نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و چهارم، شماره پنجم، ۱۳۹۶
http://jwsc.gau.ac.ir

تأثیر کودهای آلی، بیوچار آن‌ها و قارچ مایکوریزا آربوسکولار بر توزیع شکل‌های شیمیایی روی در یک خاک آهکی

حمیدرضا بوستانی*
استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز
تاریخ دریافت: ۹۶/۱/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۹

چکیده

سابقه و هدف: روی یک عنصر غذایی کم‌مصرف ضروری است که گیاهان عالی جهت رشد نرمال و توسعه کمی و کیفی، به آن نیاز دارند. pH بالا، مقدار کم ماده آلی و مقدار بالای کربنات کلسیم در خاک از مهم‌ترین عواملی هستند که سبب کاهش زیست‌فراهمی روی در خاک می‌شوند. هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر تلقیح قارچ مایکوریزا آربوسکولار و کاربرد دو نوع کود آلی و بیوچار حاصل از آن‌ها بر توزیع شکل‌های شیمیایی روی با استفاده از عصاره‌گیری دنباله‌ای در خاک آهکی پس از برداشت ذرت بود.

مواد و روش‌ها: جهت انجام این پژوهش مقدار مناسبی خاک از لایه سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متری) یک خاک آهکی برداشته و سپس هواخشک نموده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه انجام شد. فاکتور اول شامل کود آلی در پنج سطح (بدون کود آلی (C)، کود گوسفندی (SM)، کود مرغی (PM)، بیوچار کود گوسفندی (SMB) و بیوچار کود مرغی (PMB) هر یک ۲ درصد وزنی) و فاکتور دوم تلقیح قارچی در سه سطح (عدم تلقیح (NG)، تلقیح با قارچ *فونلیفورمیس‌موسه* (FM) و تلقیح با قارچ *گلوموس‌ورسیفرم* (GV)) بود. بیوچارها با استفاده از گرماکافت کودهای آلی (دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به‌مدت ٤ ساعت) در شرایط اکسیژن محدود تولید شدند. پس از اعمال تیمارها به خاک، بذور ذرت در گلدان‌های پلاستیکی کاشته شد و به‌مدت ۱۰ هفته نگهداری شد. برای تعیین شکل‌های شیمیایی روی در خاک پس از کشت ذرت از روش سینگ و همکاران استفاده گردید. این روش عنصر روی را به هفت شکل مختلف در خاک شامل شکل محلول و تبادلی، کربناتی، آلی، متصل به اکسیدهای منگنز، متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل، متصل به اکسیدهای آهن کریستالی و باقی‌مانده جداسازی می‌کند.

یافته‌ها: با کاربرد تیمارهای قارچی، غلظت شکل‌های محلول و تبادلی و آلی افزایش و غلظت روی متصل به اکسیدهای آهن کریستالی و بی‌شکل به‌طور معنادار نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. بیش‌ترین افزایش غلظت شکل‌های محلول و تبادلی (۳۱/۹ درصد) و آلی (۱۲/۹ درصد) در تیمار تلقیح‌شده با قارچ GV مشاهده شد. ترتیب تأثیر کاربرد تیمارهای آلی مختلف، بر افزایش غلظت هر یک از شکل‌های شیمیایی روی، متفاوت بود، هر چند تأثیر

* مسئول مکاتبه: hr.boostani@shirazu.ac.ir

تیمار بیوچار کود مرغی (PMB) نسبت به دیگر تیمارهای آلی در افزایش غلظت اکثر شکل‌های شیمیایی روی (کربناتی (۸۱/۱ درصد)، آلی (٤۲ درصد)، روی متصل به اکسیدهای منگنز (۱۵ درصد) و اکسیدهای آهن بی‌شکل (۱٤/۱ درصد)) بیش‌تر بود. توزیع شکل‌های شیمیایی روی بومی خاک به‌صورت: باقی‌مانده >> اکسیدهای آهن کریستالی > اکسیدهای آهن بی‌شکل> کربناتی> اکسیدهای منگنز> آلی > محلول و تبادلی بود، در حالی‌که بر اثر کاربرد قارچ GV و تیمارهای آلی PM و SMB توزیع شکل‌های شیمیایی روی در خاک به‌صورت: باقی‌مانده >> اکسیدهای آهن کریستالی > اکسیدهای آهن بی‌شکل > کربناتی > اکسیدهای منگنز > محلول و تبادلی > آلی تغییر یافت. همبستگی مثبت و معناداری بین شکل‌های محلول و تبادلی، کربناتی، اکسیدهای آهن بی‌شکل و کریستالی روی در خاک با روی عصاره‌گیری شده به‌وسیله DTPA وجود داشت که نشان‌دهنده نقش مؤثر این چهار شکل شیمیایی در تأمین روی مورد نیاز گیاه می‌باشد. نتایج اثر متقابل تیمارها نشان داد که تأثیر کاربرد هم‌زمان قارچ و کود آلی بر غلظت هر یک از شکل‌های شیمیایی روی متفاوت و بستگی به نوع کود آلی و قارچ مایکوریز کاربردی داشت.

نتیجه‌گیری: کاربرد هر دو گونه قارچ مایکوریزا آربوسکولار سبب تبدیل روی از شکل‌های کم‌تر قابل‌استفاده به شکل‌های با قابلیت استفاده بیش‌تر در خاک شد و تأثیر قارچ GV به‌مراتب بیش‌تر از FM بود. همچنین روی افزوده شده بر اثر کاربرد کودهای آلی به خاک، در شکل‌هایی با پتانسیل زیست‌فراهمی بیش‌تر تمرکز یافت و تأثیر تیمار PMB نسبت به سایر تیمارها مشهودتر بود.

واژه‌های کلیدی: *گلوموس‌ورسیفرم، فونلیفورمیس‌موسه*، بیوچار کود مرغی، عصاره‌گیری دنباله‌ای

مقدمه

روی یک عنصر غذایی کم‌مصرف ضروری است که اکثر گیاهان عالی جهت رشد نرمال و توسعه کمی و کیفی، به آن نیاز دارند. در بین عناصر غذایی کم‌مصرف، کمبود روی در اکثر گیاهان زراعی یکی از گسترده‌ترین و پرتکرارترین کمبودهاست (۳ و ۸). pH بالا، مقدار کم ماده آلی و مقدار بالای کربنات کلسیم در خاک از مهم‌ترین عواملی هستند که سبب کاهش زیست‌فراهمی روی در خاک می‌شوند (۳۲). بیش از ٥٦ درصد زمین‌های قابل کشت در ایران دچار کمبود روی هستند، چون مقدار روی قابل عصاره‌گیری با DTPA در این خاک‌ها کم‌تر از ۰/۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک است (۳۸). به‌طور معمول، مقدار کل روی در خاک‌های مختلف بین ۱۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک با میانگین ۵۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک است (۱۷). هر چند آگاهی از مقدار کل روی خاک، اطلاعات بسیار اندکی در مورد تغییرات و همچنین زیست‌فراهمی روی در خاک در اختیار ما قرار می‌دهد. روی تمایل متفاوتی به جذب توسط اجزای تشکیل‌دهنده خاک شامل ماده آلی، کربنات کلسیم، ذرات رس و اکسیدهای آهن و منگنز دارد، به همین دلیل روی در خاک به شکل‌های مختلفی وجود دارد که هر یک از این شکل‌ها حلالیت، تحرک و زیست‌فراهمی متفاوتی دارند (۳۰). این شکل‌ها شامل روی موجود در محلول خاک و جذب شده روی سطوح تبادلی (شکل محلول و تبادلی)، متصل به مواد آلی (شکل آلی)، متصل به کربنات‌ها (شکل کربناتی)، متصل به اکسیدهای آهن و منگنز و همچنین روی موجود در ساختمان کانی‌های اولیه (شکل باقی‌مانده) می‌باشند (۳۹). حتی اگر مقدار کل روی در خاک بالا باشد، کمبود آن محتمل است، چون زیست‌فراهمی روی در خاک به شکل‌های شیمیایی آن در خاک

وابسته است (۳۰). جهت جداسازی شکل‌های شیمیایی عناصر کم‌مصرف و تخمین پتانسیل زیست‌فراهمی آن‌ها از روش‌های عصاره‌گیری دنباله‌ای استفاده می‌شود؛ به این صورت که در مراحل ابتدایی از عصاره‌گیرهای ضعیف استفاده شده و در مراحل بعدی به عصاره‌گیرهای قوی‌تر ختم می‌شود و بسته به نوع روش عصاره‌گیری، بین ۵ تا ۷ شکل شیمیایی استخراج می‌شود (۳٤). در بین شکل‌های شیمیایی روی، شکل محلول و تبادلی دارای بیش‌ترین زیست‌فراهمی بوده و شکل باقی‌مانده تقریباً غیرفعال است. شکل‌های شیمیایی دیگر روی نیز بسته به ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک، می‌توانند منبعی بالقوه برای تأمین نیاز گیاه باشند (۲۳).

پس از استفاده از کودهای شیمیایی حاوی روی جهت رفع کمبود آن در خاک‌های آهکی، بین ۹٦ تا ۹۹ درصد روی محلول و تبادلی به شکل‌های غیرقابل جذب توسط ریشه گیاهان تبدیل می‌شود (۳۵). از این‌رو، استفاده از مواد آلی مختلف (به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک) و ریزجانداران میکروبی خاک (باکتری محرک رشد و قارچ‌های مایکوریز) می‌تواند راهکاری مناسب جهت کاهش و رفع کمبود روی در خاک‌های آهکی با داشتن حداقل آثار مخرب زیست‌محیطی و نیل به اهداف کشاورزی پایدار و ارگانیک باشد (٦ و ۷). قارچ‌های مایکوریزا آربوسکولار دارای رابطه همزیستی با ریشه اکثر گیاهان می‌باشند و از راه‌های متفاوت مانند افزایش مقدار آنزیم‌های فسفاتاز و دهیدروژناز (۵۰)، افزایش کربن آلی خاک (۱۸) و ترشح گلیکوپروتیین‌ها به‌خصوص گلومالین (۱٦) می‌توانند شرایط بیوشیمیایی خاک را تغییر داده و سبب افزایش زیست‌فراهمی و آزاد شدن روی از شکل‌های پایدار شوند. بوستانی و همکاران (۲۰۱٦) افزایش غلظت شکل‌های محلول و تبادلی، کربناتی و اکسیدهای منگنز روی و کاهش شکل باقی‌مانده روی را تحت‌تأثیر کاربرد قارچ *ریزوفاگوس اینترارادیس* در یک خاک آهکی پس از کشت ذرت گزارش کردند (٦). بالاکریشنان و سابرامانیان (۲۰۱٦) نیز گزارش نمودند که همزیستی قارچ مایکوریزا آربوسکولار (*ریزوفاگوس اینترارادیسس*) با ریشه ذرت سبب افزایش معنادار شکل آلی روی شد در حالی‌که شکل‌های متصل به اکسیدهای آهن بلورین و باقی‌مانده کاهش یافت. آن‌ها افزایش روی قابل استفاده گیاه (عصاره‌گیری‌شده توسط DTPA) را نیز بر اثر تلقیح با قارچ مایکوریزا آربوسکولار گزارش نمودند (۵). افزودن مواد آلی به خاک به‌صورت لجن فاضلاب، کودهای دامی، کمپوست و بقایای گیاهی معمولاً سبب توزیع مجدد روی در خاک می‌شود (۹). بوستانی و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که کاربرد کود گاوی و کاه و کلش گندم در سطح ۲ درصد وزنی، سبب افزایش معنادار شکل‌های محلول و تبادلی، کربناتی، آلی، پیوسته به اکسیدهای منگنز و پیوسته به اکسیدهای آهن بلورین در یک خاک آهکی پس از کشت ذرت شد (۷). هرنسیا و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که افزایش ماده آلی به خاک سبب انتقال روی از شکل‌های کم‌تر محلول به شکل‌هایی با حلالیت بیش‌تر که توسط گیاه قابل‌استفاده هستند، می‌شود (۱۳).

