جذب عناصر غذایی کم‌مصرف تحت تأثیر برهمکنش کرم‌های خاکی (*Eisenia fetida*) و قارچ مایکوریزا آربوسکولار (*Funneliformis mosseae*) توسط ذرت

حمید دهقانیان[۱]، اکرم حلاج‌نیا [۲*]، امیر لکزیان[۳]، علیرضا آستارایی[۴]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۰۴)

چکیده

مطالعه حاضر به‌منظور ارزیابی تأثیر کرم خاکی (ایزینیا فتیدا) و قارچ مایکوریزا آربوسکولار (فنلی فرمیس موسه) و همچنین اثرات متقابل آن‌ها بر کلنیزاسیون ریشه، pH خاک، کربن آلی محلول و غلظت عناصر غذایی آهن، روی، مس و منگنز در ذرت انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل شاهد، کرم خاکی، مایکوریزا و کرم خاکی + مایکوریزا در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه‌ای در گلدان به اجرا درآمد. نتایج نشان داد که حضور کرم‌های خاکی در تیمار کرم خاکی + مایکوریزا اثر معنی‌داری بر درصد کلنیزاسیون ریشه در مقایسه با تیمار مایکوریزا نداشت. همچنین تیمارهای آزمایش به طور معنی‌داری موجب کاهش pH خاک نسبت به تیمار شاهد شدند. اگرچه تیمارهای آزمایش به طور معنی‌داری موجب افزایش وزن خشک اندام هوایی گیاه، کربن آلی محلول خاک و فراهمی عناصر آهن، مس، روی و منگنز در خاک نسبت به شاهد شدند، با این حال تأثیر متفاوتی بر جذب عناصر به‌وسیله گیاه داشتند. بیشترین غلظت روی و منگنز در اندام هوایی گیاه در تیمار مایکوریزا به دست آمد، که از نظر آماری نسبت به سایر تیمارها معنی‌دار بود ($p<0.05$). حضور کرم خاکی در تیمار کرم خاکی + مایکوریزا جذب روی و منگنز را به ترتیب ۳۲ و ۱۵/۵ درصد نسبت به تیمار مایکوریزا کاهش داد که احتمالاً به دلیل تأثیر منفی کرم خاکی بر گسترش هیف‌های قارچ بوده است. در حالی که فعالیت کرم‌های خاکی تأثیر معنی‌داری بر جذب و غلظت آهن و مس در تیمار کرم خاکی + مایکوریزا نداشت.

واژه‌های کلیدی: فراهمی عناصر غذایی، کلنیزاسیون ریشه، کربن آلی محلول ،کرم خاکی، همزیستی مایکوریزایی

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد
۲-استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد (مکاتبه کننده)
۳-استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد
۴- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد
*پست‌الکترونیک:halajnia@um.ac.ir

مقدمه

عناصر غذایی کم‌مصرف در اعمال مختلف بیوشیمیایی سلول‌های گیاهی نقش غیرقابل انکاری دارند. هر عامل محیطی که موجب غیرقابل‌دسترس شدن این عناصر برای گیاه گردد، باعث بروز علائم ناشی از کمبود به شکل‌های مختلف از قبیل کاهش عملکرد دانه و همچنین کاهش غلظت این عناصر در بافت گیاهی می‌شود (Sepehr, 1998). کمبود عناصر کم‌مصرف در خاک منحصر به کشور ما نبوده و بخش وسیعی از پژوهش‌ها در سایر کشورها را پژوهش در زمینه عناصر کم‌مصرف تشکیل می‌دهد (Sepehr, 1998). پائین بودن غلظت عناصر غذایی نظیر آهن، منگنز، روی و مس در مواد غذایی کشور مسئله‌ساز شده است. کمبود این عناصر در تولیدات کشاورزی، یکی از علل ظهور و گسترش بیماری‌های مختلف و حالات روانی در جوامع انسانی است که عمدتاً به دلیل کمبود یا عدم مصرف کودهای حاوی این عناصر غذایی در کشاورزی می‌باشد (Sepehr, 1998). از طرفی مصرف بی‌رویه و نامتعادل کودهای شیمیایی سبب گردیده توازن عناصر غذایی به‌ویژه عناصر کم‌مصرف در خاک به‌هم‌خورده و منجر به کاهش جذب عناصر آهن، روی، مس و منگنز توسط گیاه گردیده به‌علاوه شرایط آهکی و قلیائی خاک‌های زراعی از دیگر عوامل محدودکننده جذب عناصر کم‌مصرف می‌باشد (Sepehr, 1998). در خاک‌های آهکی، فراهمی و قابلیت استفاده عناصر غذایی کم‌مصرف به دلیل pH زیاد، کاهش می‌یابد که غالبا نیاز گیاهان به این عناصر تأمین نمی‌شود (Alloway, 2009). مصرف درست و متناسب انواع نهاده‌های کشاورزی به‌ویژه کودهای زیستی یکی از راه‌های تأمین عناصر کم‌مصرف است که در راستای سیاست‌های توسعه کشاورزی پایدار از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. کودهای زیستی حاوی مواد حامل با جمعیت متراکم یک یا چند نوع جاندار مفید خاکزی و یا به‌صورت فرآورده متابولیک این موجودات می‌باشند، که به‌منظور بهبود حاصلخیزی خاک و عرضه مناسب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه در یک سامانه کشاورزی پایدار به کار می‌روند (Saleh Rastin, 2001). در سال‌های اخیر کودهای زیستی به‌عنوان جایگزینی مناسب برای کودهای شیمیایی، به‌منظور افزایش حاصلخیزی خاک در تولید محصولات در کشاورزی پایدار مطرح شده‌اند (Wu *et al.*, 2005). کرم‌های خاکی و قارچ‌های مایکوریزا آربوسکولار (AMF[1]) به ترتیب از اجزای مهم درشت‌جانوران و ریزجانداران رایزوسفر خاک هستند که می‌توانند فراهمی عناصر را در خاک تغییر دهند. کرم‌های خاکی مهم‌ترین اجزای درشت‌جانوران در خاک (Tao *et al.*,2009) و شاخص مفیدی برای سلامت و کیفیت خاک هستند (Sizmur & Hodson, 2009) که می‌توانند ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را از طریق مدفوع و فعالیت‌های خود تحت تأثیر قرار دهند (Ponder *et al.*, 2000). به نظر می‌رسد کرم‌های خاکی با کاهش pH خاک می‌توانند فراهمی عناصر به ویژه عناصر فلزی را افزایش دهند (Kizilkaya, 2004). با این وجود، بیشتر مطالعه‌ها نشان می‌دهد که اثر فعالیت کرم خاکی به دلیل ترشح مواد موکوپروتئینی، بیشتر باعث افزایش pH خاک می‌شود (Wen *et al.*, 2006؛Udovic & Lestan, 2007). همچنین افزایش در قابلیت دسترسی عناصر پس از تلقیح کرم خاکی در سطح پایین تا متوسط از فلزات آلوده، با یک سطح معقول از ماده آلی می‌تواند باعث افزایش رشد و جذب عناصر توسط گیاهان شود. قارچ مایکوریزا آربوسکولار نیز ازجمله مجموعه عوامل بیولوژیکی هستند که بخش مهمی از موجودات خاکزی را شامل می‌شوند (Miller & Jastrow, 2000) و با ریشه ۹۷ درصد گیاهان همزیستی دارند (Smith & Read, 2008). هم‌زیستی این قارچ با ریشه گیاهان میزبان و تشکیل سیستم مایکوریزایی، نقش مهمی در حاصلخیزی و پایداری اکوسیستم خاک دارد (Miller & Jastrow, 2000). این قارچ‌ها به میزان قابل‌توجهی رشد و جذب عناصر غذایی گیاه را افزایش می‌دهد (Auge ´, 2001). این موجودات از جمله ریزجانداران خاک هستند که انتقال برخی عناصر کم‌مصرف را به گیاهان کنترل می‌کنند. به‌این‌ترتیب در شرایط کمبود این عناصر در خاک، جذب این عناصر را افزایش و در شرایط بیش‌بود، باعث کاهش انتقال این عناصر به گیاه می‌شوند (Sylvia *et al.*, 2001). در شرایطی که غلظت عناصر قابل‌دسترس گیاه کم باشد، ریشه‌های دارای همزیستی مایکوریزایی ممکن است مقدار بیشتری از عناصر کم‌مصرف نسبتاً کم‌تحرک را جذب کنند (Subramanian & Charest, 1997). به‌عنوان مثال،

1-Arbuscular mycorrhizal fungi

لی و جورج (Lee & George, 2005) نیز در بررسی کارایی هیف‌های قارچ‌های مایکوریزا آربوسکولار در انتقال مس و روی اظهار داشتند که مایکوریزایی شدن گیاه باعث افزایش انتقال روی و مس از ریشه به اندام هوایی گیاهان مایکوریزایی شد. با توجه به مطالب ذکرشده، در این پژوهش سعی شده است تا اثر کرم خاکی و قارچ مایکوریزا آربوسکولار بر غلظت عناصر روی، آهن، مس و منگنز در گیاه ذرت و همچنین فراهمی این عناصر در خاک بررسی شود.

