

مقاله پژوهشی

تأثیر باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه در برهمکنش با بیوجار و کمپوست بقایای هرس بر زیست‌فراهمی برخی عنصرهای غذایی کم مصرف در ریزوسفر گیاه گندم (*Triticum aestivum* L.)

رقیه واحدی^{۱*}، میرحسن رسولی صدقیانی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۷

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: r.vahedi@urmia.ac.ir

چکیده

در شرایط خشک و نیمه خشک ایران اکثر خاک‌ها آهکی دارای ماده آلی کم بوده و میزان عنصرهای غذایی کم مصرف قابل جذب، کم هستند. این پژوهش با هدف بررسی زیست‌فراهمی برخی عنصرهای کم مصرف تحت تأثیر بیوجار و کمپوست بقایای هرس درختان در حضور باکتری‌های PGPR در ریزوسفر گندم در شرایط رایزوباکس انجام گردید. فاکتورهای مورد بررسی شامل منابع آلی (بیوجار، کمپوست و شاهد)، تلقیح میکروبی (تلقیح باکتری PGPR و بدون تلقیح) در خاک ریزوسفر بودند. در پایان دوره رشد، ماده آلی و غلظت آهن، روی، مس و منگنز در خاک ریزوسفری و جذب این عناصر در گیاه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که میزان ماده آلی و عنصرهای غذایی کم مصرف در خاک ریزوسفر تحت تأثیر منابع آلی و باکتری‌های PGPR افزایش معناداری داشتند. افزودن بیوجار در شرایط تلقیح منجر به افزایش ۸۴/۶ و ۱۷/۹ درصدی به ترتیب در غلظت آهن و منگنز نسبت به شرایط بدون تلقیح در خاک ریزوسفر شد. حضور PGPRها سبب افزایش زیست‌فراهمی ۵۲/۲ و ۳۴/۹ درصدی به ترتیب در روی و مس در تیمار کمپوست در مقایسه با تیمار بدون تلقیح گردید. کاربرد منابع آلی و تلقیح باکتریایی سبب افزایش جذب عنصرهای غذایی کم مصرف توسط گیاه گندم شد.

واژه‌های کلیدی: باکتری، پیرولیز، عنصرهای غذایی کم مصرف، رایزوباکس، مواد آلی.

The Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) on Interaction with Biochar and Compost of Trees Pruning on Bioavailability of Some Micronutrients in the Wheat Rhizosphere (*Triticum aestivum* L.)

R Vahedi^{1*}, MH Rasouli Sadaghiani²

Received: February 12, 2020

Accepted: February 25, 2021

1-PhD Student, Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

2-Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

*Corresponding Author, E-mail: r.vahedi@urmia.ac.ir

Abstract

In arid and semiarid regions of Iran, most of soils are calcareous and low in organic matter, therefore are deficient in micronutrients. This research was aimed to evaluate the bioavailability of selected micronutrients as affected by biochar and compost of trees pruning in the presence of PGPR in wheat rhizosphere. In a rhizobox study, an experiment carried out in a completely randomized design under greenhouse conditions. The factors including the organic sources (pruning waste biochar, pruning waste compost and control), microbial inoculation (with and without PGPR). At the end of the growth period, organic matter (OM) content and bioavailability of micronutrients including iron (Fe), zinc (Zn), copper (Cu) and manganese (Mn) in the rhizosphere soil and their uptake by wheat plant were determined. The results indicated that OM, Fe, Zn, Mn and Cu were significantly increased in rhizosphere soil under the influence of organic sources and PGPR inoculation. Addition of biochar under inoculation conditions resulted in 84.6% and 17.9% increase in rhizosphere Fe and Mn, respectively, compared to the non-inoculated treatment. The presence of PGPR increased the bioavailability of Zn and Cu by 52.2% and 34.9%, respectively, in compost treatment compared to the non-inoculated ones. Application of organic sources and bacterial inoculation increased the micronutrient uptake by plant.

Keyword: Bacteria, Micronutrient elements, Organic materials, Pyrolysis, Rhizobox.

مقدمه

تنظیم تولید اتیلن (از طریق تولید آنزیم ACC دامیناز) در ریشه‌ها، رشد گیاه را افزایش می‌دهد (گارسیا-فریل و همکاران ۲۰۱۵). اما در روش غیرمستقیم این باکتری‌ها از طریق سرکوب پاتوژن‌های گیاهی در میان گستره‌ای از مکانیسم‌های موجود چون رقابت بر سر سوبسترای کربن‌دار، نگهداری عنصرهای غذایی کم‌مصرف به‌ویژه Fe^{3+} در سیدروفورها که آن را از دسترس پاتوژن‌ها دور نگه دارد، تولید مواد آنتی‌بیوتیک و القای مقاومت سیستماتیک در گیاه (فرانسیس و همکاران ۲۰۱۰) که مکانیسم‌های اصلی برای کنترل بیولوژیکی توسط سودوموناس‌ها هستند (چین-ای- ونگ و همکاران ۲۰۰۳)، رشد گیاه را افزایش می‌دهند. در بین باکتری‌ها، فقط باکتری‌های هوازی و نیمه‌هوازی اختیاری توانایی

