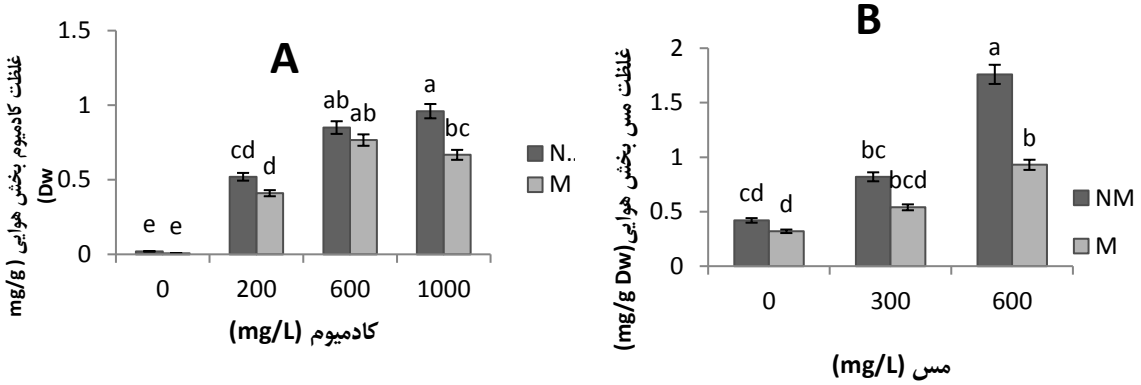


نمودار ۵- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم(A) و مس(B) بر درصدکولونیزاسیون ریشه گیاه پسته میکوریزی

میزان کادمیوم و مس بخش هوایی در دو وضعیت میکوریزی و غیر میکوریزی

نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم،غلظت کادمیوم در بخش هوایی افزایش می یابد اما غلظت کادمیوم در بخش هوایی گیاهان میکوریزی نسبت به غیر میکوریزی در غلظت mg/L ۱۰۰۰ پایین تر بود(نمودار ۶) و در غلظت های پایین (۲۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم بر لیتر)اختلاف معنی داری بین گیاهان میکوریزی و غیر میکوریزی در این مورد مشاهده نشد.

با افزایش غلظت مس میزان مس در بخش هوایی نیز افزایش پیدا کرد ولی غلظت مس در بخش هوایی گیاهان میکوریزی نسبت به غیر میکوریزی در غلظت ۶۰۰mg/L پایین تر بود(نمودار۶).

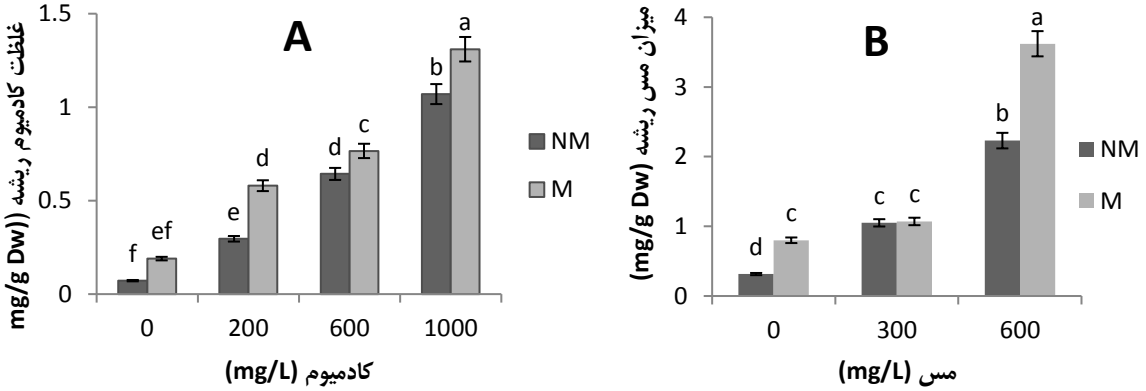


نمودار۶- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس (B) بر میزان کادمیوم و مس بخش هوایی گیاه پسته میکوریزی (M) و غیر میکوریزی(NM)[1]