سرعت تجزیه مواد آلی افزوده شده به خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌دلیل استفاده فشرده از زمین، دمای بالا و کمبود نزولات آسمانی زیاد بوده، بنابراین کشاورز هر ساله ناگزیر به استفاده مقدار قابل‌توجهی از کودهای آلی به‌خصوص انواع کودهای حیوانی است. اخیراً، تبدیل کودهای آلی به بیوچار جهت کاربرد در زمین‌های کشاورزی، به‌عنوان یک کود آلی جایگزین، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است (۱). بیوچار در واقع یک ترکیب آلی سیاه غنی از کربن با حجم کم، درجه پایداری زیاد و

مقاومت بالا نسبت به تجزیه در خاک است که در شرایط اکسیژن محدود از گرماکافت ضایعات آلی گیاهی یا حیوانی تولید و به‌عنوان کود مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۰). کاربرد بیوچار در خاک می‌تواند از طرق مختلف از جمله افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، تحریک فعالیت ریزجانداران خاک و بهبود ویژگی‌های کیفی خاک سبب افزایش رشد و عملکرد گیاهان شود (۱٤ و ۱۹). از آن‌جا که پژوهش‌های بسیار محدودی در ارتباط با تأثیر کاربرد بیوچارهای مختلف و برهمکنش آن‌ها با قارچ مایکوریزا آربوسکولار بر توزیع شکل‌های شیمیایی روی در خاک آهکی تحت کشت گیاه انجام گرفته است، این پژوهش با اهداف زیر انجام شد:

الف) بررسی و مقایسه کاربرد دو نوع کود حیوانی (گوسفندی و مرغی) و بیوچار حاصل از آن‌ها بر غلظت و توزیع شکل‌های شیمیایی روی در یک خاک آهکی پس از کشت ذرت، ب) بررسی تأثیر تلقیح دو گونه قارچ مایکوریزا آربوسکولار (*فونلیفورمیس‌موسه* و *گلوموس ورسیفرم*) بر غلظت و توزیع شکل‌های شیمیایی روی در خاک، ج) بررسی اثر برهمکنش مواد آلی به‌کار رفته با قارچ مایکوریزا آربوسکولار بر غلظت شکل‌های شیمیایی روی و تعیین همبستگی بین شکل‌های شیمیایی روی و روی قابل عصاره‌گیری با DTPA.

مواد و روش‌ها

تهیه و تعیین ویژگی‌های کودهای آلی و بیوچار آن‌ها: کود مرغی و گوسفندی که به‌طور گسترده در زمین‌های کشاورزی منطقه داراب استفاده می‌شوند، از دامپروری‌ها و مرغداری‌های فعال در منطقه تهیه شد. جهت تهیه بیوچار از کودهای مورد نظر، در ابتدا کودها هواخشک، سپس آسیاب و به‌مدت ۲٤ ساعت در دمای ٦۰ درجه سلسیوس در آون نگهداری شدند. در ادامه مقداری از کودها در یک ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتری به‌صورت فشرده قرار داده و توسط ورقه آلومینومی دولایه ضخیم جهت ایجاد شرایط اکسیژن محدود پوشانده شدند. سپس نمونه کود آلی در یک کوره الکتریکی در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به‌مدت ٤ ساعت حرارت داده شد. پس از آن، بیوچارهای تولیدی در دمای اتاق به‌تدریج سرد شدند و قبل از استفاده از الک ۰/۵ میلی‌متری عبور داده شدند (۲٦). pH مواد اولیه و بیوچار حاصل از آن‌ها با استفاده از سوسپانسیون ۱:۲۰ کود آلی به آب مقطر (٤۵)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۱:۱۰ کود آلی به آب مقطر (۵۱) و درصد کربن و نیتروژن توسط دستگاه CHN Analyzer (ThermoFinnigan Flash EA 1112 Series) اندازه‌گیری شد. جهت تعیین غلظت کل عنصر روی از عصاره حاصل از روش خشک‌سوزانی و حل خاکستر حاصل در اسید کلریدریک ۲ نرمال استفاده شد. در عصاره حاصل، غلظت عنصر روی توسط دستگاه جذب اتمی (AAS; PG 990, PG Instruments Ltd. UK) تعیین شد.

نمونه‌برداری خاک و آزمایش گلدانی: جهت انجام این پژوهش مقدار مناسبی خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری با طبقه‌بندی Coarse-loamy, carbonatic, hyperthermic Typic Haplustepts از مزارع دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب واقع در ۲٦۰ کیلومتری جنوب‌شرقی شیراز واقع در استان فارس برداشته شد. پس از هواخشک کردن و عبور از الک ۲ میلی‌متری برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مورد نظر اندازه‌گیری شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (۱۰)، pH در گل اشباع (٤۸)، قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عصاره اشباع (۳۳)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسیدکلریدریک (۲۲)، ماده آلی به روش اکسیداسیون با اسیدکرومیک

و سپس تیتره کردن توسط فروآمونیوم‌سولفات (۲۷)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش جانشینی کاتیون‌ها توسط استات سدیم (٤٦)، فسفر قابل‌استفاده توسط عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم ۰/۵ نرمال (۲۸)، پتاسیم قابل‌استفاده توسط استات‌آمونیوم ۱ مولار (۱۲)، روی قابل‌استفاده توسط عصاره‌گیر DTPA (۲۱) و روی کل خاک توسط اسیدنیتریک ٤ نرمال (٤۳) اندازه‌گیری شد.

آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در شرایط گلخانه انجام شد. فاکتور اول شامل کود آلی در پنج سطح (بدون کاربرد کود آلی (C)، کود گوسفندی (SM)، کود مرغی (PM)، بیوچار کود گوسفندی (SMB) و بیوچار کود مرغی (PMB) هر یک ۲ درصد وزنی) و فاکتور دوم شامل تلقیح قارچی درسه سطح (عدم تلقیح (N)، تلقیح با قارچ *فونلیفورمیس‌موسه*[1] (FM) و تلقیح با قارچ *گلوموس‌ورسیفرم*[2] (GV)) بود. قارچ‌های مایکوریزا آربوسکولار از آزمایشگاه بیولوژی پخش علوم خاک دانشگاه شیراز تهیه شد. در آغاز طبق طرح آزمایشی تیمارهای آلی به ۲ کیلوگرم خاک افزوده شده و به‌مدت ۱۵ روز در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در حدود رطوبت مزرعه توسط آب‌مقطر نگهداری شده و سپس به گلدان‌های پلاستیکی انتقال داده شدند. برای اعمال تیمارهای قارچی، در گلدان‌های مربوط به تیمارهای قارچی قبل از کشت، مقداری از خاک سطحی (۱ الی ۵ سانتی‌متری) را برداشته و به آن مقدار ۵۰ گرم از مایه قارچی (۱۱-۱۰ اسپور در هر گرم بستر، هیف و قطعات کلنیزه شده (۸۵-۸۰٪) و کلنیزه نشده ریشه‌ای) افزوده و با خاک مخلوط شد. تیمارهای فاقد قارچ نیز به همان اندازه از زادمایه قارچی سترون شده (اتوکلاو شده در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس به‌مدت ۲۵ دقیقه) دریافت کردند. پس از اعمال تیمارهای میکروبی، کشت گیاه به تعداد ۵ بذر ذرت ضدعفونی شده رقم سینگل‌گراس ۷۰٤ در عمق حدود ۲ سانتی‌متری انجام‌شد. در هفته دوم رشد گیاه در هر گلدان فقط دو بوته نگهداری شد. در طول دوره رشد، رطوبت گلدان‌ها روزانه به‌صورت وزنی با استفاده از آب‌مقطر در حدود ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه نگهداشته شدند. پس از ۱۰ هفته، گیاهان برداشت شده و ریشه گیاه از خاک گلدان‌ها جدا شد. پس از هوا خشک شدن خاک و عبور از الک ۲ میلی‌متری، مقداری از آن جهت تعیین شکل‌های شیمیایی روی به آزمایشگاه منتقل شد.

اندازه‌گیری شکل‌های شیمیایی روی در خاک: جهت اندازه‌گیری شکل‌های شیمیایی روی از روش سینگ و همکاران (۱۹۸۸) استفاده شد (٤۲). این روش، روی را به شکل‌های محلول و تبادلی، کربناتی، آلی، اکسیدهای منگنز، اکسیدهای آهن بی‌شکل، اکسیدهای آهن بلورین و باقی‌مانده جدا می‌کند (جدول ۱). شکل باقی‌مانده روی از طریق تفاوت بین مقدار کل روی خاک و جمع شکل‌های دیگر محاسبه شد (۱۵). غلظت روی کل در خاک در عصاره به‌دست آمده از ۲ گرم خاک که به‌مدت یک شب توسط ۲۵ میلی‌لیتر اسیدنیتریک ٤ نرمال در دمای ۸۰ درجه سلسیوس هضم شده، اندازه‌گیری شد (٤۳). بعد از عصاره‌گیری روی در هر مرحله، غلظت روی به‌وسیله دستگاه جذب اتمی قرائت شد. لازم به ذکر است که استانداردهای روی در محلول‌هایی که از نظر ترکیب و غلظت مشابه عصاره‌گیرهای هر مرحله است، تهیه شد. همچنین روی قابل‌استفاده خاک نیز با استفاده از عصاره‌گیر DTPA تعیین شد (۲۱).

1- *Funneliformis mosseae*
2- *Glomus versiform*

جدول ۱- روش عصاره‌گیری دنباله‌ای سینگ و همکاران (۱۹۸۸).

Table 2. Sequential extraction procedure of Sing et al, 1988.