باکتری‌های آزادزی ریزوسفر را که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم باعث بهبود رشد و سلامت گیاه می‌شوند، باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه یا PGPR^۱ می‌نامند (سارفران و همکاران ۲۰۱۹). در روش مستقیم این باکتری‌ها از طریق مکانیسم‌های مختلفی مانند تولید متابولیت‌های مؤثر در رشد گیاه همانند هورمون‌های گیاهی (اکسین، سیتوکنین، جیبرلین)، افزایش حلالیت ترکیبات نامحلول و کم‌محلول عنصرهای غذایی و افزایش زیست‌فراهمی آن‌ها از طریق تولید اسیدهای آلی و معدنی، تولید آنزیم‌ها، تولید سیدروفور و افزایش زیست‌فراهمی عنصرهای غذایی کم‌مصرف و

پتانسیل باکتری‌های PGPR، کاربرد اصلاحگرهای آلی همانند بیوچار و کمپوست حاصل از بقایای هرس درختان سیب وانگور در خاک می‌باشد. بیوچار ماده جامد غنی از کربن که طی فرآیند پیرولیز یا گرماکافت توده زیستی در شرایط عدم حضور و یا حضور جزئی اکسیژن تولید می‌شود (لمان و جوزف ۲۰۱۵). کمپوست یک فرآورده حاصل از انجام فرآیندهای شیمیایی در ضایعات آلی است حاوی مقادیر فراوانی عناصر معدنی است که بخشی از آن‌ها به تدریج و پیوسته در خاک آزاد و در دسترس گیاه قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین این عناصر فسفر، پتاسیم، نیتروژن، منیزیم و گوگرد و همچنین عنصرهای غذایی کم‌مصرف می‌باشد (واحدی و همکاران ۲۰۱۹). تأثیرات بیوچار در مقایسه با کمپوست در خاک بسیار ضد و نقیض است. بیوچار دارای پتانسیل افزایش زیست‌فراهمی عنصرهای غذایی برای گیاهان می‌باشد. درحالی‌که مکانیسم‌های این افزایش هنوز به عنوان یک حدس و گمان است (سوهی و همکاران ۲۰۱۰). بیوچار می‌تواند به‌طور مستقیم و یا غیرمستقیم با تأثیر بر خصوصیات خاک بر زیست‌فراهمی عنصرهای غذایی همانند غذایی کم‌مصرف در خاک و به تبع آن‌ها بر رشد و عملکرد گیاهان تأثیرگذار باشد (اولزیک و همکاران ۲۰۲۰). همچنین تشکیل گروه‌های عاملی و محل‌های جذب در سطح بیوچار نیز ظرفیت خاک را در ایجاد کمپلکس با یون‌های فلزی و جذب آن‌ها افزایش می‌دهد (اوپیمیا و همکاران ۲۰۱۱). سورنتی و همکاران (۲۰۱۶) کردند برخی از واکنش‌های اکسایش-کاهش آهن می‌توانند به عنوان یک مخزن ذخیره عنصرهای در غذایی کم‌مصرف سطح بیوچار عمل کنند. این مکانیسم به احتمال زیاد در اتصال آهن خاک (از طریق واکنش گروه-های عاملی بر سطح آن) به شکل غیرقابل دسترس گیاه موثر باشد که باعث تحریک بروز نشانه‌های کلروز آهن در کیوی‌های رشد یافته در خاک اصلاح شده با بیوچار شده است. در حالی‌که افزایش مقدار آهن در گیاه لوبیا (اینال و همکاران ۲۰۱۵) و روی در برخی گیاهان مانند

تولید سیدروفور را دارند و در مورد گیاهان، فقط در گونه‌های گرامینه (گراس‌ها) گزارش شده است که شامل گونه‌های کشاورزی مهم مانند گندم، جو و برنج می‌باشند (وارما و همکاران ۲۰۰۷). سودوموناس از مهم‌ترین باکتری‌های ریزوسفیری و فیلوسفیری هستند که به دلیل توانایی بالای آن‌ها در رقابت با سایر میکروارگانیسم‌ها برای عنصرهای غذایی و سازگاری سریع با شرایط محیطی مختلف در بیشتر محیط‌ها مشاهده می‌شوند (وایاس و گلاتی ۲۰۰۹). علاوه بر این موارد، مزایای تلقیح گیاه با باکتری‌های ریزوسفیری محرک رشد شامل توان کلونیزه شدن، برقراری ارتباط با گیاهان، افزایش شاخص‌هایی مانند زیست توده‌ی محصول، رشد ریشه، سرعت جوانه‌زنی، میزان تولید در واحد عملکرد، وزن شاخساره و ریشه، سطح برگ، محتوای کلروفیل، فعالیت میکروبی می‌باشد (مادوننی و همکاران ۲۰۰۴). در حالت طبیعی معمولاً جمعیت PGPRها در ریزوسفر پایین بوده، چنان‌که نمی‌توانند به‌طور قابل توجهی باعث افزایش رشد و عملکرد گیاهان شوند. بنابراین تلقیح بذر گیاهان با جمعیت‌های بالای PGPRها می‌تواند تعداد این باکتری‌ها را در ریزوسفر به حد مطلوب رسانده و در نتیجه منجر به بروز اثرات مفید آن‌ها در خاک گردد (کاکماکی و همکاران ۲۰۰۷). یکی از این اثرات، افزایش کربن آلی خاک است (فیگیرویو و همکاران ۲۰۱۱). با توجه به اینکه خاک-های مناطق خشک و نیمه خشک ایران آهکی می‌باشد و آهک منجر به کاهش ذخیره کربن و در نتیجه کمبود عنصرهای غذایی می‌شود. بنابراین بسیاری از گیاهان زراعی در این خاک‌ها با کمبود عناصر غذایی به‌ویژه عنصرهای غذایی کم‌مصرف مواجه هستند. کمبود عنصرهای غذایی کم‌مصرف به ویژه آهن، روی، مس و منگنز یکی از مشکلات عمده‌ی بخش کشاورزی در سرتاسر جهان است که اغلب در خاک‌های آهکی رخ می‌دهد و این خاک‌ها بیش از ۳۰ درصد سطح زمین را پوشانده است (نادیم و همکاران ۲۰۱۷). از راهکارهای افزایش مقدار قابل جذب این عناصر در کنار استفاده از