میزان کادمیوم و مس ریشه در دو وضعیت میکوریزی و غیر میکوریزی

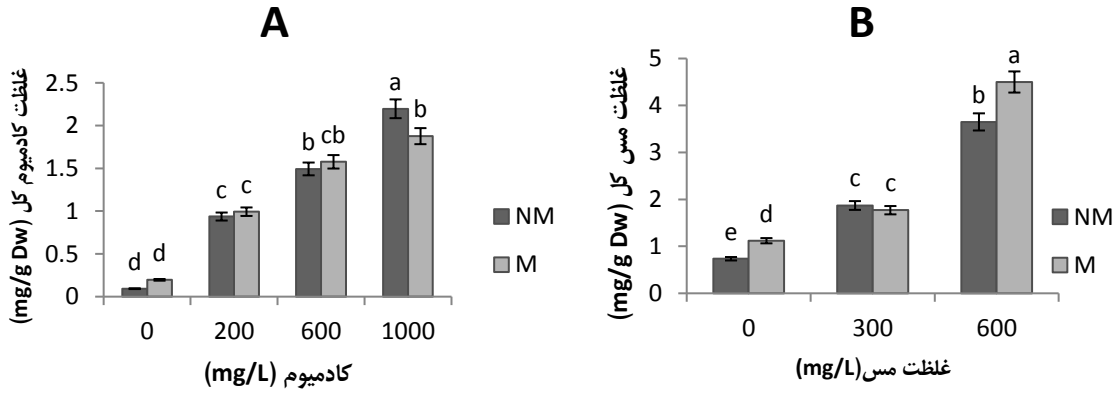
نتایج نشان داد که غلظت کادمیوم در ریشه گیاهان با افزایش غلظت کادمیوم به طور معنی داری افزایش می یابد و در گیاهان میکوریزی نسبت به غیر میکوریزی نیز مقدار کادمیوم به طور معنی داری بالاتر بود(نمودار ۷).

طبق نتایج غلظت مس در ریشه گیاهان میکوریزی نسبت به غیر میکوریزی تفاوت معنی داری نشان نداد (نمودار ۷) ولی به طور کلی غلظت مس ریشه با افزایش غلظت مس افزایش نشان داد. در وضعیت میکوریزی و غیر میکوریزی به طور جداگانه در غلظت ۶۰۰ میلی گرم بر لیتر مس تفاوت معنی دار بود.



نمودار ۷- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس (B) بر میزان کادمیوم و مس ریشه گیاه پسته میکوریزی (M) و غیر میکوریزی(NM)

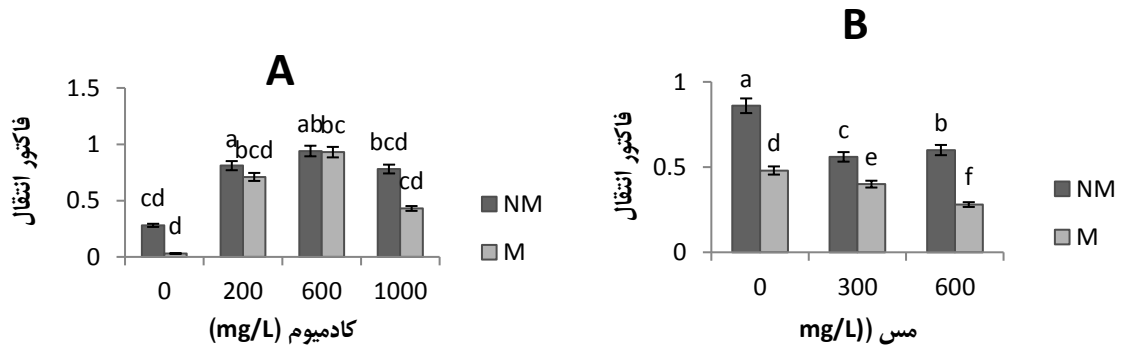
نتایج نشان داد که غلظت کادمیوم کل گیاهان با افزایش غلظت کادمیوم به طور معنی داری افزایش یافت و در گیاهان میکوریزی نسبت به غیر میکوریزی به استثنای غلظتmg/L ۱۰۰۰ در بقیه غلظت ها مقدار کمی بیشتر بود(نمودار ۸). طبق نتایج غلظت مس کل با افزایش غلظت مس افزایش نشان داد و درغلظت mg/L . و۶۰۰ در گیاهان میکوریزی نسبت به غیر میکوریزی به طور معنی داری بیشتر بود (نمودار ۸).