شکل‌های شیمیایی روی Chemical forms of Zn	علامت اختصاری abbreviation	مدت تکان دادن (ساعت) Time of shaking (h)	عصاره‌گیر مورد استفاده Used extractant	جرم مخصوص (گرم بر سانتی‌مترمکعب) Specific gravity ($g.cm^{-3}$)
محلول و تبادلی Exchangeable and soluble	WsEx-Zn	2	1 M $Mg(NO_3)_2$	1.10
کربناتی Carbonatic	Car-Zn	5	1 M NaOAC (pH=5)	1.04
آلی oOrganic	OM-Zn	0.5	0.7 M NaOCl (pH=8.5)	1.00
متصل به اکسیدهای منگنز Mn oxide	MnOx-Zn	0.5	0.1 M NH_2OH, HCl (pH=2, HNO_3)	1.00
متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل Amorphous Fe oxides	AFeOx-Zn	0.5	0.25 M NH_2OH, HCl + 0.25 M HCl	1.01
متصل به اکسیدهای آهن کریستالی Crystaline Fe oxides	CFeOx-Zn	0.5	0.2 M $(NH_4)_2C_2O_4$ + 0.2 M $H_2C_2O_4$ + 0.1 M $C_6H_8O_6$	1.02

پردازش داده‌ها: تجزیه‌های آماری داده‌ها، توسط برنامه‌های کامپیوتری Excel و MSTATC انجام و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. همچنین، تعیین ضرائب همبستگی نیز با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد.

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های خاک و کودهای آلی: نتایج برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری‌شده خاک به این صورت بود: بافت خاک لومی، پ‌هاش خاک ۷/۸، قابلیت هدایت الکتریکی خاک ۱/۱ دسی‌زیمنس بر متر، کربنات‌کلسیم معادل ٤۲ درصد، مقدار ماده آلی ۱ درصد، ظرفیت تبادل کاتیونی ۱٦ میلی‌اکی‌والان در صد گرم خاک، فسفر قابل‌استفاده ۱۷ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، پتاسیم قابل‌استفاده ۲٤۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، روی قابل‌استفاده، ۰/٤۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و روی کل خاک ٤۲ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بود. بنابراین خاک مورد مطالعه دارای پ‌هاش قلیایی، آهکی، مقدار ماده آلی کم و شوری پایین بود. همچنین غلظت روی قابل‌استفاده خاک کم‌تر از حد بحرانی (۰/۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) بود. برخی از خصوصیات مواد آلی مورد استفاده نیز در جدول ۲ آورده شده است. قابلیت هدایت الکتریکی کود گوسفندی (۱۰/۹۲ دسی‌زیمنس بر متر) نسبت به کود مرغی (٦/۸۰ دسی‌زیمنس بر متر) بیش‌تر بود، در حالی‌که مقدار پ‌هاش کود مرغی (۸/٤۲) نسبت به کود گوسفندی (۸/۰۸) بیش‌تر بود. به‌ترتیب درصد نیتروژن و کربن در کودهای آلی مورد استفاده بین ۲/٦۱-۱/۸٤ و ۳٤/۱۱-۱۸/۸۱ بود. مقدار روی کل نیز در مواد آلی کاربردی کاملاً متفاوت بود، به‌طوری‌که بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار روی به‌ترتیب مربوط به بیوچار کود مرغی (۲۱۰/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) و کود گوسفندی (۲۲/۹۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) بود.

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های شیمیایی کودهای آلی و بیوچار آن‌ها.

Table 2. Some chemical characteristics of organic manures and their biochars.

بیوچار کود مرغی Poultry manure biochar	کود مرغی Poultry manure	بیوچار کود گوسفندی Sheep manure biochar	کود گوسفندی Sheep manure	ویژگی Property
8.80	6.80	12.6	10.92	قابلیت هدایت الکتریکی EC (1:10)(dS m^{-1})
10.26	8.42	10.21	8.08	پ‌هاش pH (1:20)
27.07	18.81	34.11	31.89	کربن Carbon (%)
2.56	2.61	1.84	2.01	نیتروژن Nitrogen (%)
210.50	156.50	36.50	22.95	روی کل Total zinc (mg kg^{-1})

اثر کاربرد کود آلی و قارچ مایکوریزا بر شکل‌های شیمیایی روی در خاک

شکل محلول و تبادلی روی: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی تلقیح قارچ مایکوریزا و کود آلی و همچنین اثرات متقابل آن‌ها بر غلظت شکل محلول و تبادلی روی در خاک در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۳).

جدول ۳- میانگین مربعات توزیع شکل‌های شیمیایی روی تحت‌تأثیر کاربرد کود آلی و قارچ مایکوریزا پس از کشت ذرت.

Table 3. The mean squares of distribution of zinc chemical forms as affected by organic manure and mycorrhizae fungi application in soil after corn cultivation.

باقی‌مانده Res	پیوسته به اکسیدهای آهن بلورین CFeOx	پیوسته به اکسیدهای آهن بی‌شکل AFeOx	پیوسته به اکسیدهای منگنز MnOx	آلی Org	کربناتی Car	تبادلی و محلول WsEx	درجه آزادی DF	منابع تغییر S.O.V
8.783**	3.287**	0.480**	0.149**	0.401**	3.915**	1.118**	4	کود آلی (OM)
1.756^{ns}	0.858**	0.094*	0.054^{ns}	0.180*	0.895^{ns}	0.633**	2	تلقیح قارچ (F)
5.957**	1.036**	0.046*	0.044^{ns}	0.116^{ns}	1.919**	0.969**	8	کود آلی × تلقیح قارچ (OM × F)
1.271	0.132	0.019	0.021	0.056	0.366	0.014	30	خطا Error
4.24	5.87	3.62	6.42	17.91	21.45	8.52		درصد ضریب تغییرات (CV)

**، * و ^{ns} به‌ترتیب معنادار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و غیرمعنادار.

**, *, ^{ns} are significant at 0.01, 0.05 probability level and not significant respectively.

مقایسه میانگین اثرات اصلی کاربرد کود آلی نشان داد که کاربرد هر چهار تیمار آلی سبب افزایش معنادار غلظت شکل محلول و تبادلی روی نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ٤)، به‌طوری‌که بیش‌ترین غظت این شکل روی در تیمار کاربرد کود مرغی به مقدار ۱/۷۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک مشاهده شد که معادل ۱۱۱ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد بود. ترتیب غلظت شکل محلول و تبادلی روی در تیمارهای مختلف آلی به‌صورت C < SM < SMB = PMB < PM بود. تاگویرا و همکاران (۱۹۹۲) معتقدند وجود ماده آلی در خاک سبب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شده و مکان‌های جذب قابل برگشت را بر سطوح خاک افزایش می‌دهد، به‌همین دلیل روی می‌تواند بیش‌تر در شکل تبادلی قرار بگیرد (٤۷). بوستانی و همکاران (۲۰۱۷) با افزودن ۲ درصد وزنی کود گاوی و کاه و کلش گندم در یک خاک آهکی پس از کشت ذرت مشاهده کردند که شکل محلول و تبادلی روی به‌طور معناداری افزایش یافت (۷). همچنین مقایسه میانگین اثرات اصلی کاربرد قارچ مایکوریزا آربوسکولار نشان داد که کاربرد هر دو گونه قارچ مایکوریزا سبب افزایش معنادار غلظت شکل محلول و تبادلی روی شد (جدول ٤). تأثیر قارچ GV در افزایش غلظت این شکل روی در خاک نسبت به تیمار شاهد به‌مراتب بیش‌تر از کاربرد قارچ FM بود به این ترتیب که قارچ GV غلظت روی را در این شکل به مقدار ۳۱/۹ درصد و قارچ FM به‌میزان ۸/۲ درصد افزایش داد (جدول ٤). بوستانی و همکاران (۲۰۱٦) گزارش کردند که تلقیح قارچ *ریزوفاگوس اینترارادیسس* به یک خاک آهکی سبب افزایش ۷۲/۵ درصدی شکل محلول و تبادلی روی پس از کشت ذرت شد (٦). همچنین غلامی (۲۰۱۱) گزارش نمود که بر اثر کاربرد قارچ مایکوریزا (*ریزوفاگوس اینترارادیسس*) در سطح پایین روی خاک، شکل محلول و تبادلی روی افزایش یافته و با افزایش سطوح روی این شکل به‌طور معناداری کاهش یافت (۱۱). احتمالاً افزایش شکل محلول و تبادلی روی بر اثر تلقیح توسط قارچ مایکوریزا آربوسکولار می‌تواند در اثر تولید و ترشح اسیدهای آلی توسط قارچ مایکوریز و ریشه، آزاد شدن روی از شکل‌های بلوری و کلاته شدن آن توسط اسیدهای آلی باشد (۵، ۲۵ و ٤٤). نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارها نشان داد که کم‌ترین و بیش‌ترین غلظت روی در شکل محلول و تبادلی در تیمارهای مرکب C+N و PM+GV به‌ترتیب به مقدار ۰/۵۱ و ۲/۷٤ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک مشاهده شد (جدول ٤). در تیمارهای C و SM تأثیر هر دو گونه قارچی در افزایش شکل محلول و تبادلی روی در خاک یکسان بود در حالی‌که در تیمارهای PM و PMB تأثیر قارچ GV به‌طور محسوسی بیش‌تر از قارچ FM بود و از سوی دیگر در تیمار آلی SMB تأثیر قارچ FM در افزایش این شکل روی به مراتب بیش‌تر از قارچ GV بود (جدول ٤). بنابراین مشخص است که تأثیر گونه‌های قارچی کاربردی بر تغییر غلظت شکل محلول و تبادلی روی در خاک بستگی مستقیم به نوع کود آلی کاربردی در خاک دارد.

جدول ٤- اثر کاربرد کود آلی و قارچ مایکوریزا بر غلظت روی (میلی‌گرم در کیلوگرم) بر شکل محلول و تبادلی در یک خاک آهکی پس از کشت ذرت.

Table 4. Effect of organic manure and mycorrhiza fungi on the zinc concentration (mg kg^{-1}) in exchangeable and soluble form in a calcareous soil after corn cultivation.

	بیوچار کود گوسفندی (SMB)	بیوچار کود مرغی (PMB)	کود گوسفندی (SM)	کود مرغی (PM)	بدون ماده آلی *(C)	
1.22 C	1.54 c	1.29 de	1.49 cd	1.27 e	0.509 h	بدون تلقیح (N)*
1.32 B	2.20 b	1.14 efg	1.20 ef	1.13 efg	0.93 g	*فونلیفورمیس‌موسه* (FM)
1.61 A	1.03 fg	2.08 b	1.21 ef	2.74 a	1.01 fg	*گلوموس ورسیفرم* (GV)
	1.590 B	1.50 B	1.30 C	1.72 A	0.815 D	

* میانگین‌های دارای حروف لاتین بزرگ مشترک و کوچک مشترک در هر ستون یا سطر از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن معنادار نیستند.