محیطی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است که بدلیل داشتن تنوع و فعالیت میکروبی از خاک غیرریزوسفری متمایز می‌شود. عرضه مواد آلی در حال تجزیه به جامعه میکروبی وابسته به ریشه همراه با تغییرات میکروبی ایجاد شده در الگوهای ریشه‌بندی و عرضه عنصرهای غذایی فراهم برای گیاه که از فعالیت میکروبی منشا می‌گیرد، تأثیرگذار بوده و نتیجه اصلی تشکیل و ایفای نقش ریزوسفر می‌باشد. با استفاده از سیستم رایزوباکس، می‌توان به راحتی رشد و گسترش ریشه را به منطقه کوچکی محدود کرده و بدین ترتیب حجم زیادی از ریشه را در یک ناحیه کوچک متمرکز کرد و با نمونه‌برداری از آن ناحیه کوچک، می‌توان آن را معادل خاک ریزوسفری در نظر گرفت. علی‌رغم، پژوهش‌های فراوان صورت گرفته پیرامون تأثیر مواد آلی بر زیست‌فراهمی عنصرهای غذایی کم‌مصرف، تاکنون درک کاملی از اثرات متقابل بین ریشه، ماده آلی و نیز تأثیرات متقابل آن‌ها با تلقیح میکروبی و تأثیرات آن‌ها بر زیست‌فراهمی عنصرهای غذایی پرمصرف در خاک‌های آهکی به دلیل وجود روابط پیچیده بین این ترکیبات در شرایط رایزوباکس حاصل نشده است. لذا هدف از این تحقیق تأثیر کاربرد کمپوست و بیوچار بقایای هرس درختان سیب و انگور بر زیست‌فراهمی برخی عنصرهای غذایی کم‌مصرف در حضور باکتری‌های PGPR در شرایط رایزوباکس می‌باشد.

کردن از غربال ۲ میلی‌متری عبور داده شد. سپس در دستگاه اتوکلاو و با دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس و فشار ۱/۵ اتمسفر به مدت ۲ ساعت استریل شدند. قبل از استریل کردن خاک، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی به روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند (اسپارکس ۱۹۹۶) (جدول ۱). بقایای هرس درختان سیب و انگور از باغ‌های شهرستان ارومیه جمع‌آوری و به قطعات ۲۰ میلی‌متری خرد شد. پس از خشک شدن، ابتدا به راکتور (استوانه فلزی به قطر هفت و ارتفاع ۳۱ سانتی‌متر) و سپس به کوره الکتریکی برای تولید بیوچار منتقل گردید.

کلم بروکلی و اسفناج تحت تأثیر بیوچار گزارش شده است (گارتلر و همکاران ۲۰۱۳). بیوچار تهیه شده از جلبک‌های حاصل از فاضلاب‌های صنعتی غلظت منگنز در ریشه‌های تربچه را افزایش داد که نشان می‌دهد که می‌توان از بیوچارهای با غلظت‌های بالای مواد مغذی برای عرضه عنصر غذایی ضروری گیاهان که برای سلامت انسان مفید هستند، استفاده کرد (روبرتز و همکاران ۲۰۱۵). در ارتباط با کمپوست نیز گزارش شده که خاک‌های اصلاح شده با کمپوست، بسته به میزان کاربرد آن سبب افزایش عنصرهای غذایی کم‌مصرف در خاک و به تبع آن افزایش قابلیت استفاده این عناصر در گیاه شده است (وارمان و همکاران ۲۰۰۴). خاک‌های غنی شده با مواد آلی مانند کمپوست یا بیوچار به علت جذب و غیر فعال کردن مواد مهار کننده رشد، افزایش مواد مغذی، تغییر سطوح قابلیت فراهمی عنصرهای غذایی، حفاظت فیزیکی مستقیم باکتری‌های PGPR از تغذیه شکارچیان در منافذ بیوچار و یا تغییر فرآیندهای علامت‌دهی بین گیاه و میکروب با تغییر دینامیک ریزجانداران همراه می‌باشند که این تغییرات در روابط گیاه و ریزجانداران مؤثر است (واحدی و رسولی صدقیانی ۲۰۱۸). در کنار تأثیر مواد آلی و PGPRها در زیست‌فراهمی عنصرهای غذایی کم‌مصرف باید به نقش تأثیر ریزوسفر نیز توجه کرد. جریان‌ات کریب در ایفای نقش منطقه ریزوسفر بسیار اهمیت دارد. ریزوسفر