نمودار ۸- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس (B) بر میزان کادمیوم و مس کل گیاه پسته میکوریزی (M) و غیر میکوریزی(NM)

فاکتورانتقال

فاکتورانتقال (TF) محاسبه شده نشان میدهدکه با افزایش غلظت کادمیم درخاک فاکتور انتقال تا غلظت ۶۰۰ میلی گرم بر گرم درگیاهان میکوریزی و غیر میکوریزی افزایش نشان می دهد اما در غلظت ۱۰۰۰ میلی گرم بر گرم فاکتور انتقال کاهش می یابد(نمودار۹) که البته در گیاهان میکوریزی فاکتور انتقال پایین تراز گیاهان غیرمیکوریزی بود اگر چه این تفاوت معنی دار نبود. فاکتورانتقال(TF) محاسبه شده دادکه با افزایش غلظت مس درخاک فاکتور انتقال کاهش می یابد(نمودار۹) و در گیاهان میکوریزی نیز هم در شرایط تنش و هم در شرایط غیر تنش فاکتور انتقال پایین تر از گیاهان غیرمیکوریزی بود.

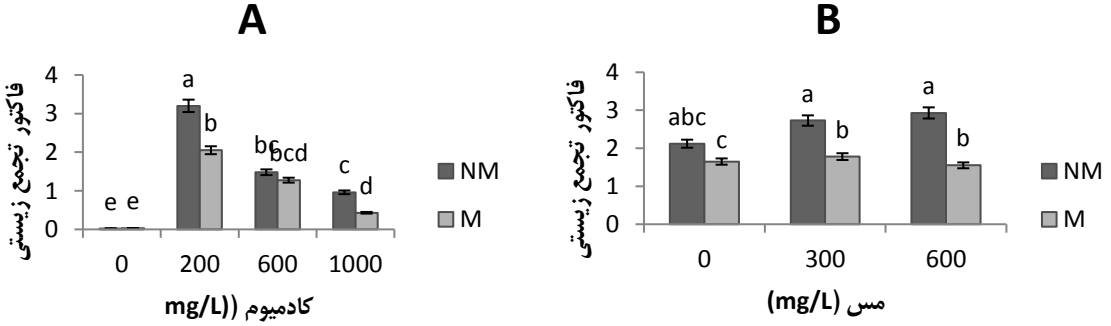


نمودار ۹- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس(B) بر میزان فاکتور انتقال گیاه پسته میکوریزی (M) و غیر میکوریزی(NM)

فاکتور تجمع زیستی

بر اساس مطالعه انجام گرفته مشخص شد که در تیمار با کادمیوم ومس مقدار فاکتور تجمع زیستی در گیاهان میکوریزی پایین تر از گیاهان غیر میکوریزی بوده است که البته در غلظت ۲۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم بر گرم کادمیوم این اختلاف معنی دار بود ولی در در غلظت ۶۰۰ میلی گرم بر گرم اختلاف معنی داری مشاهده نشد (نمودار ۸). در تیمار با مس فقط در وضعیت شاهد اختلاف معنی دار نبود (نمودار ۱۰).

در این مطالعه محاسبه فاکتور تجمع زیستی در مورد کادمیوم نشان داد که در تنش کادمیوم در مقایسه با گیاه شاهد این پارامتر افزایش می یابد و این مقدار با افزایش شدت تنش رابطه معکوس دارد. همزیستی گیاه پسته با قارچ نیز توانست فاکتور تجمع زیستی را در این گیاه کاهش دهد (نمودار ۱۰).در تنش مس فاکتور تجمع زیستی افزایش غیر معنی دار داشت و همزیستی میکوریزی در شرایط تنش توانست این پارامتر را کاهش دهد(نمودار ۸).



نمودار ۱۰- تأثیر غلظتهای متفاوت کادمیوم (A) و مس(B) بر میزان فاکتور تجمع زیستی در گیاه پسته میکوریزی (M) و غیر میکوریزی(NM)

بحث

همانطور که نتایج نشان می دهد سمیت کادمیوم و مس طول ریشه و ساقه و نیز وزن خشک ریشه و ساقه پسته را به طور معنی‌داری کاهش داد. طبق نتایج (Zang et al.,2018) نیز آلودگی خاک با کادمیوم درریشه های گیاه *Lolium perenne* منجر به کاهش زیتوده بخش زیرزمینی شد.کاهش پارامترهای رشد در گیاه پسته همزمان با افزایش کادمیوم و مس در خاک می تواند مربوط به ممانعت از میتوز، کاهش تشکیل دهنده های دیواره،آسیب به دستگاه گلژی و تغییر در متابولیسم پلی ساکاریدها باشد (Sai kachout et al.,2010) .فلزات سنگین با کاهش شدید فتوسنتز و انتقال تولیدات فتوسنتزی،تقسیم سلولی و رشد گیاه را به شدت کاهش می دهند(Dalla et al., 2005).