* Numbers followed by same letters in each column and rows are not significantly ($P<0.05$) different.
* In all tables: C: without organic matter, PM: poultry manure, SM: sheep manure, PMB: poultry manure biochar, SMB:sheep manure biochar, N: without inoculation, FM: *Funneliformis mosseae*, GV: *Glomus versiform.*

شکل کربناتی روی: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی کاربرد کود آلی و همچنین برهمکنش کود آلی و تلقیح قارچی بر غلظت شکل کربناتی روی در خاک در سطح احتمال یک درصد معنادار بود در حالی‌که اثر اصلی تلقیح قارچ مایکوریزا بر این شکل روی در خاک معنادار نبود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای آلی نشان داد که کاربرد کودهای آلی PM و PMB سبب افزایش معنادار شکل کربناتی روی در خاک نسبت به تیمار شاهد شدند. هر چند که کاربرد تیمارهای آلی SM و SMB این شکل روی را در خاک افزایش داد ولی از نظر آماری معنادار نبود. بیش‌ترین افزایش شکل کربناتی روی مربوط به تیمار کاربرد PMB به مقدار ۸۱/۱ درصد نسبت به تیمار شاهد بود (جدول ۵). راموس و همکاران (۱۹۹٤) گزارش کردند که حضور عناصر سنگین در شکل کربناتی نشان‌دهنده pH مناسب برای رسوب این عناصر در خاک‌های آهکی است، به این معنی که کربنات‌کلسیم به‌عنوان یک جاذب قوی برای عناصر سنگین بوده و این عناصر را به‌صورت $CaCO_3.MCO_3$ رسوب می‌دهد (M نشان‌دهنده یون فلزی است) (۳۱). عثمان و همکاران (۲۰۰٤) گزارش کردند که با افزودن کود آلی به خاک آهکی شکل کربناتی روی نسبت به تیمار شاهد افزایش معناداری یافت. توجیه آنان این بود که چون خاک آهکی است روی به‌صورت کربنات روی رسوب می‌دهد و درصد زیادی از روی قابل‌جذب حاصل از تجزیه ماده آلی اضافه شده به خاک در شکل کربناتی رسوب می‌کند (٤۹). بوستانی و همکاران (۲۰۱۷) نیز افزایش معنادار شکل کربناتی روی را بر اثر افزودن ۲ درصد کود آلی مشاهده کردند (۷). نتایج اثر متقابل تیمارها نشان داد که کم‌ترین مقدار شکل کربناتی روی در تیمار مرکب C+N به مقدار ۱/۹۹ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و بیش‌ترین مقدار این شکل روی به‌طور مشترک در تیمارهای مرکب PM+N و PMB+GV به‌ترتیب به مقدار ٤/۸۳ و ۳/۹۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک مشاهده شد (جدول ۵). در تیمارهای C، PMB و SMB کاربرد هر دو گونه قارچی تأثیر معناداری بر غلظت شکل کربناتی روی نداشت در حالی‌که در تیمار آلی PM کاربرد هر دو گونه قارچ سبب کاهش معنادار شکل

کربناتی روی شد. از سوی دیگر در تیمار آلی SM کاربرد قارچ GV سبب کاهش معنادار این شکل روی شد در حالی‌که کاربرد قارچ FM تأثیر معناداری بر غلظت شکل کربناتی روی نداشت. بنابراین نوع کود آلی کاربردی اثر مستقیم بر تأثیر قارچ مایکوریزا بر روی تغییر غلظت شکل کربناتی روی در خاک داشت (جدول ۵).

جدول ۵- اثر کاربرد کود آلی و قارچ مایکوریزا بر غلظت روی (میلی‌گرم در کیلوگرم) در شکل کربناتی در یک خاک آهکی پس از کشت ذرت.

Table 5. Effect of organic manure and mycorrhiza fungi on the zinc concentration (mg kg^{-1}) in carbonate form in a calcareous soil after corn cultivation.

	بیوچار کود گوسفندی (SMB)	بیوچار کود مرغی (PMB)	کود گوسفندی (SM)	کود مرغی (PM)	بدون ماده آلی *(C)	
3.056 ^{A}	2.04 ^{e}	3.88 ^{ab}	2.53 ^{cde}	4.83 ^{a}	1.99 ^{e}	بدون تلقیح (N)*
2.836 ^{AB}	3.14 ^{bcde}	3.46 ^{bc}	3.28 ^{bdc}	2.23 ^{de}	2.06 ^{e}	*فونلیفورمیس‌موسه* (FM)
2.568 ^{AB}	2.20 ^{de}	3.93 ^{ab}	2.09 ^{e}	2.47 ^{cde}	2.15 ^{de}	*گلوموس ورسیفرم* (GV)
	2.46 ^{C}	3.75 ^{A}	2.63 ^{BC}	3.18 ^{AB}	2.07 ^{C}	

* میانگین‌های دارای حروف لاتین بزرگ مشترک و کوچک مشترک در هر ستون یا سطر از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن معنادار نیستند.

* Numbers followed by same letters in each column and rows are not significantly ($P<0.05$) different.

شکل آلی روی: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی کود آلی و تلقیح قارچی بر غلظت روی در شکل آلی به‌ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد معنادار بود. در حالی‌که اثرات متقابل آن‌ها بر غلظت روی در این شکل از نظر آماری معنادار نبود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای آلی نشان داد که هر چند کاربرد تیمارهای PM و SMB شکل آلی روی را نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند ولی از نظر آماری معنادار نبود (جدول ٦) در حالی‌که کاربرد تیمارهای SM و PMB سبب افزایش معنادار غلظت شکل آلی روی نسبت به تیمار شاهد شد، به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار شکل آلی روی در تیمار PMB به مقدار ۱/۵۹ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک به‌دست آمد که این مقدار معادل ٤۲ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد بود. الماس و همکاران (۱۹۹۹) گزارش کردند که مواد آلی مانند کود دامی غنی از ترکیبات محلول هستند که می‌تواند سبب افزایش حلالیت فلزات، کمی بعد از افزودن این مواد به خاک و همچنین سبب تشکیل ترکیبات آلی فلزی محلول شوند (٤). سخون و همکاران (۲۰۰٦) مشاهده کردند که افزودن کود آلی در غیاب کود شیمیایی روی، شکل‌های شیمیایی روی، از جمله شکل آلی را نسبت به تیمار شاهد به‌طور معناداری افزایش داد (۳٦). بوستانی و همکاران (۲۰۱۷) نیز با افزودن دو نوع ماده آلی (کود گاوی و کاه و کلش گندم در سطح ۲ درصد وزنی) به یک خاک آهکی افزایش معنادار شکل آلی روی را گزارش کردند (۷).

جدول ٦- اثرات اصلی کاربرد تیمارهای آلی بر غلظت روی (میلی‌گرم در کیلوگرم) در شکل آلی در یک خاک آهکی پس از کشت ذرت.

Table 6. The main effects of organic treatments on the zinc concentration (mg kg^{-1}) in organic form in a calcareous soil after corn cultivation.

بیوچار کود گوسفندی (SMB)	بیوچار کود مرغی (PMB)	کود گوسفندی (SM)	کود مرغی (PM)	بدون ماده آلی (C)*
1.30 bc	1.59 a	1.48 ab	1.12 c	1.12 c

* میانگین‌های دارای حروف لاتین بزرگ مشترک و کوچک مشترک در هر ستون یا سطر از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن معنادار نیستند.

* Numbers followed by same letters in each column and rows are not significantly (P<0.05) different.

همچنین نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای قارچی نشان داد که کاربرد هر دو گونه قارچی سبب افزایش غلظت شکل آلی روی نسبت به تیمار شاهد شد. هر چند که تأثیر قارچ FM نسبت به تیمار شاهد از نظر آماری معنادار نبود (جدول ۷). کاربرد قارچ GV سبب افزایش ۱۲/۹ درصدی غلظت شکل آلی روی نسبت به تیمار شاهد شد. بالاکریشنان و سابرامانیان (۲۰۱٦) نیز گزارش نمودند که همزیستی قارچ مایکوریز آربوسکولار (*ریزوفاگوس اینترارادیسس*) با ریشه ذرت سبب افزایش معنادار شکل آلی روی شد که با پژوهش حاضر مطابقت دارد (۵)، اما غلامی (۲۰۱۱) و بوستانی و همکاران (۲۰۱٦) تغییر معناداری را در شکل آلی روی بر اثر تلقیح توسط قارچ مایکوریز آربوسکولار در یک خاک آهکی پس از کشت ذرت مشاهده نکردند (۱۱ و ٦).

جدول ۷- اثرات اصلی کاربرد تیمارهای قارچی بر غلظت روی (میلی‌گرم در کیلوگرم) در شکل آلی در یک خاک آهکی پس از کشت ذرت.

Table 7. The main effects of fungi treatments on the zinc concentration (mg kg^{-1}) in organic form in a calcareous soil after corn cultivation.

گلوموس ورسیفرم (GV)	*فونلیفورمیس‌موسه* (FM)	بدون تلقیح (N)*
1.40 a	1.28 ab	1.24 b

* میانگین‌های دارای حروف لاتین بزرگ مشترک و کوچک مشترک در هر ستون یا سطر از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن معنادار نیستند.

* Numbers followed by same letters in each column and rows are not significantly (P<0.05) different.

روی پیوسته به اکسیدهای منگنز: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی کاربرد کود آلی بر غلظت روی متصل به اکسیدهای منگنز در خاک در سطح احتمال یک درصد معنادار بود. در حالی‌که اثرات اصلی تیمار تلقیح قارچی و همچنین برهمکنش بین قارچ و کود آلی از نظر آماری معنادار نبود (جدول ۳). غلامی (۲۰۱۱) گزارش کرد که علی‌رغم این‌که شکل روی متصل به اکسیدهای منگنز بر اثر افزودن قارچ به خاک افزایش یافت ولی از نظر آماری معنادار نبود (۱۱). مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای آلی نشان داد که به‌جز تیمار PM، دیگر تیمارهای آلی تأثیر معناداری را بر افزایش شکل روی پیوسته به اکسیدهای منگنز داشت به‌طوری‌که تیمار SMB سبب افزایش ۱۵/۷ درصدی این شکل روی نسبت به تیمار شاهد شد، هر چند با تیمار PMB تفاوت معناداری نداشت (جدول ۸). جلالی و

خانبلوکی (۲۰۰۸) پس از عبور دادن شیرابه کود مرغی به‌مدت چند ساعت از یک ستون خاک مشاهده کردند که شکل متصل به اکسیدهای منگنز روی به‌میزان ۲۸/۱۲ درصد افزایش نشان داد. همچنین بوستانی و همکاران (۲۰۱۷) افزایش غلظت روی پیوسته به اکسیدهای منگنز بر اثر کاربرد ۲ درصد وزنی کود گاوی و کاه و کلش گندم را در یک خاک آهکی تحت کشت ذرت گزارش کردند (۷).

جدول ۸- اثرات اصلی کاربرد تیمارهای آلی بر غلظت روی (میلی‌گرم در کیلوگرم) در شکل پیوسته به اکسیدهای منگنز در یک خاک آهکی پس از کشت ذرت.

Table 8. The main effects of organic treatments on the zinc concentration (mg kg^{-1}) in manganese oxides form in a calcareous soil after corn cultivation.

بیوچار کود گوسفندی (SMB)	بیوچار کود مرغی (PMB)	کود گوسفندی (SM)	کود مرغی (PM)	بدون ماده آلی (C)*
2.42 [a]	2.31 [ab]	2.25 [b]	2.17 [bc]	2.09 [c]

* میانگین‌های دارای حروف لاتین بزرگ مشترک و کوچک مشترک در هر ستون یا سطر از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن معنادار نیستند.

* Numbers followed by same letters in each column and rows are not significantly ($P<0.05$) different.