مواد و روش‌ها

این آزمایش بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی که فاکتورها شامل منابع آلی (کمپوست بقایای هرس درختان سیب و انگور، بیوچار بقایای هرس درختان سیب و انگور و شاهد بدون ماده‌آلی)، تلقیح میکروبی (تلقیح باکتری‌های PGPR و شاهد بدون تلقیح میکروبی) در خاک ریزوسفر با ۴ تکرار بود. برای انتخاب نمونه خاک و آماده‌سازی بستر کشت، نمونه‌های خاک غیر زراعی از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری شهرستان سلماس واقع در آذربایجان غربی تهیه شد و بعد از هوا خشک

بذرها هم‌زمان با کاشت استفاده شد. پس از افزودن مایه‌های تلقیح، برای کشت گیاه، بذرهای گندم (*Triticum aestivum* L) رقم پیش‌تاز پس از ضدعفونی با هیپوکلریت سدیم ۰/۵ درصد به تعداد شش بذر در قسمت ریزوسفیری رایزوباکس‌ها کشت گردیدند. پس از جوانه زدن بذرها، ۴ بوته (بوته‌های سالم‌تر و قوی‌تر) نگه‌داشته شدند. در طول دوره کشت از آب مقطر به منظور آبیاری و جهت تامین مواد غذایی مورد نیاز برای تغذیه گیاهان از محلول غذایی Rorison استفاده شد. در پایان پس از ۶۵ روز رایزوباکس‌ها باز شدند. بخش هوایی و ریشه گیاه پس از شستشو با آب مقطر، به مدت ۴۸ ساعت در آون و در دمای ۶۵ درجه سلسیوس خشک شدند. سپس، نمونه‌های گیاه برای تعیین عنصرهای غذایی کم‌مصرف آسیاب شدند و آهن، روی، مس و منگنز در شاخساره و ریشه گیاه به روش هضم خشک توسط دستگاه جذب اتمی مدل Shimadzu-AA330 اندازه‌گیری شد. خاک‌های ناحیه ریزوسفیری هر تیمار خشک شدند و به آزمایشگاه جهت اندازه‌گیری ماده آلی (اسپارکس ۱۹۹۶) و عنصرهای غذایی کم‌مصرف قابل جذب (لیندزی و همکاران ۱۹۷۸) منتقل شدند. تجزیه و تحلیل آماری شامل تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد با نرم افزار MSTATC و رسم نمودارها با نرم افزار Excel انجام گردید.

تولید در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس با نرخ دمایی ۱۷ درجه سلسیوس در دقیقه به مدت ۴ ساعت انجام گردید. همچنین کمپوست بقایای هرس از گلخانه تحقیقاتی گروه علوم خاک دانشگاه ارومیه تهیه گردید. در نهایت بیوچار و کمپوست مورد استفاده، آسیاب و از الک نیم‌میلیمتری عبور داده شد. سپس برخی ویژگی‌های آن‌ها اندازه‌گیری شد (راجویچ و همکاران ۲۰۱۱) (جدول ۲). به منظور کشت گیاه از رایزوباکس استفاده شد. باکس‌های ریزوسفر در ابعاد ۲۰×۱۵×۲۰ سانتی‌متر (طول، عرض، ارتفاع) استفاده شد. فضای هر باکس با استفاده از صفحات مشبک نایلونی ۴۴ میکرون به دو قسمت: (۱) ناحیه ریزوسفیری به ضخامت دو سانتی‌متر، (۲) ناحیه غیرریزوسفیری به ضخامت ۵/۸ سانتی‌متر (این ناحیه در طرف دیگر ناحیه ریزوسفیری نیز با همان ضخامت تکرار شد) تقسیم شد. برای انجام آزمون‌های گلخانه‌ای، بیوچار و کمپوست بقایای هرس برحسب ۱/۵ درصد کربن آلی خالص به خاک (۵/۸۰ کیلوگرم خاک برای هر باکس) اضافه و به باکس‌ها منتقل گردید. برای تلقیح میکروبی از سویه‌های میکروبی موجود در بانک میکروبی گروه علوم خاک دانشگاه ارومیه که شامل سودوموناس‌های گروه فلورسنت (ترکیبی از گونه‌های *P. P. aeruginosa*، *P. putida* و *fluorescens*) بودند، استفاده گردید. برای تلقیح بذرها از روش اضافه کردن محلول باکتری‌ها (یک میلی لیتر از سوسپانسیون برای هر بذر) به خاک اطراف

جدول ۱- نتایج برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بستر کشت مورد استفاده.

بافت خاک	pH	EC	ماده آلی	کربنات کلسیم	نیترون کل	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	آهن قابل جذب	روی قابل جذب	مس قابل جذب	منگنز قابل جذب
		(dS m ⁻¹)	(%)								
			(mg kg ⁻¹)								
شن لومی	۵۳/۷	۰/۴۷	۰/۲۵	۱۴/۲۵	۰/۰۸	۷/۶۴	۹۸	۱/۴۴	۰/۶۲	۰/۲۶	۷/۳۱

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های بیوچار و کمپوست حاصل از بقایای هرس درختان سیب و انگور.