کاهش وزن خشک ریشه در غلظتهای بالای فلزات مس و کادمیوم در گیاهان غیرمیکوریزی بارزتر از گیاهان میکوریزی بود. این شواهد نشان میدهد سمیت یا به طور مستقیم به خاطر تنش اکسیداتیو سلولی ناشی از جذب فلز(Cho andseo,2005) یا غیرمستقیم به دلیل عدم تعادل عناصرغذایی در اثر افزایش غلظت در ریزوسفر روی می دهد (Kabata-pendias, 2011). درصد کولونیزاسیون ریشه نهال های پسته با افزایش غلظت کادمیوم و مس در محیط کشت به طور معنی داری کاهش پیدا کرد.

نتایج این آزمایش با نتایج سایر محققان مطابقت داشت.(Andrade et al., 2004; Yamin et al., 2023). ثابت ماندن کولونیزاسیون در غلظتهای پایین مس و کادمیوم نشان دهنده افزایش ترجیح گیاه جهت برقراری همزیستی در شرایط تنش می باشد (Audet and Charest, 2009). از سوی دیگر کاهش کولونیزاسیون ریشه در بالاترین غلظت مس و کادمیوم احتمالاً ناشی از افزایش سمیت فلزات است. در این پژوهش غلظت کادمیوم کل در غلظت های پایین کادمیوم (غلظتmg/L ۲۰۰ و mg/L ۶۰۰) در گیاهان میکوریزی نسبت به غیر میکوریزی افزایش محسوسی نداشتولی در غلظت های بالای کادمیوم (غلظتmg/L ۱۰۰۰) در گیاهان میکوریزی نسبت به غیر میکوریزی کاهش معنی دارینشان داد که تایید کننده این است که قارچهای میکوریزی توانسته اند گیاه را در برابر سمیت کادمیوم با غیر متحرک کردن این فلز در ریشه و خاک محافظت کنند. در پژوهشی روی گیاه برنج و *Solanum nigrum* نیز تلقیح با قارچ میکوریزآربوسکولار تحت شرایط آلودگی با کادمیوم زیتوده گیاه را افزایش می دهد و سیستم آنتی اکسیدان گیاه را فعال می کند و از طرفی سطح کادمیوم وارد شده به دانه را کاهش می دهد (Yang et al.,2021). در پژوهش دیگری روی غلات محتوای کادمیوم محصول با تلقیح گیاه با قارچ میکوریز آربوسکولار همزمان با افزودن کادمیوم کاهش پیدا کرد اما جذب کادمیوم افزایش نشان داد که نشان می دهد قارچ میکوریز آربوسکولارنقش مثبتی در افزایش رشد گیاه دارد. در واقع می توان نتیجه گرفت که قارچ میکوریز زیتوده گیاه را سریع تر از میزان جذب کادمیوم افزایش می دهد که باعث می شود که علی رغم افزایش جذب کادمیوم میزان کادمیوم گیاه کاهش نشان بدهد (Yamin et al., 2023). بنابراین پیشنهاد می شود که گیاهان میکوریزی با زیتوده بیشتر می توانند در گیاه پالایی[1] در خاکهای آلوده و با کادمیوم بالا مورد استفاده قرار گیرند. فاکتورانتقال محاسبه شده نشان می دهدکه با افزایش غلظت کادمیوم و مس درخاک فاکتور انتقال درگیاهان میکوریزی و غیر میکوریزی کاهش نشان می دهد که البته در گیاهان میکوریزی فاکتور انتقال به طور معنی داری پایین تر از گیاهان غیرمیکوریزی بود. در پژوهش های انجام شده توسط سایر محققین نیز بر جذب فلزات سنگین توسط گیاه شبدر سفید این فاکتور در گیاهان میکوریزی ۱۰ تا ۲۰ برابر کم تر از گیاهان غیر میکوریزی گزارش شده است (Madani etal.,2013).