روی متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی کود آلی بر غلظت روی متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل در خاک در سطح احتمال یک درصد و اثرات اصلی تلقیح قارچی و همچنین برهمکنش بین کود آلی و تلقیح قارچی بر غلظت این شکل روی در خاک در سطح احتمال پنج درصد معنادار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای آلی نشان داد که کاربرد هر چهار کود آلی سبب افزایش معنادار غلظت روی پیوسته به اکسیدهای آهن بی‌شکل نسبت به تیمار شاهد شد. تأثیر کاربرد کود مرغی و بیوچار حاصل از آن در افزایش غلظت روی پیوسته به اکسیدهای آهن بی‌شکل به‌مراتب بهتر از تأثیر کود گوسفندی و بیوچار حاصل از آن بود به‌طوری‌که ترتیب غلظت این شکل روی در تیمارهای مختلف آلی به‌صورت C < SM=SMB < PM=PMB بود (جدول ۹). شومن (۱۹۸۸) نشان داد که بر اثر کاربرد مواد آلی مقدار روی در شکل همراه با اکسیدهای آهن بی‌شکل افزایش یافت. وی بیان کرد که روی از طریق محبوس شدن و جذب‌شدن در ارتباط با اکسیدهای آهن است و هنگامی که اکسیدهای آهن حل می‌شوند، روی آزاد می‌گردد (۴۰). کمالی و همکاران (۲۰۱۱) با افزودن یک درصد وزنی ورمی‌کمپوست، کود گاوی و کاه و کلش گندم به یک خاک آهکی در مدت ۹۰ روز، افزایش معنادار غلظت روی متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل را مشاهده کردند (۱۵). همچنین بوستانی و همکاران (۲۰۱۷) نیز افزایش معنادار غلظت روی متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل را بر اثر افزودن دو نوع ماده آلی متفاوت به یک خاک آهکی تحت کشت ذرت گزارش کردند (۷). مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای قارچی نشان داد که تلقیح قارچ FM بر غلظت روی پیوسته به اکسیدهای آهن بی‌شکل در خاک تأثیر معناداری نداشت در حالی‌که تلقیح قارچ GV به‌طور معناداری سبب کاهش غلظت روی متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل در خاک نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۹). غلامی (۲۰۱۱) نشان داد که در خاک مایه‌زنی شده با قارچ مایکوریز آربوسکولار، شکل روی متصل به اکسیدهای

آهن بی‌شکل به‌طور معناداری نسبت به تیمار تلقیح نشده کاهش یافت (۱۱)، در حالی‌که بالاکریشنان و سابرامانیان (۲۰۱٦) و بوستانی و همکاران (۲۰۱٦) تغییر معناداری را در این شکل روی بر اثر تلقیح ذرت توسط قارچ مایکوریز آربوسکولار (*ریزوفاگوس اینترارادیسس*) مشاهده نکردند (۵ و ٦). مارتینو و همکاران (۲۰۰۳) دریافتند که قارچ *مایکوریز اریکویید* سبب حل شدن و آزادسازی روی از شکل‌های نامحلول در نتیجه ترشح اسیدهای آلی با قابلیت کمپلکس‌کردن بالا توسط این قارچ شد (۲۵). نتایج اثر متقابل تیمارها نشان داد که کم‌ترین و بیش‌ترین غلظت روی در این شکل در خاک به‌ترتیب در تیمارهای مرکب GV+C و PM+N به مقدار ۳/۲۷ و ٤/۱۸ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک مشاهده شد (جدول ۹).

جدول ۹- اثر کاربرد کود آلی و قارچ مایکوریزا بر غلظت روی (میلی‌گرم در کیلوگرم) در شکل پیوسته به اکسیدهای آهن بی‌شکل در یک خاک آهکی پس از کشت ذرت.

Table 9. Effect of organic manure and mycorrhiza fungi on the zinc concentration (mg kg^{-1}) in amorphous iron oxides form in a calcareous soil after corn cultivation.

	بیوچار کود گوسفندی (SMB)	بیوچار کود مرغی (PMB)	کود گوسفندی (SM)	کود مرغی (PM)	بدون ماده آلی (C)*	
3.81 ^{A}	3.75 $^{c-e}$	3.86 $^{b-d}$	3.79 $^{b-e}$	4.18 ^{a}	3.46 ^{fg}	بدون تلقیح (N)*
3.84 ^{A}	3.66 $^{d-f}$	4.04 ^{ab}	3.83 $^{b-d}$	3.96 $^{a-c}$	3.69 $^{d-f}$	*فونلیفورمیس‌موسه* (FM)
3.69 ^{B}	3.61 $^{d-f}$	3.97 $^{a-c}$	3.55 ^{ef}	4.02 ^{ab}	3.27 ^{g}	*گلوموس ورسیفرم* (GV)
	3.68 ^{B}	3.96 ^{A}	3.72 ^{B}	4.05 ^{A}	3.47 ^{C}	

* میانگین‌های دارای حروف لاتین بزرگ مشترک و کوچک مشترک در هر ستون یا سطر از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن معنادار نیستند.

* Numbers followed by same letters in each column and rows are not significantly ($P<0.05$) different.

روی پیوسته به اکسیدهای آهن کریستالی: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی تلقیح قارچ مایکوریزا و کود آلی و همچنین اثرات متقابل آن‌ها بر غلظت روی متصل به اکسیدهای آهن کریستالی در خاک در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات اصلی کاربرد کودهای آلی نشان داد که کاربرد تیمارهای PM، SM و PMB به‌طور معناداری غلظت روی پیوسته به اکسیدهای آهن کریستالی را در خاک نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند در حالی‌که کاربرد تیمار SMB غلظت روی را در این شکل به‌طور معناداری کاهش داد. ترتیب غلظت روی متصل به اکسیدهای آهن کریستالی در تیمارهای مختلف آلی به‌صورت SMB < C < SM=PMB < PM بود (جدول ۱۰). لو و کریستیه (۱۹۹۸) گزارش کردند که روی میل زیادی به جذب بر سطوح اکسیدهای آهن و منگنز به‌خصوص در pHهای بالا دارد. به‌همین دلیل ممکن است مقداری از روی افزوده شده به خاک و همچنین روی موجود در مواد آلی به این اکسیدها متصل شده و بنابراین با افزودن کود آلی مقادیر مربوط به این شکل‌ها تا حدی افزایش نشان دهد (۲٤). همچنین کمالی و همکاران (۲۰۱۱) و بوستانی و همکاران (۲۰۱۷) افزایش معنادار غلظت روی متصل به اکسیدهای آهن کریستالی در خاک را بر اثر افزودن

مواد آلی گیاهی و حیوانی متفاوت گزارش کردند (۱۵ و ۷). مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای قارچی نشان داد که تلقیح هر دو گونه قارچی به‌طور معناداری سبب کاهش غلظت روی متصل به اکسیدهای آهن کریستالی در خاک شد به‌طوری‌که بیش‌ترین کاهش مربوط به تیمار تلقیح قارچی GV به مقدار ۷/٤٥ درصد بود، هر چند بین دو تیمار تلقیح قارچی تفاوت معناداری از نظر آماری وجود نداشت (جدول ۱۰). سابرامانیان و همکاران (۲۰۰۹) بیان کردند که فعالیت میکروبی فشرده و فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز در خاک‌های تیمار شده با قارچ سبب کاهش pH ریزوسفر شده و می‌تواند سبب آزادسازی روی از شکل‌های کریستالی باشد (٤٤). در مورد اثر قارچ مایکوریزا آربوسکولار بر غلظت روی متصل به اکسیدهای آهن کریستالی نتایج متفاوتی گزارش شده است. سابرامانیان و همکاران (۲۰۰۹) و بالاکریشنان و سابرامانیان (۲۰۱٦) کاهش غلظت روی متصل به اکسیدهای آهن کریستالی در خاک را تحت‌تأثیر تلقیح قارچ مایکوریزا آربوسکولار گزارش کردند که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد (٤٤ و ٥) در حالی‌که بوستانی و همکاران (۲۰۱٦) عدم تغییر معنادار (٦) و غلامی (۲۰۱۱) افزایش غلظت روی را در این شکل بر اثر کاربرد قارچ مایکوریزا مشاهده کردند (۱۱). به‌نظر می‌رسد تفاوت در نتایج بدست آمده تحت‌تأثیر شرایط آزمایش از جمله نوع گیاه، رقم گیاه، مقدار ماده آلی خاک و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده باشد. مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارها نشان داد که در تیمار مرکب SM+N بیش‌ترین غلظت روی پیوسته به اکسیدهای آهن کریستالی به مقدار ۷/٦۰ میلی‌گرم در کیلوگرم حاصل شد د حالی‌که کم‌ترین غلظت روی در این شکل در تیمار مرکب GV+C به مقدار ٥/۳٦ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌دست آمد (جدول ۱۰).

جدول ۱۰- اثر کاربرد کود آلی و قارچ مایکوریزا بر غلظت روی (میلی‌گرم در کیلوگرم) در شکل پیوسته به اکسیدهای آهن کریستالی در یک خاک آهکی پس از کشت ذرت.

Table 10. Effect of organic manure and mycorrhiza fungi on the zinc concentration (mg kg^{-1}) in crystalline iron oxides form in a calcareous soil after corn cultivation.

	بدون ماده آلی *(C)	کود مرغی (PM)	کود گوسفندی (SM)	بیوچار کود مرغی (PMB)	بیوچار کود گوسفندی (SMB)	
بدون تلقیح (N)*	6.63 ^{bc}	6.86 ^{b}	7.60 ^{a}	6.36 $^{b-d}$	4.73 ^{f}	6.44 ^{A}
فونلیفورمیس‌موسه (FM)	5.72 ^{de}	6.68 ^{bc}	6.14 ^{cd}	6.84 ^{b}	5.13 ^{ef}	6.14 ^{B}
گلوموس ورسیفرم (GV)	5.36 ^{ef}	6.73 ^{bc}	6.08 ^{cd}	5.89 ^{de}	5.77 ^{de}	5.96 ^{B}
	5.91 ^{C}	6.76 ^{A}	6.61 ^{AB}	6.36 ^{B}	5.27 ^{D}	

* میانگین‌های دارای حروف لاتین بزرگ مشترک و کوچک مشترک در هر ستون یا سطر از نظر آماری در سطح احتمال ٥ درصد آزمون دانکن معنادار نیستند.

* Numbers followed by same letters in each column and rows are not significantly (P<0.05) different.