خصوصیات مورد مطالعه	بیوچار بقایای هرس سیب و انگور	کمپوست بقایای هرس سیب و انگور
pH	۷/۲۹	۷/۰۵
EC (dS m ⁻¹)	۰/۰۸	۱۷/۸۷
کربن (C) (%)	۶۷/۵۳	۳۰/۰۲
هیدروژن (H) (%)	۳/۹۶	-
H/C	۱۷/۰۵	-
نیترژن کل (N) (%)	۰/۵۴	۳/۷۲
C/N	۱۸۶/۷۹	۷/۹۲
آهن (mg kg ⁻¹)	۳۰۳/۴۵	۱۳۳۷/۸
روی (mg kg ⁻¹)	۴۰/۸۸	۱۵۰
مس (mg kg ⁻¹)	۴۵/۰۳	۵۶/۹۴
منگنز (mg kg ⁻¹)	۹۸/۸۰	۳۹۴/۲۰

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف منابع آلی و تلقیح میکروبی بر درصد ماده آلی و زیست فراهمی عنصرهای غذایی کم‌مصرف در خاک ریزوسفر در جدول ۳ ارائه شده است. اثر اصلی این تیمارها بر

پارامترهای ذکر شده در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنا-دار بود. اثرات متقابل منابع آلی × تلقیح میکروبی نیز بر ماده آلی در سطح احتمال ۰/۱ درصد، آهن، روی و منگنز قابل جذب در سطح احتمال ۱ درصد و مس قابل جذب در سطح احتمال ۵ درصد در خاک ریزوسفر معنادار بودند.

جدول ۳- تجزیه واریانس منابع آلی و تلقیح میکروبی بر ماده آلی و عنصرهای غذایی کم‌مصرف قابل جذب در خاک ریزوسفر.

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		ماده آلی	آهن	روی	مس
منابع آلی	۲	۱۳/۸۸۳***	۷/۰۵۹***	۱۲/۲۱۰***	۰/۶۲***
تلقیح میکروبی	۱	۱/۱۸۸***	۵/۳۷۷***	۳/۳۶۸***	۰/۰۹۸***
منابع آلی × تلقیح میکروبی	۲	۰/۱۲۸***	۰/۸۶۲**	۰/۷۳۱**	۰/۰۰۲*
خطا	۱۸	۰/۰۱۹	۰/۱۶۴	۰/۰۶۱	۰/۰۰۲
ضریب تغییرات (%)	-	۷/۱۳	۱۶/۲۱	۱۱/۸۳	۹/۶۲

*** و ** و * به ترتیب معنادار در سطح احتمال ۰/۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۵

ماده آلی

مقایسه میانگین اثر متقابل منابع آلی و تلقیح باکتری‌های PGPR بر ماده آلی نشان‌دهنده افزایش درصد ماده آلی در خاک ریزوسفر تیمارهای تلقیح شده

در مقایسه با تیمارهای بدون تلقیح است (جدول ۴). به-طوریکه بیش‌ترین افزایش در بین تیمارهای آلی در کمپوست بقایا بود که ۱/۲۳ برابر نسبت به تیمار بدون تلقیح بود. در تیمارهای بیوچار نیز تفاوت معناداری بین سطوح تلقیح میکروبی در میزان ماده آلی مشاهده شد.

علاوه بر کمپوست، قطر منافذ ۲-۸۰ میکرومتر در بسیاری از بیوچارهای مشتق شده از چوب مشاهده شده است، این محدوده اندازه منافذ می‌تواند فعالیت‌های ریزجانداران را پشتیبانی کند (هممر و همکاران ۲۰۱۴). بنابراین ایجاد چنین خلل و فرج در بیوچار قابل دسترس برای باکتری‌ها باعث افزایش فعالیت‌های آن‌ها در تعامل با بیوچار می‌شود. سرعت ورود مواد آلی در ریزوسفر بیشتر از غیرریزوسفر است و دلیل آن سلول‌های ریزان ریشه می‌باشد، علاوه بر این ترشحات ریشه‌ای مانند ترکیبات فنولی در ریزوسفر به عنوان محرک رشد میکروبی در خاک ریزوسفر بوده و زمانی که تجزیه می‌شوند سبب افزایش کربن آلی و عنصرهای غذایی در خاک می‌شوند. باکتری‌های PGPR محرک رشد به عنوان ذرات آلی بسیار فعال در خاک به شمار می‌روند که دارای سطحی فعال و باردار و نیز توانایی تولید و ترشح بسیاری از ترکیبات آلی، کربوهیدرات‌ها و آنزیم‌ها را داراست (هوانگ و همکاران ۲۰۰۲).

ولی این افزایش در تیمار تلقیح بیوچار در مقایسه با تیمار بدون تلقیح کمپوست کمتر بود. به نظر می‌رسد که بخش کربن فعال موجود در کمپوست پس از افزوده شدن به خاک تجزیه گردیده و همچنین بخشی از کربن موجود در این کود به ذخایر کربن در خاک پیوسته و باعث افزایش سطح کربن آلی خاک شده است. به دلیل کربن بالای بیوچار مصرفی (جدول ۲) عکس این مطلب قابل انتظار بود. دلیل این امر را می‌توان به اسکلت کربنی پایدار بیوچار نسبت داد که نسبت به تجزیه مقاوم بود هرچند که باعث افزایش سطح ماده آلی خاک گردیده است. افزایش ماده آلی در نتیجه کاربرد کودهای آلی به دلیل تأمین بستر مناسب برای باکتری‌ها است که فعالیت آن‌ها را تحریک می‌کند و باعث افزایش فعالیت آن‌ها در خاک ریزوسفر شده است. گزارش شده که زمانی که کمپوست به عنوان ماده آلی به خاک اضافه شد ریزجانداران قسمتی از کربن آلی را صرف افزایش فراهمی مواد غذایی و بخش دیگر کربن آلی باقیمانده همراه با ریزجانداران ساختمان خاک را بهبود داد (جوردن و همکاران ۲۰۰۰).