مکانیسم های مقاومتی گیاهان به فلزات سنگین شامل دو

[1] Phytoremediation

استراتژی ممانعت از جذب و یا تجمع فلز در اندام گیاه است (zou and song, 2004) .به طوری که در استراتژی تجمع ($TF \geq 1$) گیاه مقادیر بالاتری ازفلز را به اندام هوایی منتقل می کند و تنها مقادیر ناچیزی در ریشه ذخیره می شود و در استراتژی ممانعت از جذب ($TF \leq 1$) مقادیر بالاتری از فلز در ریشه ذخیره می شود (Sun et al,2009). نتایج نشان داد که در پسته در در هر دو وضعیت میکوریزی و غیر میکوریزی TF 1 ≤است. صرف نظر از تأثیر ساختارهای قارچی درکمپلکس کردن فلز وکاهش انتقال به بخش هوایی عوامل دیگری میتوانند دلیلی برای کاهش انتقال فلز باشند. یکی از دلایلی که میتوان برای کاهش انتقال کادمیوم ومس به بخش هوایی گیاهان بیان کرد این است که با توجه به اینکه انتقال فلز به اندام هوایی ازطریق آوندهای چوبی صورت می گیرد و عامل انتقال دراین آوندها، شیب هیدروستاتیک و شیب پتانسیل آب است، بنابراین با کاهش رشد گیاهان دراثر افزایش غلظت کادمیوم ومس، میزان تبخیر و تعرق کاهش ومیزان انتقال دراین آوندها نیز کاهش می یابد(Kholdebarin and Islamzadeh, 2002). باتوجه به اثر بازدارنده فلزسنگین بر شدت فتوسنتز، تولید کربوهیدراتها کاهش می یابد و به تبع آن میزان انتقال این مواد درریشه ها نیز کم می شود. ازطرف دیگر کربوهیدراتها سوبسترای اصلی برای تنفس هستند، بنابراین باکاهش میزان فتوسنتز تأمین کربوهیدراتها برای ریشه هاو حتی قارچ همزیست محدود شده و تنفس آنهاکاهش می یابد (Amanifar et al., 2010).

فاکتور تجمع زیستی (BCF) نشان دهنده ی غلظت آلاینده ها در گیاهان در مقایسه با غلظت های زیست محیطی است(Wang et al., 2013). بر اساس مطالعه انجام گرفته مشخص شد که مقدار فاکتور تجمع زیستی در گیاهان میکوریزی پایین تر از گیاهان غیر میکوریزی بوده است که البته در غلظت ۲۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم بر گرم کادمیوم این اختلاف معنی دار بود ولی در در غلظت ۶۰۰ میلی گرم بر گرم اختلاف معنی داری مشاهده نشد.

نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که در پسته $BCF \geq 1$است که نتایج حاصل با نتایج انجام شده درگیاه بادام زمینی مطابقت دارد (Nareshkumar et al, 2015). درگیاهان اسفناج وشاهی نیز درمحیط کشت آلوده به کادمیوم وکروم نیز نتایج مشابهی گزارش شد(Jahanbakhshi et al., 2015).

BCF وTCF هردوشاخص مهمی برای ارزیابی پتانسیل گیاهان برای پالایش فلزات سنگین موجود درمحیط به شمار می رود (Ghanaya, 2005; Yoon et al, 2006; Panday, 2013; Panday et al., 2014). در گیاهان تحت تنش فلزات سنگین اگر $TF \leq 1$ و $BCF \geq 1$ باشد گیاه می تواند یک مورد مناسب و بالقوه یه عنوان تثبیت کننده فلز[1] باشد (Yoon et al, 2006). از آنجا که در گیاه پسته در مورد کادمیوم و مس $TF \leq 1$ و $BCF \geq 1$ بود. بنابراین پسته می تواند یک تثبیت کننده کادمیوم و مس باشد. تلقیح گیاه پسته با قارچ *F. mosseae* نیز باعث شد که قدرت تثبیت کنندگی کادمیوم و مس ریشه افزایش یابد که با نتایج سایر پژوهشها در گیاه انگور باغی مطابقت دارد (Gustavo et al., 2023).

تجمع عنصر درگیاه بستگی به ویژگیهای گیاه،گونه و اندام گیاهی واثرات متقابل فلزات سنگین وسمیت آنها دارد و از طرفی همزیستی با قارچ میکوریز نیز تجمع فلز را متاثر می سازد که تاثیر قارچ می تواند از طریق مکانیسم های درگیر در آزادسازی گلومالین باشد که قادرند با فلزات سنگین به ویژه مس کمپلکس تشکیل دهند به علاوه ساختار های قارچی مثل هیف ها, اسپورها و وزیکولهای قارچ قادرند سبب نگه داشتن فلز اضافی شوند که باعث کاهش انتقال فلز به گیاه می شود.