شکل باقی‌مانده روی: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی کاربرد کود آلی و همچنین برهمکنش کود آلی و تلقیح قارچی بر غلظت شکل باقی‌مانده روی در خاک در سطح احتمال یک درصد معنادار بود در حالی‌که اثر اصلی تلقیح قارچ مایکوریزا بر این شکل روی در خاک معنادار نبود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای آلی نشان داد که کاربرد تیمارهای PM، SMB و PMB تأثیر معناداری را بر غلظت روی در شکل باقی‌مانده در خاک نداشت در حالی‌که کاربرد تیمار SM سبب کاهش معنادار شکل باقی‌مانده روی نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۱۱). افزایش نیافتن مقدار روی باقی‌مانده بر اثر کاربرد تیمارهای PM، SMB و PMB نشان‌دهنده این است که مقداری از عنصر روی که از طریق این کودهای آلی به خاک افزوده شده، بیش‌تر در شکل‌هایی با پتانسیل قابلیت استفاده بیش‌تر در خاک تمرکز یافته است. همچنین تیمار SM علی‌رغم دارا بودن مقدار کم روی، از طریق کاهش در شکل باقی‌مانده روی و تبدیل روی به شکل‌های با قابلیت استفاده بیش‌تر، سبب توزیع مجدد روی در خاک شده است. سیمز و کلاین (۱۹۹۱) مشاهده کردند که سطوح مختلف کمپوست زباله شهری، سبب تغییر در توزیع روی از شکل باقی‌مانده به شکل‌های کربناتی و آلی شد (٤١). بوستانی و همکاران (۲۰۱۷) نیز با کاربرد ۲ درصد وزنی کاه و کلش گندم در کشت ذرت کاهش معنادار غلظت شکل باقی‌مانده روی را در یک خاک آهکی گزارش کردند (۷). مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارها نشان داد که بیش‌ترین غلظت روی در شکل باقی‌مانده در تیمار مرکب PMB+FM به مقدار ۲۸/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و کم‌ترین غلظت روی در این شکل در تیمار مرکب SM+N به مقدار ۲۳/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک مشاهده شد (جدول ۱۱).

جدول ۱۱- اثر کاربرد کود آلی و قارچ مایکوریزا بر غلظت روی (میلی‌گرم در کیلوگرم) در شکل باقی‌مانده در یک خاک آهکی پس از کشت ذرت.

Table 11. Effect of organic manure and mycorrhiza fungi on the zinc concentration (mg kg^{-1}) in residual form in a calcareous soil after corn cultivation.

	بدون ماده آلی *(C)	کود مرغی (PM)	کود گوسفندی (SM)	بیوچار کود مرغی (PMB)	بیوچار کود گوسفندی (SMB)	
بدون تلقیح (N)*	27.0 $^{a-d}$	25.1 $^{d-f}$	23.7 ^{f}	28.1 ^{ab}	27.3 $^{a-c}$	26.2 ^{A}
فونلیفورمیس‌موسه (FM)	27.8 ^{ab}	27.8 ^{ab}	25.4 $^{c-f}$	28.8 ^{a}	24.6 ^{ef}	26.9 ^{A}
گلوموس ورسیفرم (GV)	26.7 $^{b-e}$	26.6 $^{b-e}$	26.0 $^{b-e}$	26.1 $^{b-e}$	27.7 ^{ab}	26.6 ^{A}
	27.2 ^{AB}	26.5 ^{B}	25.1 ^{C}	27.7 ^{A}	26.5 ^{B}	

* میانگین‌های دارای حروف لاتین بزرگ مشترک و کوچک مشترک در هر ستون یا سطر از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن معنادار نیستند.

* Numbers followed by same letters in each column and rows are not significantly (P<0.05) different.

همبستگی شکل‌های شیمیایی روی در خاک: نتایج ضریب همبستگی پیرسون (r) بین شکل‌های شیمیایی روی در خاک پس از کشت ذرت تحت‌تأثیر کاربرد کود آلی و تلقیح قارچی نشان داد که بین شکل محلول و تبادلی روی با شکل‌های پیوسته به اکسیدهای منگنز و اکسیدهای آهن بی‌شکل همبستگی مثبت معنادار و با شکل باقی‌مانده روی همبستگی منفی معناداری وجود داشت (جدول ۱۲). همچنین

بین شکل کربناتی روی با شکل‌های پیوسته به اکسیدهای آهن بی‌شکل و کریستالی همبستگی مثبت معنادار و با شکل باقی‌مانده روی همبستگی منفی معناداری وجود داشت (جدول ۱۲). بین روی متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل نیز با روی متصل به اکسیدهای آهن کریستالی همبستگی مثبت و معناداری وجود داشت (جدول ۱۲). بنابراین با توجه به نتایج فوق می‌توان گفت که در آزمایش حاضر بین شکل‌های مختلف روی در خاک، رابطه‌ای پویا و تنگاتنگ وجود داشته و این شکل‌ها در خاک توانایی تبدیل‌شدن به یکدیگر را دارا هستند. همچنین نتایج ضریب همبستگی پیرسون (r) بین شکل‌های شیمیایی روی در خاک با روی قابل‌استفاده گیاه در خاک (عصاره‌گیری شده توسط DTPA) پس از کشت ذرت نشان داد که بین شکل‌های محلول و تبادلی، کربناتی، اکسیدهای آهن بی‌شکل و کریستالی روی در خاک با روی قابل‌استفاده خاک همبستگی مثبت و معناداری در سطح احتمال یک درصد وجود داشت (جدول ۱۳). بنابراین به‌نظر می‌رسد که مسئول اصلی تأمین عنصر روی برای جذب توسط گیاه در شرایط این آزمایش، این چهار شکل روی در خاک هستند. سپهوند و فرقانی (۲۰۱۱) گزارش کردند که برخی شکل‌های روی بین خود دارای همبستگی معناداری بودند که احتمالاً بیانگر وجود یک رابطه پویا بین آن شکل‌ها در خاک است. همچنین آنان همبستگی مثبت و معناداری بین شکل‌های روی متصل به اکسیدهای آهن کریستالی و بی‌شکل و مقدار روی عصاره‌گیری‌شده توسط DTPA مشاهده کردند. آنان بیان‌کردند که شاید این شکل‌های روی منبع بالقوه‌ای جهت تأمین روی مورد نیاز گیاه در خاک‌های آهکی استان لرستان باشند (۳۷). همچنین بوستانی و همکاران (۲۰۱٦) بیان کردند که شکل‌های محلول و تبادلی، کربناتی و اکسیدهای منگنز روی با روی قابل‌استفاده گیاه همبستگی مثبت و معناداری نشان دادند (٦).

جدول ۱۲- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین شکل‌های شیمیایی روی در خاک پس از کشت ذرت تحت‌تأثیر کاربرد قارچ مایکوریزا و کود آلی (تعداد ٤٥ نمونه).

Table 12. Person correlation coefficient (r) within Zn chemical forms in soil after corn cultivation as influenced by mycorrhizae fungi and organic manure application (N = 45).

	محلول و تبادلی WsEx	کربناتی Car	آلی OM	پیوسته به اکسیدهای منگنز MnOx	پیوسته به اکسیدهای شکل‌آهن بی AFeOx	پیوسته به اکسیدهای آهن کریستالی CFeOx	باقی‌مانده Res
محلول و تبادلی WsEx	1	0.20^{ns}	0.05^{ns}	0.46**	0.35*	0.17^{ns}	-0.30*
کربناتی Car		1	0.22^{ns}	-0.06^{ns}	0.44**	0.36*	-0.36*
آلی OM			1	0.18^{ns}	0.26^{ns}	0.04^{ns}	-0.14^{ns}
پیوسته به اکسیدهای منگنز MnOx				1	0.07^{ns}	-0.25^{ns}	-0.07^{ns}
پیوسته به اکسیدهای آهن بی‌شکل AFeOx					1	0.45**	-0.10^{ns}
پیوسته به اکسیدهای آهن کریستالی CFeOx						1	-0.52**
باقی‌مانده Res							1

**، * و ^{ns} به‌ترتیب معنادار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و غیرمعنادار.

**, * are significant at 1 and 5% probability level, respectively and ^{ns} not significant.

جدول ۱۳- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین شکل‌های شیمیایی روی و روی قابل‌استفاده (عصاره‌گیری‌شده توسط DTPA) در خاک پس از کشت ذرت تحت‌تأثیر کاربرد قارچ مایکوریزا و کود آلی (تعداد ٤٥ نمونه).

Table 13. Person correlation coefficient (r) between Zn chemical forms and Zn-DTPA in soil after corn cultivation as influenced by mycorrhizae fungi and organic manure application (N =45).

	محلول و تبادلی WsEx	کربناتی Car	آلی OM	اکسیدهای منگنز MnOx	اکسیدهای آهن بی‌شکل AFeOX	اکسیدهای آهن کریستالی CFeOx	باقی‌مانده Res
Zn-DTPA	0.41**	0.43**	-0.06^{ns}	- 0.02^{ns}	0.72**	0.41**	0.15^{ns}

**، * و ns به‌ترتیب معنادار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و غیرمعنادار.

**, * are significant at 1 and 5% probability level, respectively and ns not significant.

درصد نسبی شکل‌های شیمیایی روی در خاک:

محاسبه درصد نسبی شکل‌های شیمیایی روی تحت‌تأثیر اثرات اصلی کاربرد تیمارهای آلی و تلقیح قارچی نشان داد که بر اثر کاربرد تیمارهای آلی، افزایش درصد نسبی شکل‌های محلول و تبادلی، کربناتی و آلی روی نسبت به سایر شکل‌ها مشهودتر بود و به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای درصد نسبی شکل باقی‌مانده روی کاهش یافت (جدول ١٤). همچنین بر اثر اعمال تیمارهای تلقیح قارچی درصد نسبی شکل‌های محلول و تبادلی، آلی و اکسیدهای منگنز افزایش، و شکل‌های اکسیدهای آهن بی‌شکل و کریستالی کاهش پیدا کرد (جدول ١٥). بنابراین درصد نسبی شکل‌های شیمیای روی در خاک نشان می‌دهد که کاربرد تیمار تلقیح قارچی و کودهای آلی، هر دو سبب توزیع مجدد روی در خاک شده و روی در خاک به‌سمت شکل‌های با قابلیت استفاده بیش‌تر هدایت شده است. غلامی (٢٠١١) گزارش کرد که کاربرد قارچ مایکوریزا در خاک سبب افزایش درصد نسبی شکل‌های محلول و تبادلی، کربناتی، آلی و متصل به اکسیدهای آهن کریستالی روی و کاهش درصد نسبی شکل‌های متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل و باقی‌مانده روی شد (١١). همچنین بوستانی و همکاران (٢٠١٦) گزارش کردند که تلقیح قارچ مایکوریزا آربوسکولار سبب افزایش درصد نسبی شکل‌های محلول و تبادلی، کربناتی، اکسیدهای منگنز و آهن بی‌شکل و کاهش درصد نسبی شکل‌های اکسیدهای آهن کریستالی و باقی‌مانده روی شد (٦).