مواد و روش‌ها

تهیه، آماده‌سازی و اندازه‌گیری برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک: خاک موردمطالعه، یک خاک آهکی با بافت لومی سیلتی از لایه سطحی (cm ۲۵-۰) منطقه پردیس دانشگاه فردوسی مشهد (E ´´۳۴/۱۱ ´۳۱ °۵۹، N ´´۵۵/۷۵ ´۱۸ °۳۶) جمع‌آوری شد. جهت انجام این آزمایش، ابتدا مقداری از خاک مورد آزمایش پس از هوا خشک شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری جهت انجام تجزیه فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه منتقل شد. در آزمایشگاه pH خاک با استفاده از دستگاه pHمتر در نسبت ۱:۵ خاک به آب، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع توسط دستگاه هدایت سنج، کربن آلی به روش والکلی- بلاک (Walklay & Black, 1934) نیتروژن کل به روش کجلدال، فسفر فراهم خاک به روش اولسن و سامرز (Olsen & Sommers, 1982)، پتاسیم قابل‌دسترس به روش استات آمونیوم (Chapman, 1965)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی، عناصر کم‌مصرف قابل‌جذب با استفاده از دستگاه جذب اتمی[1] (Lindsay & Norvell, 1978)، رطوبت ظرفیت مزرعه به روش گلدانی و بافت خاک به روش هیدرومتری مورد ارزیابی قرار گرفت. استریل کردن نمونه‌های خاک با هدف حذف هر گونه آلودگی احتمالی قارچی و یا باکتریایی در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت در دو مرحله و با فاصله ۷۲ ساعت با استفاده از دستگاه اتوکلاو انجام شد.

ویژگی‌های خاک مورد استفاده در آزمایش: هر کیلوگرم از خاک مورد آزمایش حاوی ۰/۵۱ گرم نیتروژن کل، ۳/۵ گرم کربن آلی، ۷/۰۰ میلی‌گرم فسفر قابل‌دسترس ، ۱۵۱ میلی‌گرم پتاسیم قابل‌دسترس و به ترتیب محتوای ۱/۲۱، ۰/۶۱، ۱/۸ و ۲۴/۴۴ میلی‌گرم مس، روی، آهن و منگنز بود. این خاک همچنین دارای pH برابر با ۸/۵۸ (نسبت ۱:۵ خاک به آب) و قابلیت هدایت الکتریکی برابر با ۲/۱۲ دسی زیمنس بر متر بود. بررسی ویژگی‌های خاک حاکی از آن است که خاک مورد آزمایش، یک خاک آهکی با بافت لومی سیلتی، فقیر از نظر ماده آلی و همچنین فقیر از نظر عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم و به‌ویژه عناصر کم‌مصرف آهن و روی (با توجه به حدود بحرانی کربن ۲ درصد، فسفر، پتاسیم، آهن و روی به ترتیب ۱۵، ۳۰۰، ، ۱۰ و ۱ میلی گرم بر کیلوگرم) می‌باشد. بر اساس توصیه کودی (Malakouti & Tehrani, 2005)، نیتروژن از منبع اوره (۳۵۰ کیلوگرم در هکتار) و پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) به خاک اضافه شد. سپس از آنجا که اثرگذاری قارچ‌های مایکوریزا آربوسکولار در خاک‌هایی با فسفر کم محسوس‌تر است، فسفر به مقدار یک‌سوم توصیه کودی از منبع سوپر فسفات تریپل (۵۰ کیلوگرم در هکتار) تأمین شد.

اعمال تیمارهای آزمایش و کاشت گیاه: به‌منظور مطالعه اثر کرم خاکی و قارچ مایکوریزا آربوسکولار بر غلظت عناصر روی، آهن، منگنز و مس در گیاه ذرت، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار به صورت کشت گلدانی در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد انجام پذیرفت. تیمارهای آزمایشی شامل شاهد یا عدم حضور کرم خاکی و مایکوریزا (C)، کرم خاکی (Ew)، مایکوریزا (M) و کرم خاکی + مایکوریزا (Ew-M) بودند. گلدان‌ها (۱۶/۵ سانتی‌متر قطر بالا، ۹/۵ سانتی‌متر قطر پایین و ۲۴ سانتی‌متر ارتفاع) پس از شستشو با آب معمولی، به‌وسیله الکل ضدعفونی و در داخل هر گلدان ۴/۹۰۰ کیلوگرم خاک ریخته شد. به گلدان‌های حاوی تیمار مایکوریزا، مقدار ۵۰ گرم از زادمایه قارچ (*F. mosseae*) در هر گلدان در عمق ۵ سانتی‌متری از سطح خاک پخش گردید و روی آن مقدار کافی خاک ریخته، به‌طوری‌که زادمایه قارچ در عمق یک سانتی‌متری زیر بذر قرار گرفت و به تیمارهای فاقد مایکوریزا ۵۰ گرم خاک حاوی زادمایه قارچی استریل شده افزوده شد. ماده تلقیحی مایکوریزا (*F. mosseae*) مورد استفاده در این آزمایش از شرکت زیست فناور توران (پارک علم و فناوری استان سمنان)

1-Atomic absorption

تهیه شد. ماده تلقیحی مایکوریزا حاوی محیط کشت خاک، ریشه‌های مایکوریزایی گیاه شبدر، اسپور قارچی و هیف‌های خارجی قارچ مایکوریزا بود. به تیمارهای کرم خاکی، ۱۰ عدد کرم خاکی با وزن تازه (۰/۰۶ g ± ۵) و طول مشابه (۰/۷۴ cm ± ۶) اضافه گردید. کرم‌های خاکی در این مطالعه از شرکت زیست فناوری صبا مشهد تهیه شد. شرایط پرورش کرم در این شرکت به این صورت است که کرم‌های خاکی را در محیط گلخانه با پوشش نایلون و دمای ۲۲ درجه سلسیوس و رطوبت ۶۵ تا ۷۰ درصد وزنی و با pH برابر با ۷/۲ در بستری از کود گاوی نگه‌داری می‌کنند. در همه گلدان‌ها مقدار ۵۰ گرم کود گاوی استریل جهت ایجاد بستر مناسب برای فعالیت کرم‌های خاکی اضافه شد. به‌منظور رفع هر گونه آلودگی، بذور سالم و یکنواخت ذرت سینگل کراس رقم ۲۶۰، ابتدا به‌مدت ۴۵ ثانیه در الکل اتیلیک ۹۶ درجه قرار داده شد سپس به‌مدت ده دقیقه درون محلول ۳ درصد هیپوکلرید سدیم ضدعفونی شدند. پس از کاشت بذور و اطمینان از سبز شدن، ۲ گیاه در هر گلدان نگه‌داشته شد. گلدان ها به طور تصادفی در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد چیدمان شد و روزانه رطوبت خاک بعد از تعیین به روش وزنی در حدود ۷۰ درصد ظرفیت زراعی با آب مقطر تنظیم شد. وضعیت آب و هوایی در طول آزمایش شامل دمای روز و شب به ترتیب ۲۵ و ۱۹ درجه سلسیوس و دوره نوری شامل ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی و رطوبت نسبی ۳۵ درصد بود.