[1] Phytostabilizer

نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که، تلقیح گیاه پسته با *Funneliformis mosseae* باعث افزایش رشد گیاه پسته در حضور کادمیوم و مس در مقایسه با وضعیت غیر میکوریزی می‌شود. *F. mosseae* نقش موثری در غیر متحرک سازی کادمیوم و مس در ریشه‌ها نشان داد. بنابراین بر اساس نتایج این پژوهش قارچ میکوریز*F. mosseae* می تواند به عنوان یک عامل بیولوژیکی موثر و کمک کننده در گیاه پالایی کادمیوم و مس در گیاه پسته باشد که باعث کاهش اثرات سمی کادمیوم و مس در این گیاه می گردد. بنابراین در باغات پسته می توان از قارچ میکوریز *F. mosseae* به عنوان یک کود بیولوژیک موثر هم از نظر تغذیه بهتر گیاه و هم کاهش اثرات سمیت فلزات مس و کادمیوم در خاکهای آلوده به این فلزات, استفاده نمود. همچنین *F. mosseae* می تواند به عنوان یک عامل تثبیت کننده موثر مس و کادمیوم در ریشه, هم از نظر اطمینان از سالم بودن محصول (میوه پسته) به دلیل انتقال کمتر این فلزات به بخش های هوایی گیاه و هم از نظر پالایش محیط زیست, در محیط های آلوده به این فلزات مفید واقع شود که البته نیاز هست تحقیقاتی به شکل مزرعه ای نیز در منطقه صورت گیرد تا برآورد درستی از حل مسئله به دست آید. این تحقیق یک گام کوچک در جهت شروع بررسی این مشکل در منطقه خواهد بود.

فهرست منابع

1. Amanifar, S., Aliasgharzad, N., Najafi, N., Oustan, Sh., Bolandnazar, S. (2010). Effect of Arbuscular Mycorrhizal fungi on lead phytoremediation by sorghum (Sorghum bicolor L.). Journal of Soil and Water. 22:155-170.

2. Andrade, S.A.L., Abreu, C.A., de Abreu, M.F., Silveira, A.P.D. (2004). Influence of lead addition on arbuscular mycorrhiza and Rhizobium symbioses under soybean plants. Applied Soil Ecology. 26:123-131.

3. Audet, P., Charest, C. (2009). Contribution of arbuscular mycorrhizal symbiosis to in vitro root metal uptake: from trace to toxic metal conditions. Journal of Botany. 87(10):913–921.

4. Bagheri, V., Shamshiri, M., Shirani, H. and Roosta, H. (2012) Nutrient uptake and distribution in mycorrhizal pistachio seedlings under drought stress. Journal of Agriculture Science Biochemistry 14:1591-1604.

5. Benavides, M. P., Gallego, S. M., Tomaro, M.L. (2005). Cadmium Toxicity in Plants. Braz. Journal of Plant Physiology. 17: 21-34.

6. Berti, W.R., Cunningham, S.D. 2000. Phytostabilization of metals. In: Raskin, I., Ensley, B.D. (Eds.), Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean-up the environment. Wiley. New York, pp. 71–88.

7. Cho, U.H., Seo, N.H.(2005). Oxidative stress in Arabidopsis thaliana exposed to cadmium is due to hydrogen peroxide accumulation. Plant Science. 168(1): 113-120.

8. Colla, G., Rouphael, Y., Cardarelli, M., Tullio, M., Rivera, C.M., Rea, E. (2008). Alleviation of salt stress by arbuscular mycorrhizal in zucchini plants grown at low and high phosphorus concentration. Biology and Fertility of Soils. 44:501–509.
9. Dalla vecchia,f., La Rocca,N.,Moro,I. (2005). Morphogenetic, ultrastructural and physiological damages suffered by submerged leaves of Elodea Canadensis exposed to cadmium. Plant Science.168(2):329-338.
10. FAO, UNEP, (2020). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). http://www.fao.org/faostat/en/?#data/.
11. Ghnaya, T.(2005). Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two halophytes: Sesuvium portulacastrum and Mesembryanthemum crystallinum. Journal of Plant Physioloy. 162: 1133–1140.
12. Giovannetti, M. and Mosse, B. (1980). An evaluation of techniques for measuring vesicular–arbuscular infection in roots. New Phytologist. 84:489–500.
13. Guerrero M.M. Ros C.Martínez M.A. Martínez M.C. BarcelóN.L acasaA.(2005).Biofumigación con solarización. Un método estable de desinfección de suelos de invernadero. Acta Portuguesa de Hort.7(3):111-115.
14. Gustavo Brunetto , Anderson C. R. Marques , Edicarla Trentin , Paula B. Sete , Cláudio R. F. S. Soares , Paulo A. A. Ferreira , George W. B. de Melo , Jovani Zalamena , Lincon O. S. da Silva, Carina Marchezan , Isley C. B. da Silva , João P. J. dos Santos , Leticia Morsch, .(2023). Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation as strategy to mitigate copper toxicity in young field-grown Vines.J viticulture Enol. 38(1): 60-66.
15. Harahap,L.H.,Hanafiah,A.S. and Guchi,H.(2018).The effectiveness of mycorrhizal application on the absorption of N and P nutrients from rubber plants on drought stressed land that has been given organic matter. Agroecotechnology.6(1): 167-173.
16. Jahanbakhshi, Sh., Rezaei, M.R., Sayyari-Zaman, M.H. (2015). Comparison effect of phytoremediation in cadmium and chromium contaminated soil in Spinacia oleracea and Lepidium sativum. Journal of Water and Soil . 18(70): 1-11.
17. Jazaeri , M.S. Akhgar A.R .and Sarcheshmehpour M. (2015).Comparison of the native phosphate rock and imported triple superphosphate treated with sulfur and Thiobacillus in transferring lead and Cadmium into Pistachio seedling . Journal of Soil Management and Sustainable Production. 5(3):25-44.
18. Jing, Y., Cui, H., Li, T., Zhao, Z. (2014). Heavy metal accumulation characteristics of Nepalese alder (Alnus nepalensis) growing in a lead-zinc spoil heap, Yunnan, south-western China. iForest– Biogeosci Forestry. 7: 204–208.
19. Joner, E.J., Briones, R., Leyval, C. (2000). Metal-binding capacity of arbuscular mycorrhizal mycelium. Plant and Soil. 226: 227–234.
20. Jones, J., Benton. (2001). Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis CRC press –LLC . ISBN 0-8493-0206-4 (alk paper).