با توجه به محاسبه درصد نسبی شکل‌های شیمیایی روی، ترتیب شکل‌های شیمیایی روی در خاک شاهد به‌صورت باقی‌مانده >> اکسیدهای آهن کریستالی > اکسیدهای آهن بی‌شکل > کربناتی > اکسیدهای منگنز > آلی > محلول و تبادلی بود. درصد نسبی شکل‌های شیمیایی خاک نشان داد که بیش از ٦٠ درصد روی بومی خاک در شکل باقی‌مانده بود که برای گیاه قابل‌استفاده نیست. بنابراین به‌نظر می‌رسد در شرایط خاک‌های آهکی که اغلب مقدار روی کل مناسب است، استفاده از تیمارهای آلی و تلقیح قارچی که سبب افزایش درصد نسبی شکل‌هایی از روی که پتانسیل قابلیت استفاده بیش‌تر برای گیاه دارند، ضروری است. بوستانی و همکاران (٢٠١٦) نیز ترتیب درصد نسبی شکل‌های شیمیایی روی در یک خاک آهکی را به‌صورت باقی‌مانده >> اکسیدهای آهن کریستالی > اکسیدهای آهن بی‌شکل > اکسیدهای منگنز > کربناتی > آلی > محلول و تبادلی گزارش کردند (٦). در پژوهش حاضر بعد از شکل باقی‌مانده شکل‌های اکسیدی آهن شکل غالب روی را در خاک تشکیل می‌داد و کم‌ترین بخش روی در شکل محلول و تبادلی و آلی مشاهده شد. سپهوند و فرقانی (٢٠١١) بیان کردند که در خاک‌های آهکی استان لرستان بعد از شکل باقی‌مانده، شکل غالب روی، روی متصل به اکسیدهای آهن کریستالی و بی‌شکل بود که با پژوهش حاضر مطابقت دارد (٣٧). پری‌زنگنه و همکاران (٢٠٠٧) علت بالا بودن غلظت روی در شکل متصل

به اکسیدهای آهن را جذب ترجیحی این عنصر بر سطوح این اکسیدها دانستند (۲۹). علیدوست و همکاران (۲۰۱۲) بیان کردند که روی متصل به اکسیدهای آهن و منگنز یک منبع ثانویه تأمین‌کننده این عنصر برای گیاه است. همچنین بیان کردند که هر چه بافت خاک سنگین‌تر باشد، غلظت روی در شکل متصل به اکسیدهای آهن و منگنز بیش‌تر است (۲). بوستانی و همکاران (۲۰۱٦) نیز با مطالعه بر روی خاک‌های آهکی دریافتند که در بین شکل‌های شیمیایی روی کم‌ترین بخش مربوط به شکل آلی و محلول و تبادلی است که با پژوهش حاضر مطابقت دارد (٦). احتمالاً مقدار کم ماده آلی خاک، مقدار بالای کربنات کلسیم و pH خاک و همچنین احتمالاً تمایل کم روی برای جذب سطحی توسط سطوح رس‌ها در مقایسه با کربنات‌کلسیم در خاک سبب مقدار کم این دو شکل روی در خاک می‌باشد (۱۵).

جدول ۱٤- تغییرات درصد نسبی شکل‌های شیمیایی روی مربوط به میانگین اثرات اصلی تیمارهای آلی.

Table 14. Changes of relative percentage of Zn chemical forms related to main effects of organic treatments.

بدون ماده آلی C	کود مرغی PM	کود گوسفندی SM	بیوچار کود مرغی PMB	بیوچار کود گوسفندی SMB
		شکل محلول و تبادلی WsEx		
1.9	3.8	3.0	3.2	3.7
		شکل آلی OM		
2.6	2.5	3.4	3.4	3.0
		شکل کربناتی Car		
5	7.0	6.1	8.0	5.7
		متصل به اکسیدهای منگنز MnOx		
4.8	4.8	5.2	4.9	5.6
		متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل AFeOX		
8.1	8.9	8.6	8.4	8.5
		متصل به اکسیدهای آهن کریستالی CFeOx		
13.8	14.8	15.3	13.5	12.2
		شکل باقی‌مانده Res		
63.7	58.2	58.2	58.7	61.3

جدول ۱۵- تغییرات درصد نسبی شکل‌های شیمیایی روی مربوط به میانگین اثرات اصلی کاربرد قارچ مایکوریزا.

Table 15. Changes of relative percentage of Zn chemical forms related to main effects of mycorrhizae fungi application.

گلوموس ورسیفرم GV	*فونلیفورمیس‌موسه* FM	بدون تلقیح قارچ N
	شکل محلول و تبادلی WsEx	
3.6	2.9	2.7
	شکل آلی OM	
3.2	2.9	2.8
	شکل کربناتی Car	
5.8	6.4	6.9
	متصل به اکسیدهای منگنز MnOx	
5.2	5.0	5.0
	متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل AfeOx	
8.3	8.6	8.6
	متصل به اکسیدهای آهن کریستالی CfeOx	
13.5	13.8	14.6
	شکل باقی‌مانده Res	
60.2	60	59.3

نتیجه‌گیری کلی

به‌طورکلی کاربرد تیمارهای آلی مختلف در این پژوهش تأثیر متفاوتی را در افزایش غلظت هر یک از شکل‌های شیمیایی روی در خاک داشته و توالی مشابهی را نداشتند، با این‌حال تأثیر تیمار بیوچار کود مرغی (PMB) نسبت به دیگر تیمارها در افزایش غلظت اکثر شکل‌های شیمیایی روی نسبت به تیمار شاهد بیش‌تر بود. همچنین با کاربرد تیمارهای قارچی، غلظت شکل‌های محلول + تبادلی و آلی افزایش و بیش‌ترین افزایش مربوط به تیمار کاربرد قارچ GV بود و غلظت روی متصل به اکسیدهای آهن کریستالی و بی‌شکل به‌طور معناداری نسبت به تیمار شاهد کاهش نشان داد. غلظت شکل‌های باقی‌مانده، کربناتی و روی متصل به اکسیدهای منگنز، با کاربرد تیمارهای قارچی تغییری نیافت. نتایج برهمکنش تیمارهای آلی و تلقیح قارچی نشان داد که نوع کود آلی کاربردی

تأثیر مستقیم بر عملکرد قارچ مایکوریزا در تغییر غلظت شکل‌های محلول و تبادلی، کربناتی، باقی‌مانده، پیوسته به اکسیدهای آهن بی‌شکل و کریستالی روی در خاک داشت. توزیع شکل‌های شیمیایی روی در خاک شاهد به‌صورت زیر بود: باقی‌مانده >> اکسیدهای آهن کریستالی > اکسیدهای آهن بی‌شکل> کربناتی > اکسیدهای منگنز > آلی > محلول و تبادلی، در حالی‌که بر اثر کاربرد قارچ GV و تیمارهای آلی PM و SMB توزیع شکل‌های شیمیایی روی در خاک به‌صورت زیر تغییر یافت: باقی‌مانده >> اکسیدهای آهن کریستالی > اکسیدهای آهن بی‌شکل> کربناتی > اکسیدهای منگنز > محلول و تبادلی > آلی. بنابراین کاربرد تیمارهای آلی و تلقیح قارچی سبب توزیع مجدد روی در خاک و افزایش شکل‌هایی از روی که قابلیت استفاده و تحرک بیش‌تری برای گیاه دارند، شده است. بین شکل‌های محلول و تبادلی، کربناتی، اکسیدهای آهن بی‌شکل و کریستالی روی در خاک با روی قابل‌استفاده در خاک (عصاره‌گیری‌شده توسط DTPA) همبستگی مثبت و معناداری وجود داشت که نشان‌دهنده نقش مؤثر این چهار شکل شیمیایی در تأمین روی مورد نیاز گیاه می‌باشد. بررسی‌های بیش‌تر در ارتباط با تأثیر نوع گیاه کشت شده، گونه‌های دیگر قارچ و تلفیق آن با ریزجانداران دیگر و مکانیسم اثر آن‌ها، نوع و سطوح کودهای آلی دیگر و بیوچار حاصل از آن‌ها بر شکل‌های شیمیایی روی و دیگر عناصر کم‌مصرف در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری پیشنهاد می‌شود.

منابع

1.Abbasi, M.K., and Anwar, A.A. 2015. Ameliorating Effects of Biochar Derived from Poultry Manure and White Clover Residues on Soil Nutrient Status and Plant growth Promotion - Greenhouse Experiments. PLoS ONE. 10: 6. 1-18.

2.Alidoust, D., Suzuki, S., Matsumura, S., and Yoshida, M. 2012. Chemical speciation of heavy metals in the fractionated rhizosphere soils of sunflower cultivated on a humic Andosol. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 43: 17. 2314-2322.

3.Alloway, B.J. 2008. Zinc in soils and crop nutrition. 2nd ed. Belgium and Paris: IZA and IFA Brussels.

4.Almas, A., Sing, B.R., and Salbu, B. 1999. Mobility of cadmium-109 and zinc-65 in soil influenced by equilibration time, temperature and organic matter. J. Environ. Qual. 64: 955-962.

5.Balakrishnan, N., and Subramanian, K.S. 2016. Mycorrhizal (Rhizophagus Intraradices) Symbiosis and Fe and Zn Availability in Calcareous Soil. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 120: 17-25.

6.Boostani, H.R., Chorom, M., Moezzi, A., Karimian, N., Enayatizamir, N., and Zarei, M. 2016. Effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhizae fungi (AMF) application on distribution of zinc chemical forms in a calcareous soil with different levels of salinity. J. Soil Manage. Sust. 6: 1. 1-24. (In Persian)

7.Boostani, H.R., Chorom, M., Moezzi, A., Karimian, N., and Enayatizamir, N. 2017. Effect of Salinity and Organic Matter on Distribution of Zinc Chemical Forms in a Calcareous Soil after Maize Cultivation. Water and Soil Science. 27: 1. 1-10. (In Persian)

8.Broadley, M.R., White, P.J., Hammond, J.P., Zelko, I., and Lux, A. 2007. Zinc in plants. New Phytologist. 173: 677-702.

9.Clement, R., and Bernal, M.P. 2006. Fractionation of heavy metals and distribution of organic carbon in two contaminated soils amended with humic acids. Chemosphere. 64: 1264-1273.

10.Gee, G.W., and Bauder, J. W.1986. Particle size analysis, hydrometer method. P 404-408. In: A. Klute, A., G.S. Campbell, R.D. Jackson, M.M. Mortland and D.R. Nielsen, (Eds.), Methods of soil analysis. 2nd ed. Part 1.America Society of Agronomy, Madison. WI.