نمونه‌برداری و تجزیه خاک و گیاه: اندام هوایی و ریشه گیاهان پس از یک دوره رشد ۶۰ روزه برداشت و وزن تر و خشک اندام هوایی (۷۲ ساعت در دمای ۶۵ درجه سلسیوس) اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌های خشک و آسیاب شده اندام هوایی به روش هضم تر توسط اسید نیتریک و محلول پرکلریک عصاره‌گیری (Lindsay & Norvell, 1978) و غلظت عناصر روی، آهن، منگنز و مس در عصاره حاصل با دستگاه جذب اتمی AA-670 Shimadzu اندازه‌گیری شدند. جهت اندازه‌گیری کربن آلی محلول خاک (DOC[1])، نمونه‌های خاک با استفاده از سولفات پتاسیم نیم مولار در نسبت ۱:۵ خاک به سولفات پتاسیم پس از یک ساعت شیک عصاره‌گیری و سپس از فیلتر ۰/۴۵ میکرومتر عبور داده شدند (Herbert *et al*, 1995). در ادامه کربن آلی محلول در عصاره‌ها به روش اکسیداسیون تر اندازه‌گیری شد (Walklay & Black, 1934). بعد از برداشت گیاه، میزان زنده‌مانی کرم های خاکی در تیمارهای حاوی کرم خاکی نیز در حدود ۹۰-۷۰ درصد اندازه‌گیری شد.

رنگ‌آمیزی ریشه‌های برداشت‌شده با استفاده از روش کرومانیک و همکاران (Kormanik *et al.*, 1979) صورت گرفت و سپس از روش خطوط متقاطع (Tennant, 1975) جهت تعیین درصد کلنیزاسیون ریشه استفاده گردید. در این روش ریشه رنگ‌آمیزی شده، به‌صورت قطعات یک سانتی‌متری جدا و به‌صورت تصادفی درون پتری دیش قرار داده شدند (۵۰ قطعه)، سپس یک صفحه شطرنجی به ابعاد یک سانتی‌متر (۱×۱) تهیه و در زیر پتری دیش قرار گرفت. جهت مشاهده و شمارش ریشه‌ای آلوده و غیرآلوده از بینکولار[2] استفاده گردید. ریشه‌ای آلوده و غیرآلوده که با خطوط عمودی و افقی صفحه شطرنجی تقاطعی را ایجاد کرده بودند، از هر کدام به‌طور جداگانه شمارش شدند. از تقسیم مجموع ریشه‌ای آلوده به‌دست‌آمده از خطوط عمودی و افقی به مجموع ریشه‌ای غیر آلوده به‌دست‌آمده از خطوط عمودی و افقی ریشه‌ای ضربدر ۱۰۰، درصد کلنیزاسیون ریشه تعیین گردید.

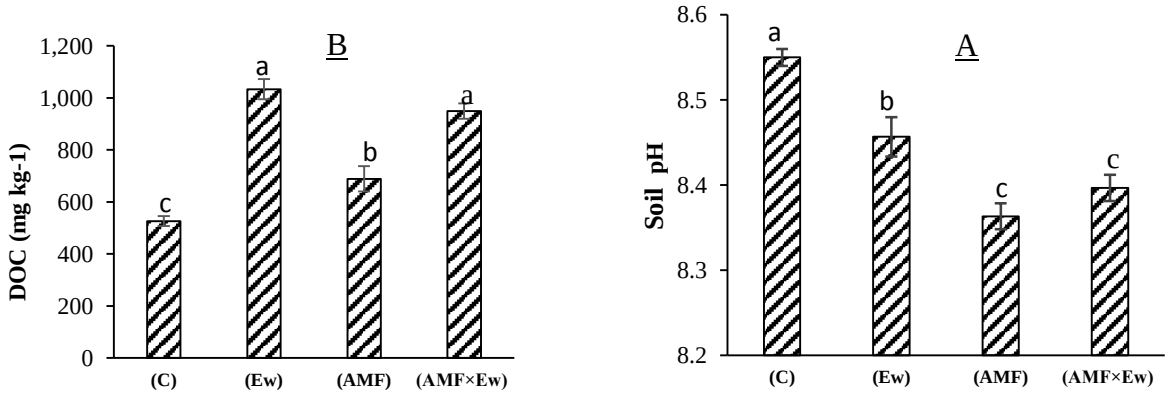
تجزیه و تحلیل آماری: در پایان تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار JMP[3] و SPSS[4] و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد و رسم نمودارها در محیط Excel انجام گرفت.

نتایج و بحث

pH خاک: در این آزمایش تأثیر تیمارهای آزمایشی بر pH خاک و کربن آلی محلول اندازه‌گیری شد. نتایج آن در شکل ۴ (A و B) آورده شده است. تیمارهای آزمایش اگرچه به مقدار کم اما به طور معنی‌داری موجب کاهش pH خاک در سطح احتمال ۵ درصد نسبت به شاهد شدند (شکل ۱-A). pH خاک در تیمارهای مایکوریزا، کرم

1-Dissolved organic carbon
2- Binocular
3- JMP.Statistical.Discovery. version 8.0
4- SPSS, Institute, Inc., Cary, NC, USA, version 10.0

خاکی + مایکوریزا و کرم خاکی به طور متوسط در حدود ۰/۲-۰/۱۵ واحد نسبت به شاهد کاهش یافت (شکل ۱-A). در مطالعه چنگ و ونگ (Cheng & Wong, 2002) نیز فعالیت کرم خاکی موجب کاهش ۰/۵-۰/۲ واحدی pH خاک شد. یو و همکاران (Yu *et al.*, 2005) نیز گزارش کردند که کرم‌های خاکی می‌توانند فراهمی عناصر در خاک را با کاهش ۰/۲ واحدی pH، افزایش دهند. کاهشpH در حضور کرم خاکی ممکن است به دلیل تولید اسید هومیک و اسید فولویک در روده کرم و سپس دفع آن باشد (Ravindran *et al.*, 2014). نتایج هگو و همکاران (Heggo *et al.*, 1990)، افزایش فراهمی عناصر منگنز و آهن در خاک را به دنبال کاهش ۲-۱/۵ واحدی pH خاک در حضور مایکوریزا نشان داد که این کاهش در حضور مایکوریزا می‌تواند به انتشار ترشحات حاوی اسیدهای آلی به‌وسیله مایکوریزا نسبت داده شود (Johansson *et al.*, 2004). ویسنهورن و لیوال (Weissenhorn & Leyval, 1995) نیز تأثیر مایکوریزا بر رشد گیاه و جذب عناصری مانند مس و روی را به افزایش عرضه عناصر و کاهش pH خاک نسبت داده‌اند. اگرچه pH خاک یک عامل مؤثر بر غلظت عناصر در محلول خاک است (Sauve *et al.*, 2000) و تأثیر عمده بر رفتار جذب و واجذب عناصر و در نتیجه فراهمی عناصر در خاک دارد (Cao *et al.*, 2001). با این حال با توجه به بالا بودن pH در خاک مورد مطالعه و تأثیر کم تیمارهای آزمایش بر کاهش آن به نظر نمی‌رسد این عامل تأثیر بسزایی بر افزایش فراهمی عناصر داشته است.



شکل ۱- اثرات متقابل کرم خاکی و مایکوریزا بر pH و کربن آلی محلول خاک (شاهد (C)، کرم خاکی (Ew)، مایکوریزا (M) و کرم خاکی + مایکوریزا (Ew-M)) در سطح احتمال ۵ درصد

Figure 1. Earthworms and mycorrhizal interaction on dissolved organic Carbon soil and pH of soil Control(C), Earth worm (Ew), Mycorrhiza (M) and Earthworm + Mycorrhiza (Ew-M)) at the 5% level

کربن آلی محلول (DOC): کرم‌های خاکی، فراهمی عناصر غذایی خاک را از طریق اثرات مستقیم و غیرمستقیم بر جمعیت میکروبی افزایش می‌دهند (Blouin *et al.*, 2013). با توجه به شکل ۱-B، بیشترین افزایش کربن آلی محلول در حضور کرم خاکی (تیمارهای کرم خاکی و کرم خاکی + مایکوریزا) مشاهده شد که نشان می‌دهد احتمالاً کرم‌های خاکی با افزایش کربن آلی محلول، بر افزایش فراهمی عناصر مورد مطالعه مؤثر بوده‌اند. کربن آلی محلول خاک به طور معنی‌داری در تیمارهای کرم خاکی و کرم خاکی + مایکوریزا نسبت به تیمارهای مایکوریزا و شاهد افزایش یافت. تیمارهای کرم خاکی و کرم خاکی + مایکوریزا به ترتیب موجب افزایش ۹۶ و ۸۰ درصدی کربن آلی محلول نسبت به تیمار شاهد و افزایش ۵۰ و ۳۸ درصدی نسبت به تیمار مایکوریزا شدند. این در حالی بود که تیمار مایکوریزا نیز تفاوت معنی‌داری با شاهد داشت (شکل ۱-B).