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های ماده آلی و عنصرهای غذایی کم‌مصرف قابل جذب در خاک ریزوسفر برای اثر متقابل منابع آلی

و تلقیح میکروبی.

منگنز	مس	روی	آهن	ماده آلی	
	(mg kg ⁻¹)			(%)	
۱۰/۸۲a	۰/۵۵a	۱/۶۵c	۴/۱۹a	۱/۸۹c	بیوچار
۹/۲۷b	۰/۵۸a	۴/۲۳a	۳/۵۲b	۳/۷۳a	کمپوست
۷/۳۰d	۰/۳۸b	۱/۵۰c	۱/۹۵d	۰/۸۹e	شاهد
۹/۱۸b	۰/۴۲b	۱/۳۶c	۲/۲۷c	۱/۴۸d	بیوچار
۸/۳۴c	۰/۴۳b	۲/۷۸b	۲/۶۳c	۳/۰۲b	کمپوست
۶/۴۳e	۰/۳۹c	۰/۹۸d	۱/۴۱e	۰/۶۷f	شاهد

با افزودن بیوچار به خاک در حضور باکتری‌های PGPR به ترتیب ۸۴/۵۸ و ۱۷/۸۶ درصد افزایش در زیست-فراهمی آهن و منگنز قابل جذب در خاک مشاهده شد (جدول ۴). هرچند، اختلاف آماری معناداری بین تیمارهای بیوچار و کمپوست در زیست‌فراهمی آهن قابل

زیست‌فراهمی عنصرهای غذایی کم‌مصرف قابل

جذب در خاک ریزوسفر

نتایج نشان داد که برهمکنش مواد آلی با تلقیح باکتریایی افزایش زیست‌فراهمی عنصرهای غذایی کم-مصرف در مقایسه با شرایط بدون تلقیح شد. به‌طوری‌که

جذب در شرایط بدون تلقیح مشاهده نشد. درحالیکه هر دو تیمار نسبت به تیمار شاهد در هر دو سطح تلقیح میکروبی افزایش نشان دادند. روند افزایشی ۵۲/۱۵ و ۳۴/۸۸ درصدی به ترتیب در میزان زیست‌فراهمی روی و مس قابل جذب در خاک ریزوسفر تیمار تلقیح باکتریایی کمپوست در مقایسه با تیمار بدون تلقیح مشاهده شد. هرچند اختلاف معناداری در میزان مس قابل جذب در بین تیمارهای میکروبی بیوچار و کمپوست مشاهده نشد. ون هرویجن (۲۰۰۷) گزارش کردند که تغییر در قابلیت استفاده عنصرهای غذایی کم‌مصرف در خاک تحت تأثیر ویژگی‌های مواد آلی و خاک می‌باشد که با تجزیه مواد آلی، عنصرهای غذایی موجود در آن آزاد می‌شود که مطابق با پژوهش حاضر است. میزان عنصرهای غذایی کم‌مصرف در کمپوست مصرفی (جدول ۲) بالا بود. انتظار بر این بود که پس از افزودن کمپوست به خاک سبب افزایش زیست‌فراهمی این عناصر گردد. هر چند این روند افزایشی در روی و مس قابل جذب در خاک و البته در شرایط تلقیح میکروبی مشاهده گردید ولی در سایر عناصر چنین نبود که نشان‌دهنده رفتار متفاوت مواد آلی در زیست‌فراهمی عناصر می‌باشد که سبب شده بیوچار و کمپوست رفتارهای متفاوتی بر زیست‌فراهمی عناصر داشته باشند. مطابق تحقیق حاضر در تحقیق انجام شده توسط نجفی قیری (۲۰۱۵) نیز کاربرد بیوچار ضایعات پنبه و کنجد سبب افزایش معنا- دار آهن قابل جذب خاک شد. مقدار عناصر موجود در بیوچار بستگی به دمای تولید آن داشته و افزایش دمای پیرولیز منجر به حذف گروه‌های عاملی اسیده شده و باعث می‌شود بیوچار تولیدی بیشتر بازی شود. ایپولیتو و همکاران (۲۰۱۲) پیشنهاد کردند که پیرولیز با دمای پایین منجر به تولید بیوچار با pH کم می‌شود که می‌تواند کیفیت زیست محیطی را توسط کاهش هدر رفت عنصرهای غذایی به ویژه کم‌مصرف در خاک‌های آهکی