11. Gholami, L. 2011. Effects of mycorrhizal arbuscular symbiosis, zinc levels and organic matter on zinc chemical forms in a calcareous soil and responses of corn. Master Thesis, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shiraz University.
12. Helmke, P.H., and Spark, D.L. 1996. Potassium. P 551-574. In: Sparks, D.L., A.L. Page, P.A. Helmke, and R.H. Loeppert, (Eds.), Methods of soil analysis, part 3, Soil Science Society of America, Madison, WI.
13. Herencia, J.F., Ruiz, J.C., Melero, M.S., Villaverde, J., and Maqueda, C. 2008. Effects of organic and mineral fertilization on micronutrient availability in soil. Soil Sci. 173: 69-80.
14. Ippolito, J.A., Laird, D.A., and Busscher, W.J. 2012. Environmental benefits of biochar. J. Environ. Qual. 41: 967-972.
15. Kamali, S., Ronaghi, A., and Karimian, N. 2011. Soil Zinc Transformations as Affected by Applied Zinc and Organic Materials. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 42: 9. 1038-1049.
16. Kandeler, E., Marschner, P., Tscherko, D., Gahoonia, T.S., and Nielsen, N.E. 2002. Microbial community composition and functional diversity in the rhizosphere of maize. Plant Soil, 238: 301-312.
17. Kiekens, L. 1995. Zinc. In: Heavy Metals in Soils, Alloway BJ, editor. Chapman and Hall, London.
18. Kim, K.Y., Jordan, D., and McDonald, G.A. 1998. Effect of phosphate solubilizing bacteria and vesicular-arbuscular mycorrhizae on tomato growth and soil microbial activity. Biol. Fertil. Soil. 26: 79-87.
19. Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., and Crowley, D. 2011. Biochar effects on soil biota–a review. Soil Biol. Biochem. 43: 1812-1836.
20. Lehmann, J., and Joseph, S. 2009. Biochar for environmental management: an introduction. P 1-12. In: Lehmann J., Joseph S. (Eds.), Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Earthscan, London.
21. Lindsay, W.L., and Norvel, W.A. 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Sci. Soc. Am. J. 42: 421-428.
22. Loeppert, R.H., and Suarez. L. 1996. Carbonate and gypsum. P 437-474. In: Sparks, D.L., A.L. Page, P.A. Helmke and R.H. Loeppert, (Eds.), Methods of soil analysis, Part 3, Soil Science Society of America, Madison, WI.
23. Lu, A., Zhang, S., and Shan, X. 2005. Time effect on the fractionation of heavy metals. Geoderma. 125: 225-234.
24. Luo, Y.M., and Chiristie, P. 1998. Bioavailability of Copper and Zinc in soils treated with alkaline stabilized sewage sludge. J. Environ. Qual. 27: 335-342.
25. Martino, E., Perotto, S., Parsons, R., and Gadd, G.M. 2003. Solubilization of insoluble zinc compounds by ericoid mycorrhizal fungi derived from heavy metal polluted soils. Soil Biol. Biochem. 35: 133-141.
26. Melo, C.A., Coscionc, A.R., Aberu, C.A., Puga, A.P., and Camargo, O.A. 2013. Influence of pyrolysis temperature on cadmium and zinc sorption capacity of sugar cane straw derived biochar. BioResources. 8: 4. 4992-5004.
27. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. P 539-579. In: Page, A.L., R.H. Miller and D.R. Keeny, (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2, Soil Science Society of America, Madison, WI.
28. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., and Dean, L.A. 1954. Estimation of available phosphorous in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA. Cric. 939. U. S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
29. Parizanganeh, A., Lakhan, V.C., and Jalalian, H. 2007. A geochemical and statistical approach for assessing heavy metal pollution in sediments from southern Caspian coast. Inter. J. Env. Sci. Technol. 4: 351-358.
30. Preetha, P.S., and Stalin, P. 2014. Different Forms of Soil Zinc - their Relationship with Selected Soil Properties and Contribution towards Plant Availability and Uptake in Maize Growing Soils of Erode District, Tamil Nadu. Ind. J. Sci. Technol. 7: 7. 1018-1025.

31. Ramos, L., Hernandez, L.M., and Gonzaalez, M.J. 1994. Sequential fraction of Cu, Pb, Cd and Zn in soils from or near Donana national Park. J. Environ. Qual. 23: 50-57.
32. Rattan, R.K., and Sharma, P.D. 2004. Main micronutrients available and their method of use. Proceedings IFA International Symposium on Micronutrients, Pp: 1-10.
33. Rhoades, J.D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved salts. P 417-436. In: Sparks, D.L., A.L. Page, P.A. Helmke and R.H. Loeppert, (Eds.), methods of soil analysis, part 3, 3rd ed, Soil Science Society of America, Madison, WI.
34. Safari, M., Yasrebi, J., Karimian, N., and Xiao, S. 2009. Evaluation of three sequential extraction methods for fractionation of zinc in calcareous and acidic soils. Res. J. Biol. Sci. 4: 7. 848-857.
35. Saravanan, V.S., Subramoniam, S.R., and Ra, S.A. 2003. Assessing *in vitro* solubilization potential of different zinc solubilizing bacterial (zsb) isolates. Braz. J. Microbiol. 34: 121-125.
36. Sekhon, K.S., Singh, J.P., and Mehla, D.S. 2006. Long-term effect of organic/inorganic input on the distribution of zinc and copper in soil fractions under a rice-wheat cropping system. Arch. Agron. Soil Sci. 52: 551-556.
37. Sepahvand, H., and Forghani, A. 2011. Distribution of different forms of Iran and its correlation with soil characteristics in some province of calcareous soils. J. Soil Water. 25: 15. 1128-1137.
38. Shahbazi, K., and Besharati, H. 2013. Short investigation of soil fertility status of Iran. J. Land Manage. 1: 1-15.
39. Shuman, L.M. 1991. Chemical Forms of Micronutrients in Soils. Micronutrients in Agriculture, Mortvedt JJ, editor. Soil. Sci. Soc. Am. J. Madison, WI.
40. Shuman, L.M. 1988. Fractionation method for soil microelements. Soil Sci. 140: 11-22.
41. Sims, J.T., and Kline, J.S. 1991. Chemical fractionation and plant uptake of heavy metals in soils amended with Co-compost sewage sludge. J. Environ. Qual. 20: 387-395.
42. Singh, J.P., Karwarsa, S.P.S., and Singh, M. 1988. Distribution and forms of copper, iron, manganese and zinc in calcareous soils of India. Soil Sci. 146: 359-366.
43. Sposito, G., Lund, L.J., and Chang, A.C. 1982. Trace metal chemistry in arid zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cd and Pb solid phases. Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 260-264.
44. Subramanian, K.S., Tensia, V., Jayalakshmi, K., and Ramachandran, V. 2009. Biochemical changes and zinc fractions in arbascular mycorrhizal fungus (*Glomus intraradices*) inoculated and inoculated soils under differential zinc fertilization. Appl. Soil Ecol. 49: 32-39.
45. Sun, Y., Gao, B., Yao, Y., Fang, J., Zhang, M., Zhao, Y., Chen, H., and Yang, L. 2014. Effect of feedstock type, production method and pyrolysis temperature on biochar and hydrobiochar properties. J. Chem. Eng. 240: 574-578.
46. Sumner, M., Miller, w., Sparks, D., Page, A., Helmke, P., Loeppert, R., Soltanpour, P., Tabatabai, M., and Johnston, C. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. Methods of soil analysis. Part 3-chemical methods. Pp: 1201-1229.
47. Tagwira, F., Riho, M., and Mugwira, L. 1992. Effect of pH and phosphorous and organic matter on zinc availability and distribution in two Zimbabwean soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 23: 1485-1491.
48. Thomas, G.W. 1996. Soil and Soil acidity. P 475-490. In: Sparks, D.L., A.L. Page, P.A. Helmke and R.H. Loeppert, (Eds.), methods of soil analysis. Part 3. 3rd Ed., Am. Soc. Agron., Madison, WI.
49. Usman, A.R.A., Kuzyakov, Y., and Stahr, K. 2004. Dynamics of organic C mineralization and the mobile fraction of heavy metals in a calcareous soil incubated with organic wastes. Water Air Soil Pollut. 158: 401-418.
50. Wamberg, C., Christensen, S.I., Jakobsen, A.K., Muller, I., and Sorensen, S.J. 2003. The mycorrhizal fungus (*Glomus intraradices*) affects microbial activity in the rhizosphere of pea plants (*Pisum sativum*). Soil Biol. Biochem. 35: 1349-1357.
51. Yang, X., Liu, J., McGrouther, K., Hung, H., Lu, K., Gao, X., He, L., Lin, X., Che, L., Ye, Z., and Wang, H. 2016. Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil. Environ. Sci. Pollut. Res. 22: 5. 3183-3190.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 24(5), 2018
http://jwsc.gau.ac.ir

Effect of organic manures, their biochars and arbuscular mycorrhizae fungi on distribution of zinc chemical fractions in a calcareous soil

***H.R. Boostani**
Assistant Prof., Dept. of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources of Darab, University of Shiraz
Received: 04/09/2017; Accepted: 12/30/2017

Abstract
Background and Objectives: Zinc (Zn) is an essential micronutrient that the higher plants require it for normal growth and quality and quantity development. High soil pH, low amount of soil organic matter and high calcium carbonate content are the most important factors that led to a decrease of Zn bioavailability in soil. The aim of this research was to investigate the effects of arbuscular mycorrhizae fungi inoculation and application of two types of organic manures and their derived biochars on distribution of Zn chemical forms in a calcareous soil after corn cultivation using a sequential extraction procedure.
Materials and Methods: To do this research, appropriate amount of soil from the surface layer (0-30 cm) of a calcareous soil was collected, air dried and passed through 2 mm sieve. A factorial experiment as a completely randomized design was performed with three replications under greenhouse conditions. The first factor including organic manure at five levels (without organic manure (C), sheep manure (SM), poultry manure (PM), sheep manure biochar (SMB) and poultry manure biochar (PMB) each at 2% w/w) and the second factor was fungal inoculation at three levels (non-inoculation (NG), inoculation with *Funneliformis mosseae* (FM) and *Glomus versiform* (GV)). Biochars were produced using the pyrolysis of organic manures (500 ^{o}C during 4 h) in the limited oxygen conditions. After applying treatments to the soil, corn seeds (*Zea mays* L.) were planted in plastic pots and held for 10 weeks. Sequential extraction procedure of sing et al. was used to determine the zinc chemical forms in the soil after corn cultivation. This procedure separate the soil Zn into 7 different fractions including: soluble+exchangeable (WsEx-Zn), carbonatic (Car-Zn), Organic (OM-Zn), Manganese oxide (MnOx-Zn), Amorphous iron oxides (AFeOx-Zn), Crystalline iron oxides (CFeOx-Zn) and Residual (Res-Zn).
Results: The concentration of WsEx and OM fractions of Zn were significantly increased and Zn concentration in AFeOx and CFeOx forms were significantly decreased compared to control by application of fungi treatments. The greatest increase of Zn concentration in WsEx (31.9%) and OM (12.9%) forms were observed in the GV treatment. The sequence of effect of various organic treatments application on enhancement of Zn concentration in each chemical forms were different however, the effect of PMB treatment on increasing the concentration of most Zn chemical forms (Car-Zn (81.1%), OM-Zn (42%), MnOx-Zn (15%) and AFeOx-Zn (14.1%)) was more than the other organic treatments. Distribution of native Zn chemical fractions were as follows: Res >> CFeOx > AFeOx > Car > MnOx > OM > WsEx whereas the distribution of Zn chemical fractions as influenced by application of GV, PM and SMB treatments were changes in this way: Res >> CFeOx > AFeOx > Car > MnOx > WsEx > OM. There were positive and significant correlations between WsEx-Zn, Car-Zn, AFeOx-Zn and CFeOx-Zn fractions with DTPA extractable Zn, which is indicating the effective role of these fractions in the supply of required Zn plant. The results of interaction effects of treatments showed that the effect of simultaneous application of fungi and organic manure on the concentration of each Zn chemical fractions was different and depended on type of organic manure and mycorrhizae fungi applied.
Conclusions: Application of both species of arbuscular mycorrhizae fungi caused the conversion of Zn from less available forms to fractions with more bioavailability in the soil and the effect of the GV species was considerably more than the FM species. Also, Zn added to the soil as affected by application of organic manures, concentrated in fractions with more bioavailability and the effect of the PMB treatment was more obvious than the other treatments.

Keywords: *Glomus versiform*, *Funneliformis mosseae*, Poultry manure biochar, Sequential extraction

* Corresponding Author; Email: hr.boostani@shirazu.ac.ir