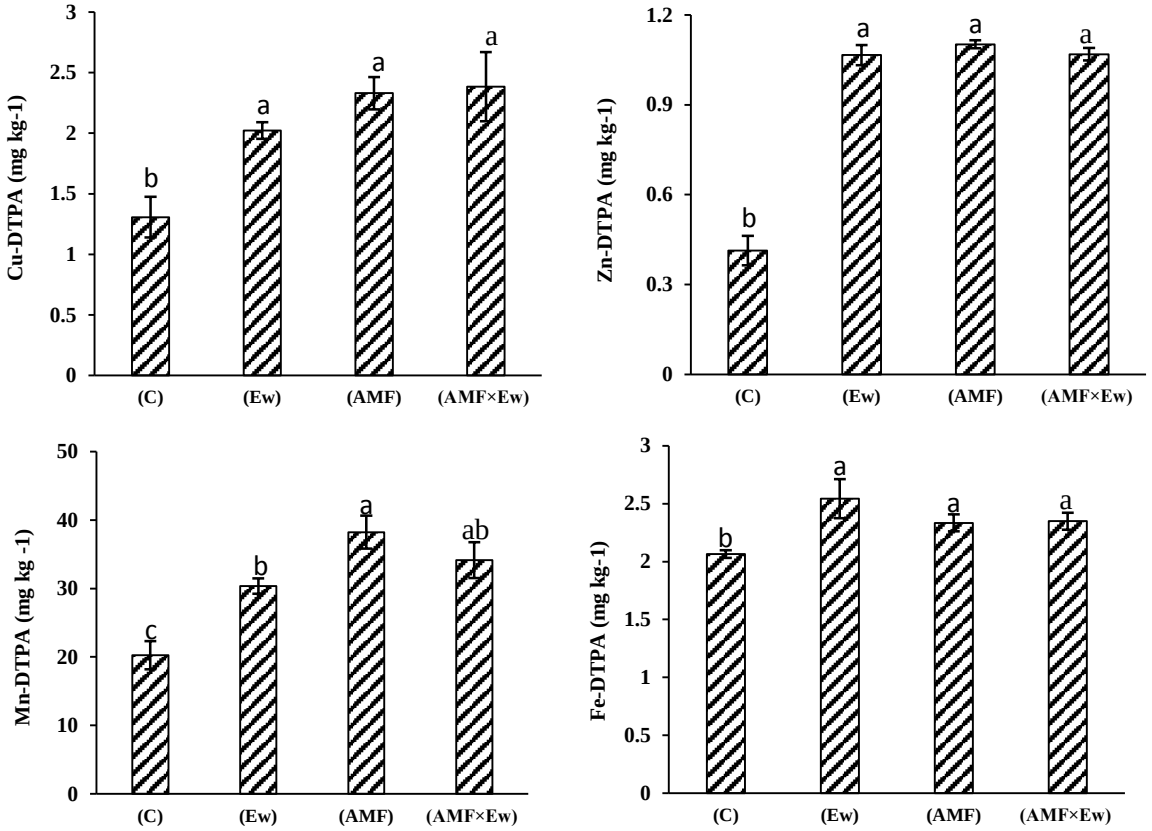
پژوهش‌ها نشان می‌دهد که تغییر در کربن آلی محلول خاک روی فراهمی عناصر تأثیر می‌گذارد (Antoniadis & Alloway, 2002). زو و آلوا (Zhu & Alva, 1993) نشان دادند که یک رابطه مثبت بین کربن آلی محلول و حلالیت و جذب روی در اثر افزایش تشکیل کمپلکس‌های آلی روی وجود دارد. به طور مشابه، دادلی و همکاران (Dudley *et al*, 1986) ذکر کردند که افزایش کربن محلول خاک موجب افزایش جذب کل مس شد. فعالیت

طبیعی یا تحریکی کرم خاکی در خاک می‌تواند موجب افزایش کربن محلول و درنتیجه افزایش کمپلکس فلز با مواد آلی شود (Martin, 1991). یکی از دلایل افزایش کربن آلی محلول در حضور کرم خاکی، مصرف مواد آلی و اختلاط آن‌ها با ذرات معدنی و مخاط دستگاه گوارش کرم و سپس دفع آن‌هاست (Edwards & Bohlen, 1995). ون و همکاران (Wen *et al.*, 2004) در پژوهشی بیان کردند که همبستگی معنی‌داری بین اثر کرم خاکی ایزینیا فتیدا بر کربن آلی محلول و فراهمی عناصر در خاک وجود دارد. کربن آلی محلول می‌تواند با یون‌های فلزی مختلف تشکیل کمپلکس دهد و این کمپلکس‌ها نسبت به یون‌های فلزی آزاد دارای قابلیت حلالیت بیشتر و در نتیجه به راحتی جذب می‌شوند (Prasad *et al*, 1976). قارچ مایکوریزا نیز اگرچه نسبت به کرم خاکی به طور ناچیزی موجب افزایش کربن آلی محلول شد اما این افزایش نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار بود (جدول ۲). این افزایش شاید به این دلیل باشد که مایکوریزا بعد از اتمام چرخه زندگی خود از بین می‌رود و اضافه شدن اجساد سلولی و اسپورهای آن در خاک باعث افزایش کربن آلی خاک شود. در این مورد اندرسون و همکاران (Anderson *et al*, 1986) گزارش کردند که فراوانی اسپورهای مایکوریزا همبستگی مثبتی با کربن آلی خاک داشت.

فراهمی عناصر کم‌مصرف در خاک: نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری در فراهمی عناصر آهن، مس، روی و منگنز در خاک بین تیمار شاهد و سایر تیمارها وجود داشت درحالی‌که تفاوت بین فراهمی عناصر در تیمارهای کرم خاکی، مایکوریزا و کرم خاکی + مایکوریزا معنی‌دار نبود (شکل ۲). به‌طوری‌که به طور میانگین تأثیر این تیمارها به ترتیب موجب افزایش ۱۶، ۱۶۰، ۷۲ و ۶۰ درصدی فراهمی عناصر آهن، روی، مس و منگنز نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۲). به عبارت دیگر با توجه به نتایج به‌دست‌آمده تأثیر تیمارهای آزمایش بر فراهمی عناصر روی، مس و منگنز بیشتر از آهن بود. بیتوسکی و همکاران (Bityutskii *et al*, 2012) افزایش فراهمی عناصر کم‌مصرف در خاک را در حضور کرم خاکی نشان دادند و بیان داشتند که این افزایش می‌تواند ناشی از عبور خاک از دستگاه گوارش کرم خاکی باشد. داد (Dodd, 2000) نیز اظهار داشت که قارچ مایکوریزا با گسترش هیف‌های خود در منافذ ریز خاک موجب افزایش فراهمی عناصر در خاک می‌شود.

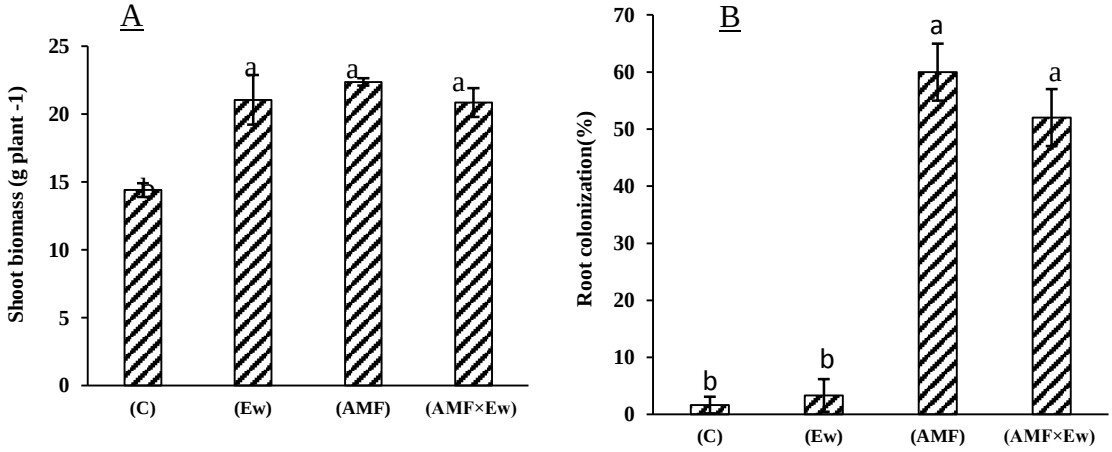
درصد کلنیزاسیون ریشه: یکی از شاخص‌های مهم فعالیت قارچ‌های مایکوریزا، میزان کلنیزاسیون سیستم ریشه‌ای گیاه توسط این قارچ‌ها می‌باشد که به‌وسیله عوامل مختلفی ازجمله ویژگی‌های ظاهری و ساختمانی سیستم ریشه‌ای، مقدار و کیفیت ترشحات ریشه‌ای، مصرف کودهای شیمیایی فسفره تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Al-Karaki & Al-Raddad, 1997). ازآنجایی‌که سطح فسفر در خاک مورد آزمایش پایین بود، نتایج حاصل از تعیین درصد کلنیزاسیون ریشه در نتیجه افزودن زادمایه مایکوریزا به تیمارهای مایکوریزا و کرم خاکی + مایکوریزا حاکی از موفقیت در کلنیزاسیون ریشه با قارچ مایکوریزا در این تیمارها نسبت به تیمارهای شاهد و کرم خاکی بود (شکل ۳-B).