21. Kabata- Pendias, A., Pendias, H. (2001). Trace Elements in Soils and Plants. 3rd ed. CRC Press Inc., Baton Rouge, USA.

22. Kholdbryn, B., Islamzadeh, T. (2002). Mineral nutrition of higher plants. In two volumes Shiraz University Press. (In Persian).

23. Kirkham, M.B. (2006). Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. Geoderma, 137, 19–32.
24. Lasat, M.M.(2002). Phytoextraction of toxic metals – A review of biological mechanisms. Joournalof Environmental Qualityl. 31: 109–120.

25. Lee, Y.J., George, E. (2005). Development of nutrient film technique culture system for arbuscular mycorrhizal plants. Hortscience. 40(2:378-380.
26. Madani, A., Lakzian, A., Haghnia, Gh., 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 Sciences. 17,63: 37-46.

27. Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R.D., Govindarajan, R., Kuriakose, S.V., Prasad, M.N.V. (2006). Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in Bacopa monnieri L. Plant Physiology and Biochemistry. 44:25–37.
28. Nareshkumar, A., Nagamallaiah, G.V., Pandurangaiah, M., Kiranmai, K., Amaranathareddy, V., Lokesh, U., Venkatesh, B. and Sudhakar, C. (2015). Pb-Stress induced oxidative stress caused alterations in antioxidant efficacy in two groundnut (Arachis hypogaea L.) cultivars. Agricaltural Sciences.6:1283-1297.

29. Ouziad, F., Hildebrandt, U., Schmelzer, E., Bothe, H. (2005). Differential gene expressions in arbuscular mycorrhizal-colonized tomato grown under heavy metal stress. J Plant Physiol. 162:634–649.
30. Pandey, V.C. (2013). Suitability of Ricinus communis L. cultivation for phytoremediation of fly ash disposal sites. Ecol Eng. 57: 336–341.

31. Pandey, V.C., Singh, N., Singh, R.P., Singh, D.P. (2014). Rhizoremediation potential of spontaneously grown Typha latifolia on fly ash basins: study from the field. Ecological Engineering. 71:722–727.
32. Rabie, G.H. (2005). Contribution of AM fungus to red kidney and wheat plants tolerance grown in heavy metal-polluted soil. African Journal of Biotechnology. 4(4): 332-345.
33. Radmehr, A. (2010) The results of a sample survey design horticultural products in 1387. Ministry of Agriculture, Tehran. (in Farsi).

34. Rajapakse, S., Ghton, C. R. E., Miller, Jr. J. (1992). Methods for studying vesicular –arbuscular mycorrhizal root colonization and related root physical properties . Methods in microbiology . volum 24 . ISBN 0-12-521524-X.

35. Sai Kachout, S., Ben Mansoura, A. J.C., Leclerc, J. C., Mechergui, R., Rejeb, M. N., Ouerghi, Z. (2010). Effect of heavy metals on antioxidant activities of Atriplex

hortensis and A. rosea . Electronic Journal of Environmental Agricultural and Food Chemistry 9: 444-457.