بهبود بخشد. بنابراین و با کاهش دمای تولید به ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار عنصرهای غذایی کم‌مصرف در بیوچار افزایش می‌یابد؛ لذا تأثیر بیشتری بر زیست-فراهمی این عناصر در خاک و بهبود وضعیت حاصلخیزی عنصرهای غذایی کم‌مصرف دارد. خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران به دلیل پایین بودن میزان ماده آلی، آهن زیست‌فراهم کمتری در خاک برای استفاده گیاه وجود داشته، لذا افزودن مواد آلی در برهمکنش با تلقیح میکروبی به خاک سبب بهبود فراهمی عنصرهای غذایی کم‌مصرف از جمله آهن خواهد گردید. مشاهده شده است که تشکیل گروه‌های عاملی و محل-های جذب در سطح بیوچار ظرفیت خاک را در ایجاد کمپلکس با یون‌های فلزی و جذب آن‌ها را افزایش می‌دهد (بیچیمیا و همکاران ۲۰۱۱). تمایل بیوچار برای جذب به- ترتیب $Fe > Cu > Zn > Mn$ بود (سورنتی و همکاران ۲۰۱۶). بیوچار تهیه شده از چوب می‌تواند فعالیت‌های میکروبی در خاک را با فراهمی کردن زیستگاه، رطوبت، کربن، منابع لبایل و عنصرهای غذایی برای ریزجانداران افزایش دهد. ساختار متخلخل بیوچار، سطوح ویژه بالا و توانایی آن برای جذب مواد آلی محلول، گازها و مواد معدنی محل مناسبی را برای سکونت ریزجانداران، رشد و تکثیر آن‌ها فراهم می‌آورد. تولید سیدروفور در PGPR های مختلف از جمله سودوموناس‌ها به اثبات رسیده است (یانگ و همکاران ۲۰۱۱) و نشان داده شده که سیدروفور تولید شده توسط باکتری سودوموناس پوتیدا حلالیت آهن، روی و مس را افزایش داده است. علاوه بر سیدروفور، فیتوسیدروفورها نیز موجب افزایش زیست‌فراهمی عنصرهای غذایی کم‌مصرف در خاک ریزوسفر می‌شوند. هینسینگر و همکاران (۲۰۰۳) نشان دادند که عنصرهای غذایی کم‌مصرف کاتیونی از طریق ایجاد کلات با فیتوسیدروفورها و اسیدهای آلی

آزاد شده از ریشه و ریزجانداران در محلول خاک افزایش می‌یابند. برخی گزارشات افزایش و برخی کاهش قابلیت جذب عنصرهای غذایی کم‌مصرف مانند روی را در خاک گزارش کرده‌اند. در این تحقیق نیز هر چند بیوچار سبب افزایش میزان روی در خاک ریزوسفر شده ولی این افزایش در مقایسه با کمپوست کمتر بود. احتمالاً دلایلی مانند کاهش زیست‌فراهمی روی در خاک در اثر کاربرد بیوچار می‌تواند ناشی از رشد بیشتر گیاه و در نتیجه جذب بیشتر روی از خاک باشد. اثر رقت، جذب یون‌های فلزی بر روی سطح ذرات بیوچار و غیرمترک شدن آن‌ها نیز می‌تواند موجب کاهش روی قابل جذب خاک شود. بیوچار می‌تواند یون‌های مانند روی یا مس را در سطح خود جذب کرده و در نتیجه زیست‌فراهمی آن‌ها را کاهش دهد (بیسیلی و مارمیرولی ۲۰۱۱). مندز و همکاران (۲۰۱۲) با افزودن بیوچار لجن فاضلاب به یک خاک مدیترانه‌ای (شنی) نشان دادند که قابلیت جذب روی و مس در نتیجه کاربرد بیوچار نسبت به لجن فاضلاب کاهش معناداری نشان داد که همسو با نتایج تحقیق حاضر بود. براساس نتایج به‌دست آمده در جدول ۴، تیمار کمپوست تلقیح باکتریایی بیشترین تأثیر را در مقدار روی و مس زیست‌فراهم خاک ریزوسفر داشت. تغییر و تبدیل مواد آلی توسط ریزجانداران منجر به افزایش فعالیت ریشه شده و ترشح سیدروفور در نتیجه فعالیت میکروبی و نیز فیتروسیدورفورهای مترشحه از ریشه گیاهان گرامینه در فراهمی روی تأثیر زیادی دارد. توانایی فوق‌العاده‌ی ریزجانداران در افزایش زیست‌فراهمی روی در ریزوسفر گیاهان گزارش شده است (سابرامانیان و همکاران ۲۰۰۹). زیست‌فراهمی مس بر خلاف سایر عنصرهای غذایی کم‌مصرف در شرایط بدون تلقیح در تیمارهای بیوچار و کمپوست اختلاف

معناداری با تیمار شاهد باکتریایی نشان نداده است. احتمالاً پایداری کربن در این تیمارها به ویژه در بیوچار سبب این کاهش شده است. زیرا مواد آلی با مس کمپلکس‌های آلی پایدار نامحلول ایجاد کرده و مقدار مس قابل جذب را کاهش می‌دهد. تائو و همکاران (۲۰۰۴) کاهش مس در ریزوسفر گیاه گندم در خاک آهکی را به تشکیل کمپلکس مس با مواد آلی نسبت دادند. همچنین آن‌ها نشان دادند که تغییرات شکل‌های شیمیایی مس در ریزوسفر با حضور ریزجانداران بیشتر است. افزایش منگنز قابل استخراج با DTPA با افزون بیوچار در خاک گزارش شده است (ایپپولیتو و همکاران ۲۰۱۵). همچنین علت افزایش میزان منگنز قابل جذب در خاک به بیوچار تهیه شده در دمای کمتر نسبت داده شده است. نواک و همکاران (۲۰۰۹) نیز بیان کردند که منگنز می‌تواند به طور انتخابی در مکان‌های تبدالی بیوچار پوست گردو جذب شود. آن‌ها نشان دادند که بیوچار سبب افزایش میزان منگنز در خاک شد.