وزن خشک اندام هوایی: کاربرد کرم خاکی و مایکوریزا، وزن خشک اندام هوایی ذرت را نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش داد. تیمار مایکوریزا بیشترین تأثیر را در افزایش وزن خشک اندام هوایی گیاه ذرت داشت (شکل ۳-A). اگرچه این افزایش در مقایسه با تیمارهای کرم خاکی و کرم خاکی + مایکوریزا از نظر آماری معنی‌دار نبود. تیمارهای مایکوریزا، کرم خاکی و کرم خاکی + مایکوریزا به ترتیب موجب افزایش ۵۵، ۴۶ و ۴۴ درصدی وزن خشک اندام هوایی گیاه ذرت در مقایسه با تیمار شاهد شدند (شکل ۳-A).



شکل ۲- اثرات متقابل کرم خاکی و مایکوریزا بر فراهمی عناصر کم‌مصرف در خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) (شاهد (C)، کرم خاکی (Ew)، مایکوریزا (M) و کرم خاکی + مایکوریزا (Ew-M)) در سطح احتمال ۵ درصد

Figure 2. Earthworms and mycorrhizal interaction on availability of micronutrients in Soil (Control (C), Earth worm (Ew), Mycorrhiza (M) and Earthworm + Mycorrhiza (Ew-M)) at the 5% level



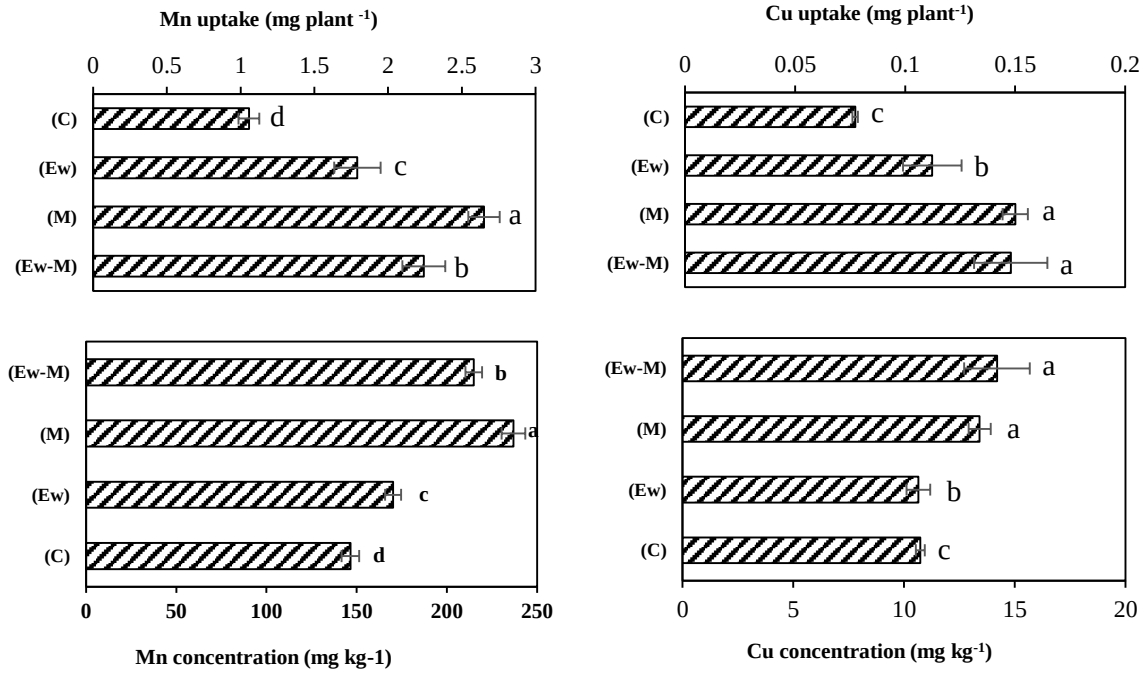
شکل ۳- اثرات متقابل کرم خاکی و مایکوریزا بر وزن خشک اندام هوایی و کلنیزاسیون ریشه (شاهد (C)، کرم خاکی (Ew)، مایکوریزا (M) و کرم خاکی + مایکوریزا (Ew-M)) در سطح احتمال ۵ درصد

Figure 3. Earthworms and mycorrhizal interaction on root colonization and dry weight shoot (Control (C), Earth worm (Ew), Mycorrhiza (M) and Earthworm + Mycorrhiza (Ew-M)) at the 5% level