36. Sara, A.L. de Andrade., Adriana, P.D. da Silveira., (2008) . Mycorrhiza influence on maize development under Cd stress and P supply. Braz Journal of plant physioloy. 20(1):39-50.

37. Shamsaldin, H., Jalali, V. and Jafari, A. (2015). Evaluation of environmental pollution indices around the Sarcheshmeh copper factory.Journal of Agricultural Engineering. 38(2): 37-53.

38. Sun, F.F., da Wen, Z., Kuang, Y.W., Li, J., Zhang, J.G. (2009). Concentrations of sulphur and heavy metals in needles and rooting soils of masson's pine (Pinus massoniana L.) trees growing along an urban–rural gradient in Guangzhou, China. Environ Monit Assess.154:263–274.

39. Wang, T.X., Yin, Z.H., Zhang, W., Peng, T., Kang, W.Y. (2013).Chemical constituents from Psoralea corylifolia and their antioxidant alpha-glucosidase inhibitory and antimicrobial activities. China journal of Chinese Materia Medica. 38(14):2328-2333.

40. yang, X., Qin, J., Li, J., Lai, Z., Li, H. (2021). Upland rice intercropping with Solanum nigrum inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi reduces grain Cd while promoting phytoremediation of Cd-contaminated soil. J. Hazard. Mater. 406, 124325 https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124325.

41. Yamin Gao a,b , Tingting An b,c , Qiqiang Kuang a,b , Yujie Wu a,b , Shuo Liu a,b , Liyan Liang b,c , Min Yu d,e , Andrew Macrae f,g , Yinglong Chen. (2023). The role of arbuscular mycorrhizal fungi in the alleviation of cadmium stress in cereals: A multilevel meta-analysis. Science of Total Environment.902:1-14

42. Yoon, J. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. Science of Total Environment. 368: 456–464.

43. Yurekli, F., Kucukbay, Z. (2003). Synthesis of phytochelatins in Helianthus annuus is enhanced by cadmium nitrate. . Acta Botanica Croatica. 62(1): 21–25.

44. Zhang, H., Xu, N., Li, X., Long, J., Sui, X., Wu, Y., Li, J., Wang, J., Zhong, H., Sun, G.Y. (2018). Arbuscular Mycorrhizal Fungi (Glomus mosseae) Improves Growth, Photosynthesis and Protects Photosystem II in Leaves of Lolium perenne L. in Cadmium Contaminated Soil. Frontiers in Plant Science, 9,1156. doi: 10.3389/fpls.2018.01156

45. Zhou, Q.X., Song, Y.F. (2004). Principles and method of treating contaminated soil remediation, Science Press, Beijing, pp.489.

Role of *Funneliformis mosseae* Mycorrhizal Fungus in Absorption, Transfer and Bioaccumulation Pattern of Cadmium and Copper in Pistachio Plant

N. Rohani*

Department of Biology, Payam-e-Noor University, Tehran, Iran: N_rohani@pnu.ac.ir

«Research Article»

Received: April 30, 2024 and Accepted: October 22, 2024

Abstract

The toxicity of metals is an important environmental problem due to their persistence, non-biodegradability, and their bioaccumulation in the organs of living plants and animals.

One of the methods that can be used for reducing the harmful effects of heavy metals especially cadmium and copper, is the use of mycorrhizal fungus. This research was conducted to determine the effect of the mycorrhizal fungus *Funneliformis mosseae* on absorption and transfer of cadmium and copper of pistachio cultivar Ahmad Aghaei in response to increasing soil copper and cadmium concentrations. The experiment was performed in factorial form of a completely randomized blocks consist of three levels of copper (0, 300 and 600 mg/L of copper nitrate),four levels of cadmium (0, 200, 600 and 1000 mg/L of cadmium nitrate) and two treatments: inoculated with *F.mosseae* and without mycorrhizal inoculum. In all the control and plants treated with cadmium and copper, the length and dry weight of root and stem of mycorrhizal plants were more than non-mycorrhizal plants. Also the amount of cadmium and copper transferred from their root to the aerial part (Translation Factor) was significantly lower than the non-mycorrhizal plants. The results showed that the Bioconcentration Factor in plants inoculated with mycorrhizal fungus was significantly lower than non-mycorrhizal plants. Therefore the symbiosis with *F. mosseae* caused more stabilization and accumulation of cadmium and copper in the root.

Key words: Heavy metal, Phytoremediation, Symbiosis, Translocation Factor

* - Corresponding author's email N_rohani@pnu.ac.ir