غلظت و جذب عناصر کم‌مصرف در گیاه: حضور کرم‌های خاکی و مایکوریزا غلظت عناصر روی، مس، منگنز و آهن در اندام هوایی گیاه را نیز به طور معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد افزایش داد (شکل ۴). با توجه به عدم تفاوت معنی‌دار بین وزن خشک اندام‌های هوایی و غلظت عناصر مورد مطالعه در تیمارهای مایکوریزا، کرم خاکی + مایکوریزا و کرم خاکی، تغییرات جذب این عناصر نیز مانند تغییرات غلظت آن‌ها در تیمارهای مورد آزمایش بود. تیمارهای کرم خاکی، مایکوریزا و کرم خاکی + مایکوریزا موجب افزایش ۱۲۰-۱۰۰ درصدی غلظت آهن نسبت به شاهد شدند که این افزایش از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد نسبت به شاهد معنی‌دار بود (شکل ۴). قارچ‌های مایکوریزا آربوسکولار با افزایش سطح جذب ریشه و با تولید کلات کننده‌های فلزی به‌منظور انحلال برخی عناصر مانند آهن باعث جذب بیشتر آن‌ها توسط گیاه می‌شوند (Smith & Read, 1997). افزایش معنی‌دار روی در اندام‌های هوایی در تیمارهای حاوی مایکوریزا یعنی مایکوریزا و کرم خاکی + مایکوریزا نسبت به تیمارهای شاهد و کرم خاکی مشاهده شد. تیمارهای مایکوریزا و کرم خاکی + مایکوریزا به ترتیب موجب افزایش ۱۰۰ و ۶۰ درصدی غلظت روی نسبت به تیمار شاهد و افزایش ۹۶ و ۵۶ درصدی نسبت به تیمار کرم خاکی شدند. همزیستی مایکوریزایی می‌تواند با افزایش طول ریشه‌ها و همچنین افزایش سطح جذب توسط ریشه‌های قارچی، جذب عناصر غذایی مانند روی را افزایش دهد (Kothari *et al.*, 1991). به طور مشابهی، چن و همکاران (Chen *et al*, 2003) نیز در پژوهشی بیان کردند که غلظت روی در اندام هوایی گیاهان مایکوریزایی نسبت به گیاهان غیر مایکوریزایی افزایش معنی‌دار نشان داد. همچنین غلظت مس اندام هوایی نیز در تیمارهای کرم خاکی + مایکوریزا و مایکوریزا به طور معنی‌داری به ترتیب در حدود ۳۳ و ۲۵ درصد نسبت به تیمارهای کرم خاکی و شاهد افزایش یافت. این در حالی بود که غلظت مس در اندام‌های هوایی در تیمار کرم خاکی تفاوت معنی‌داری با شاهد نشان نداد (جدول ۱). تیمار مایکوریزا به طور معنی‌داری موجب افزایش غلظت منگنز نسبت به سایر تیمارها شد. از این جهت تفاوت بین تیمارهای کرم خاکی + مایکوریزا و کرم خاکی نیز معنی‌دار بود به‌طوری‌که به ترتیب افزایش ۱۵۰، ۱۱۲ و ۷۰ درصدی غلظت منگنز در تیمارهای مایکوریزا، کرم خاکی + مایکوریزا و کرم خاکی نسبت به شاهد مشاهده شد (شکل ۴). افزایش حداکثری غلظت عناصر روی و منگنز در تیمار مایکوریزا نشان‌دهنده نقش مایکوریزا در افزایش جذب این عناصر از خاک می‌باشد. این در حالی است که از نظر افزایش فراهمی عناصر مورد مطالعه در خاک بین تیمارهای کرم خاکی، کرم خاکی + مایکوریزا و مایکوریزا تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل۲). درحالی‌که در مورد آهن احتمالاً افزایش فراهمی آن در خاک موجب افزایش جذب این عنصر در تیمارها مایکوریزا، کرم‌خاکی و کرم‌خاکی + مایکوریزا نسبت به تیمار شاهد گردیده است. افزایش غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف در حضور مایکوریزا ممکن است به دلیل تخلیه بیشتر خاک از این عناصر بر اثر نفوذ ریسه‌های نازک قارچی در حفرات ریز خاک باشد. عامل اصلی انتقال عناصر معدنی توسط قارچ مایکوریزا به گیاه مربوط به توان توسعه هیف‌های خارج ریشه‌ای قارچ خارج از منطقه تخلیه ریشه و افزایش سطح جذب توسط این هیف‌ها می‌شود (Sylvia *et al.*, 2001). که این هیف‌های خارجی قارچ‌های مایکوریزا آربوسکولار ساختارهای متحرکی هستند که سرعت رشدی معادل بین ۰/۲ تا ۲/۵ میلی‌متر در روز دارند (Smith & Read, 1997). در مورد گونه گلوموس موسه، پژوهش‌ها نشان می‌دهد که میزان گسترش هیف‌های خارجی این گونه در محیط خاک به ۳ میلی‌متر در روز می‌رسد (Camel *et al.*, 1991). آلکاراکی و آلرداد (Al-Karaki & Al-Raddad, 1997) در بررسی تأثیر مایکوریزا بر جذب عناصر مس، روی، منگنز، آهن و فسفر نشان دادند که کاربرد مایکوریزا موجب افزایش غلظت و جذب این عناصر در گیاه گردید. لمن و همکاران (Lehmann *et al*, 2012) نیز در پژوهشی با بررسی تأثیر قارچ مایکوریزا بر غلظت عناصر مغذی در محصولات کشاورزی بیان کردند که تلقیح مایکوریزا موجب افزایش معنی‌دار غلظت عناصری نظیر آهن و مس در محصولات کشاورزی شد. در بررسی اثر متقابل کرم خاکی و مایکوریزا بر جذب عناصر روی و منگنز با مقایسه تیمار مایکوریزا با تیمارهای کرم خاکی + مایکوریزا و تیمار کرم خاکی مشخص می‌گردد که مایکوریزا بیشترین و کرم خاکی کمترین تأثیر را بر جذب این عناصر از خاک نسبت به تیمار شاهد داشت. از آنجا که کلنیزاسیون مایکوریزایی می‌تواند موجب افزایش جذب عناصر غذایی کم‌مصرف

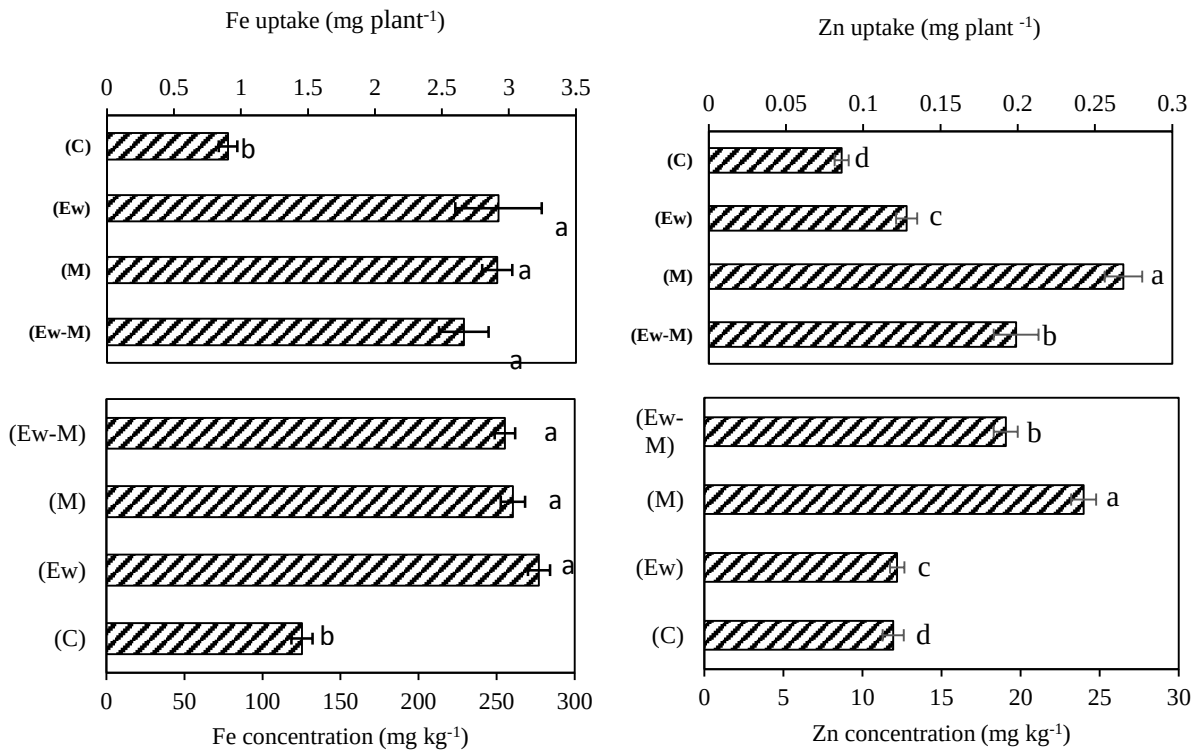
شود (Harley & Smith, 1983)، با توجه به عدم تأثیر معنی‌دار حضور کرم‌های خاکی بر درصد کلنیزاسیون در تیمار مایکوریزا + کرم خاکی (شکل ۳-B)، حضور کرم‌های خاکی در این تیمار احتمالاً با تأثیر بر گسترش هیف‌های قارچ موجب کاهش جذب این عناصر به‌وسیله گیاه گردیده است و از این نظر تأثیر منفی بر عملکرد مایکوریزایی شدن داشته است. در مورد مس نیز به نظر می‌رسد محتوای بالای مس فراهم خاک مانع این تأثیر منفی کرم خاکی بر جذب مس در تیمار کرم خاکی + مایکوریزا شده باشد. مطالعات پاتینسون و همکاران (Pattinson *et al.*, 1997) و گورمسن و همکاران (Gormsen *et al.*, 2004) نیز برهمکنش منفی بین کرم خاکی و مایکوریزا را نشان می‌دهد. این کاهش عملکرد مایکوریزا در حضور کرم خاکی ممکن است به کاهش آلودگی ریشه توسط مایکوریزا و به اختلال فیزیکی خاک با حفاری و به‌هم ریختن خاک (Lussenhop, 1996)، یا تغذیه انتخابی از هیف (Bonkowski *et al.*, 2000) و یا تغذیه از اسپور (Gange *et al.*, 1993) به‌وسیله کرم‌های خاکی نسبت داده شود. تیمار کرم خاکی نیز اگرچه در مقایسه با تیمارهای کرم خاکی + مایکوریزا و مایکوریزا تأثیر کمتری بر غلظت و جذب عناصر کم‌مصرف داشت اما تأثیر آن بر جذب عناصر نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار بود (شکل ۴). افزایش فراهمی عناصر کم‌مصرف در خاک در نتیجه فعالیت کرم‌های خاکی نیز گزارش شده است (Fisher & Molnar, 1992). تحقیقات زیادی، افزایش در فراهمی عناصر به دلیل فعالیت کرم‌های خاکی در خاک‌های آلوده (Udovic & Lestan, 2007) و خاک‌های غیرآلوده (Wen *et al.*, 2006) را نشان می‌دهند. افزایش فراهمی عناصر غذایی در نتیجه فعالیت کرم‌های خاکی می‌تواند منجر به افزایش جذب این عناصر توسط گیاه گردد به‌طوری‌که در مطالعه انجام‌شده توسط ماترچرا (Materechera, 2002) در حضور کرم‌خاکی غلظت مس در اندام هوایی ذرت زیاد شد درحالی‌که غلظت روی و منگنز در ریشه‌ها افزایش داشت. چنگ و ونگ (Cheng & Wong, 2002) گزارش کردند که فعالیت کرم‌های خاکی قابلیت دسترسی روی را احتمالاً به دلیل تعامل با میکروب‌ها افزایش می‌دهند.

.



شکل ۴- اثرات متقابل کرم خاکی و مایکوریزا بر غلظت و جذب عناصر آهن، روی، مس و منگنز در اندام هوایی ذرت (شاهد (C)، کرم خاکی (Ew)، مایکوریزا (M) و کرم خاکی + مایکوریزا (Ew-M)) در سطح احتمال ۵ درصد

Figure 4. Earthworms and mycorrhizal interaction on of concentration and uptake of iron, zinc, copper and manganese in maize shoot (Control (C), Earth worm (Ew), Mycorrhiza (M) and Earthworm + Mycorrhiza (Ew-M) at the 5% level



ادامه شکل ۴- اثرات متقابل کرم خاکی و مایکوریزا بر غلظت و جذب عناصر آهن، روی، مس و منگنز در اندام هوایی ذرت (شاهد (C)، کرم خاکی (Ew)، مایکوریزا (M) و کرم خاکی + مایکوریزا (Ew-M)) در سطح احتمال ۵ درصد

Figure 4. Earthworms and mycorrhizal interaction on of concentration and uptake of iron, zinc, copper and manganese in maize shoot (Control (C), Earth worm (Ew), Mycorrhiza (M) and Earthworm + Mycorrhiza (Ew-M) at the 5% level

نتیجه‌گیری کلی

مطالعه اثر متقابل کرم خاکی و قارچ مایکوریزا آربوسکولار بر وزن خشک اندام هوایی گیاه، غلظت و جذب کل عناصر آهن، روی، مس و منگنز در گیاه ذرت نشان داد که کاربرد کرم خاکی و مایکوریزا به طور معنی‌داری باعث افزایش وزن خشک اندام هوایی، غلظت و جذب عناصر آهن، روی، مس و منگنز در ذرت و همچنین فراهمی این عناصر در خاک نسبت به تیمار شاهد شد. بیشترین غلظت روی و منگنز در اندام هوایی گیاه در تیمار مایکوریزا، بیشترین غلظت مس در تیمار کرم خاکی + مایکوریزا و بیشترین غلظت آهن در تیمار کرم خاکی مشاهده شد. نتایج نشان داد علیرغم نقش مفید کرم‌های خاکی بر فراهمی عناصر در خاک و جذب آن‌ها به‌وسیله گیاه، حضور کرم‌های خاکی احتمالاً با صدمه به هیف‌های قارچ مایکوریزا می‌تواند کارایی مایکوریزا در جذب عناصر را کاهش دهد به‌طوری‌که در این تحقیق اگرچه درصد کلنیزاسیون ریشه با حضور کرم‌های خاکی کاهش معنی‌دار پیدا نکرد ولی جذب منگنز و روی در تیمار کرم خاکی + مایکوریزا نسبت به تیمار مایکوریزا کاهش یافت.

References

Al-Karaki G.N. and Al-Raddad A. 1997. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress on growth and nutrient uptake of two wheat genotypes differing in droughtresistance. *Mycorrhiza*, 7(2): 83-88.

Alloway B.J. 2009. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environmental Geochemistry and Health*, 31(5): 537-548.

Anderson R.C., Liberta A.E., and Dickman L.A. 1984. Interaction of vascular plants and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi across a soil moisture-nutrient gradient. *Oecologia*, 64(1): 111-117.

Antoniadis V. and Alloway B.J. 2002. The role of dissolved organic carbon in the mobility of Cd, Ni and Zn in sewage sludge-amended soils. *Environmental Pollution*, 117(3): 515-521.

Auge R.M. 2001. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11: 3-42.

Bityutskii N.P., Kaidun P.I., and Yakkonen K.L. 2012. The earthworm (*Aporrectodea caliginosa*) primes the release of mobile and available micronutrients in soil. *Pedobiologia*, 55(2): 93-99.

Blouin M., Hodson M.E., Delgado E.A., Baker G., Brussaard L., Butt K.R., Dai J., Dendooven L., Peres G., Tondoh J.E., and Cluzeau D. 2013. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science*, 64(2): 161-182.

Bonkowski M., Griffiths B.S., and Ritz, K. 2000. Food preferences of earthworms for soil fungi. *Pedobiologia*, 44(6): 666-676.

Camel S.B., Franson R.L., Brown M.S., Bethlenfalvay G.J., Reyes-Solis M.G., and Ferrera-Cerrato R. 1991. Growth of vesicular-arbuscular mycorrhizal mycelium through bulk soil. *Soil Science Society of America Journal*, 55(2): 389-393.

Cao X., Chen Y., Wang X., and Deng X. 2001. Effects of redox potential and pH value on the release of rare earth elements from soil. *Chemosphere*, 44(4): 655-661.

Chapman H.D. 1965. Total exchangeable bases.*In*: Klute A. (Ed.). Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties, pp. 902-904.

Chen B.D., Li X.L., Tao H.Q., Christie P., and Wong M.H. 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(6): 839-846.

Cheng J. and Wong M.H. 2002. Effects of earthworms on Zn fractionation in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 36(1): 72-78.

Dodd J.C. 2000. The role of arbuscular mycorrhizal fungi in agro-and natural ecosystems. *Outlook on Agriculture*, 29(1): 55-55.

Dudley L.M., Mc Neal B.L., and Baham J.E. 1986. Time-dependent changes in soluble organics, copper, nickel, and zinc from sludge amended soils. *Journal of Environmental Quality*, 15(2): 188-192.

Edwards C.A. and Bohlen P.J. 1995. Biology and Ecology of Earthworms. 3rd Edition,). Springer Science and Business Media. 426p.

Fisher E. and Molnar L. 1992. Environmental aspects of the chloragogenous tissue of earthworms. *Soil Biology and Biochemistry*, 24(12): 1723-1727.

Gange A.C., Brown V.K., and Sinclair G.S. 1993. Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi: a determinant of plant community structure in early succession. *Functional Ecology*, 616-622.

Gormsen D., Olsson P.A., and Hedlund K. 2004. The influence of collembolans and earthworms on AM fungal mycelium. *Applied Soil Ecology*, 27(3): 211-220.

Harley J.L. and Smith S.E. 1983. Mycorrhizal symbiosis. Academic Press, New York, 483p.

Heggo A., Angle J.S., and Chaney R.L. 1990. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on heavy metal uptake by soybeans. *Soil Biology and Biochemistry*, 22(6): 865-869.

Herbert B.E. and Bertsch P.M. 1995. Characterization of dissolved and colloidal organic matter in soil solution: a review. *Carbon Forms and Functions in Forest Soils*, pp. 63-88.

Johansson J.F., Paul L.R., and Finlay R.D. 2004. Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. *Microbiology Ecology*, 48(1): 1-13.

Kizilkaya R. 2004. Cu and Zn accumulation in earthworm *Lumbricus terrestris* L. in sewage sludge amended soil and fractions of Cu and Zn in casts and surrounding soil. *Ecological Engineering*, 22(2): 141-151.

Kormanik P.P., Bryan W.C., and Schultz R.C. 1979. Procedures and equipment for staining large numbers of plant root samples for mycorrhizal assay. *Canadian Journal of Microbiology*, 26: 537-538.

Kothari S.K., Marschner H., and Römheld V. 1991. Contribution of the VA mycorrhizal hyphae in acquisition of phosphorus and zinc by maize grown in a calcareous soil. *Plant and Soil*, 131(2): 177-185.

Lee Y.J. and George E. 2005. Contribution of mycorrhizal hyphae to the uptake of metal cations by cucumber plants at two levels of phosphorus supply. *Plant and Soil*, 278(1-2): 361-370.

Lehmann A., Barto E.K., Powell J.R., and Rillig M.C. 2012. Mycorrhizal responsiveness trends in annual crop plants and their wild relatives-a meta-analysis on studies from 1981 to 2010. *Plant and Soil*, 355(1-2): 231-250.

Lindsay W.L. and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3): 421-428.

Lussenhop J. 1996. Collembola as mediators of microbial symbiont effects upon soybean. *Soil Biology and Biochemistry*, 28(3): 363-369.

Martin A. 1991. Short-and long-term effects of the endogeic earthworm *Millsonia anomala* (Omodeo) (Megascolecidae, Oligochaeta) of tropical savannas, on soil organic matter. *Biology and Fertility of Soils*, 11(3): 234-238.

Malakouti M.J. and Tehrani M. M. 2005. The role of micronutrients in enhancing the quality and quantity of agricultural products and health promotion of society "micro-elements with large impacts". In partnership with the Tarbiat Modarres University. 450p. (In Persian)

Materechera S.A. 2002. Nutrient availability and maize growth in a soil amended with earthworm casts from a South African indigenous species. *Bioresource Technology*, 84(2): 197-201.

Miller R.M. and Jastrow J.D. 2000. Mycorrhizal fungi influence soil structure. *In*: Koltai H and Kapulnik Y. (Ed.). Arbuscular mycorrhizas: Physiology and Function, Springer Netherlands, pp. 3-18.

Olsen S.R., Sommers L.E., and Page A.L. 1982. Phosphorus *In*: Page A.L. (Ed.). Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties, Agronomy Monograph, 9: 403-430.

Pattinson G.S., Smith S.E., and Doube B.M. 1997. Earthworm *Aporrectodea trapezoides* had no effect on the dispersal of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi, *Glomus intraradices*. *Soil Biology and Biochemistry*, 29(7): 1079-1088.

Ponder Jr.F., Li F., Jordan D., and Berry E.G. 2000. Assessing the impact of Diplocardia ornata on physical and chemical properties of compacted forest soil in microcosms. *Biology and Fertility of Soils*, 32: 166–172.

Prasad B., Sinha M.K., and Randhawa N.S. 1976. Effect of mobile chelating agents on diffusion of zinc in soils. *Soil Science*, 122(5): 260-266.

Ravindran B., Contreras-Ramos S.M., Wong J.W.C., Selvam A., and Sekaran G. 2014. Nutrient and enzymatic changes of hydrolysed tannery solid waste treated with epigeic earthworm Eudrilus eugeniae and phytotoxicity assessment on selected commercial crops. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(1): 641-651.

Saleh Rastin N. 2001. Biological fertilizers and its role in order to achieve sustainable agriculture. The necessity for industrial production of biological fertilizers in the country. Publication of Agricultural Education, Ministry of Agriculture, Karaj. Iran. (In Persian)

Sauve S., Hendershot W., and Allen H.E. 2000. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: dependence on pH, total metal burden, and organic matter. *Environmental Science and Technology*, 34(7): 1125-1131.

Sepehr A. 1998. Effects of potassium, magnesium, sulfur and micronutrients on increase the yield and improve the quality of sunflower. MSc Thesis. Faculty of Agriculture. Tarbiat Modares University. 108p. (In Persian)

Sizmur T. and Hodson M.E. 2009. Do earthworms impact metal mobility and availability in soil? A review. *Environmental Pollution*, 157(7): 1981-1989.

Smith S.E. and Read D.J. 2008. Mycorrhizal symbiosis. Academic, San Diego Soils Laboratory Staff, Royal Tropical Institute (1984) Analytical methods of the service laboratory for soil, plant and water analysis. Part 1: Methods for Soil Analysis. Royal Tropical Institute, Amsterdam.

Smith S.E. and Read D.J. 1997. *Mycorrhizal Symbiosi*s. Academic Press., San Diego. 800p.

Subramanian K.S. and Charest C. 1997. Nutritional, growth, and reproductive responses of maize (*Zea mays* L.) to arbuscular mycorrhizal inoculation during and after drought stress at asselling. *Mycorrhiza*, 7(1): 25-32.

Sylvia D., Alagely A., Chellemi D., and Demchenko L. 2001. Arbuscular mycorrhizal fungi influence tomato competition with bahiagrass. *Biology and Fertility of Soils*, 34(6): 448-452.

Tao J., Chen X., Liu M., Hu F., Griffiths B., and Li H. 2009. Earthworms change the abundance and community structure of nematodes and protozoa in a maize residue amended rice-wheat rotation agro-ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(5): 898-904.

Tennant D. 1975. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *Journal of Ecology*, 995-1001.

Udovic M. and Lestan D. 2007. The effect of earthworms on the fractionation and bioavailability of heavy metals before and after soil remediation. *Environmental Pollution*, 148(2): 663-668.

Walkley A. and Black I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1): 29-38.

Weissenhorn I. and Leyval C. 1995. Root colonization of maize by a Cd-sensitive and a Cd-tolerant *Glomus mosseae* and cadmium uptake in sand culture. *Plant and Soil*, 175(2): 233-238.

Wen B., Hu X.Y., Liu Y., Wang W.S., Feng M.H., and Shan X.Q. 2004. The role of earthworms (*Eisenia fetida*) in influencing bioavailability of heavy metals in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 40(3): 181-187.

Wen B., Liu Y., Hu X.Y., and Shan X.Q. 2006. Effect of earthworms (*Eisenia fetida*) on the fractionation and bioavailability of rare earth elements in nine Chinese soils. *Chemosphere*, 63(7): 1179-1186.

Wu S.C., Cao Z.H., Li Z.G., Cheung K.C., and Wong M.H. 2005. Effects of biofertilizer containing N-fixer, P and K solubilizers and AM fungi on maize growth: a greenhouse trial. *Geoderma*, 125(1): 155-166.

Yu X., Cheng J., and Wong M. H. 2005. Earthworm–mycorrhiza interaction on Cd uptake and growth of ryegrass. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(2): 195-201.

Zhu B. and Alva A.K. 1993. Trace metal and cation transport in a sandy soil with various amendments. *Soil Science Society of America Journal*, 57(3): 723-727.

Uptake of Micronutrients Affected by Earthworms (*Eisenia fetida*) and Arbuscular Mycorrhizal Fungi (*Funneliformis mosseae*) Interaction by Corn

Hamid Dehghanian[1], Akram Halajnia[2*], Amir lakzian[3], Ali Reza Astaraei

(Received: November 2016 Accepted: February 2017)

Abstract

This study was conducted to evaluate the effect of earthworms (*Eisenia fetida*) and arbuscular mycorrhiza fungi (*F. mosseae*) as well as their interactions on the root colonization, soil pH and soil dissolved organic carbon and nutrient concentration of iron, zinc, copper and manganese in maize. Experimental treatments included control, earthworm, mycorrhiza and earthworm + mycorrhiza was conducted in a completely randomized design in research greenhouse of Ferdowsi University of Mashhad with three replications. The results showed that the presence of earthworms in mycorrhiza + earthworm treatment had no significant effect on mycorrhizal root colonization compared with mycorrhiza treatment. The experimental treatments significantly reduced soil pH compared to the control treatment. Although experimental treatments significantly increased shoot dry weight, dissolved organic carbon and availability of iron, copper, zinc and manganese in the soil compared to control, however, it had a different effect on nutrient uptake by the plant. The highest concentration of Zn and Mn in shoot was obtained in mycorrhiza treatment that was statistically significant compared to other treatments ($p<0.05$). The presence of earthworms in the mycorrhiza + earthworm treatment, reduced the uptake of zinc and manganese, 32 and 15.5% relative to mycorrhizal treatments, respectively, that probably due to the negative impact of earthworm on the destruction of fungal hyphae. While the earthworms activity had no significant effect on the uptake and concentrations of iron and copper in earthworms + mycorrhizal treatment.

Keywords: Availability of nutrients, Dissolved organic carbon, Earthworm, Mycorrhizal symbiosis, Root colonization

1- MSc. Student, Department of Soil Science, Agricultural College, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
2- Assistant Professor, Department of Soil Science, Agricultural College, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
3- Professor, Department of Soil Science, Agricultural College, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
4- Associate professor, Department of Soil Science, Agricultural College, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
* corresponding author Email: halajnia@um.ac.ir