بطور کلی نتایج نشان داد که برهمکنش باکتری-های PGPR و مواد آلی سبب افزایش زیست‌فراهمی عنصرهای غذایی کم‌مصرف شد. مواد آلی کربن مورد نیاز این باکتری‌ها را فراهم کرده در نتیجه این ریزجانداران با استفاده از استراتژی‌هایی منجر به افزایش سطح ریشه و کاهش فاصله انتشار شده در نهایت، افزایش زیست‌فراهمی عناصر غیرمترک می‌شود. مکانیسم‌های مختلفی اعم از نقش ریزجانداران (سیدروفور) و برخی ترشحات ریشه‌ای گیاهان گرامینه مانند گندم (فیتوسیدروفور) در ریزوسفر و نیز تبادلات شیمیایی خاک و سایر عوامل در خاک و گیاه مسئول افزایش یا کاهش نگهداری عناصر غذایی در خاک می‌باشد.

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر منابع آلی و تلقیح میکروبی بر مقدار عنصرهای غذایی کم مصرف.

میانگین مربعات								درجه آزادی	منبع تغییر
منگنز ریشه	منگنز شاخساره	مس ریشه	مس شاخساره	روی ریشه	روی شاخساره	آهن ریشه	آهن شاخساره		
۱/۸۰***	۰/۴۲۴***	۰/۰۰۵***	۰/۰۰۴***	۰/۰۳۱***	۰/۰۰۵***	۲/۵۵۲***	۰/۳۴۷***	۲	منابع آلی
۱/۶۵۴***	۰/۳۷۸***	۰/۰۰۳***	۰/۰۰۴***	۰/۰۱۷***	۰/۰۰۲***	۲/۴۶۴***	۰/۵۴۳***	۱	تلقیح میکروبی
۰/۳۵۳**	۰/۰۲۵**	۰/۰۰۰۱***	۰/۰۰۰۱**	۰/۰۰۱***	۰/۰۰۰۱***	۰/۳۱۲***	۰/۰۹۳***	۲	منابع آلی × تلقیح میکروبی
۰/۰۶۰	۰/۰۱۳	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۲۵	۰/۰۰۳	۱۸	خطا
۳۳/۵۴	۲۵/۸۴	۱۱/۵۹	۱۹/۹۹	۱۵/۴۷	۳۲/۹۳	۱۸/۷۴	۱۵/۷۲		ضریب تغییرات (%)

*** و **، به ترتیب معنادار در سطح احتمال ۱٪ و ۰/۱٪

عنصرهای غذایی کم مصرف جذب شده در گیاه گندم

طبق جدول ۵ تجزیه واریانس تأثیر متقابل منابع آلی و تلقیح میکروبی بر میزان آهن، روی، مس و منگنز در ریشه و شاخساره گیاه گندم است. همچنین اثر متقابل منابع آلی × تلقیح میکروبی بر میزان عناصر آهن، روی در شاخساره و ریشه و مس ریشه در سطح احتمال ۰/۱ درصد و مس شاخساره و منگنز (ریشه و شاخساره) در سطح احتمال ۱ درصد معنادار بودند.

مقدار آهن بخش هوایی و ریشه گیاه با به کار بردن مواد آلی در خاک به ویژه کمپوست در حضور PGPR افزایش نشان داد (شکل ۱-الف). بیشترین میزان جذب روی بخش هوایی گیاه از تیمار بیوچار در شرایط تلقیح باکتریایی حاصل شد که ۱/۵۰ برابر بیشتر از تیمار بیوچار بدون تلقیح بود (شکل ۱-ب). همچنین برهمکنش مواد آلی با PGPRها تأثیر معناداری نسبت به شرایط شاهد در هر دو سطح تلقیح بر مقدار این عنصر در ریشه گیاه داشت. هرچند بیشترین مقدار روی از

مصرف کمپوست در حضور تلقیح باکتریایی در مقایسه با سایر تیمارها بدست آمد (شکل ۱-ب). در رابطه با مس نیز تیمار کمپوست تلقیح باکتریایی ۱/۷۵ و ۱/۴۲ برابر جذب آن را به ترتیب در بخش هوایی و ریشه نسبت به تیمارهای بدون تلقیح افزایش داد (شکل ۱-ج). در شرایط تلقیح میکروبی اختلاف آماری معناداری بین بیوچار و کمپوست در جذب مس در شاخساره مشاهده نشد. اثر برهمکنش تلقیح میکروبی و منابع آلی منجر به افزایش مقدار منگنز گیاه در بخش هوایی و ریشه شد. به طوریکه این افزایش در تلقیح باکتریایی در حضور بیوچار نسبت به شرایط بدون تلقیح و نیز سایر تیمارها در هر دو سطح تلقیح مشاهده شد (شکل ۱-د). نتایج بدست آمده نشان داد که بالاترین میزان منگنز در ریشه و شاخساره در تیمار بیوچار مشاهده گردید. تیمارهای بیوچار و کمپوست اختلاف معناداری در جذب منگنز در شرایط بدون تلقیح در ریشه و شاخساره نشان ندادند.

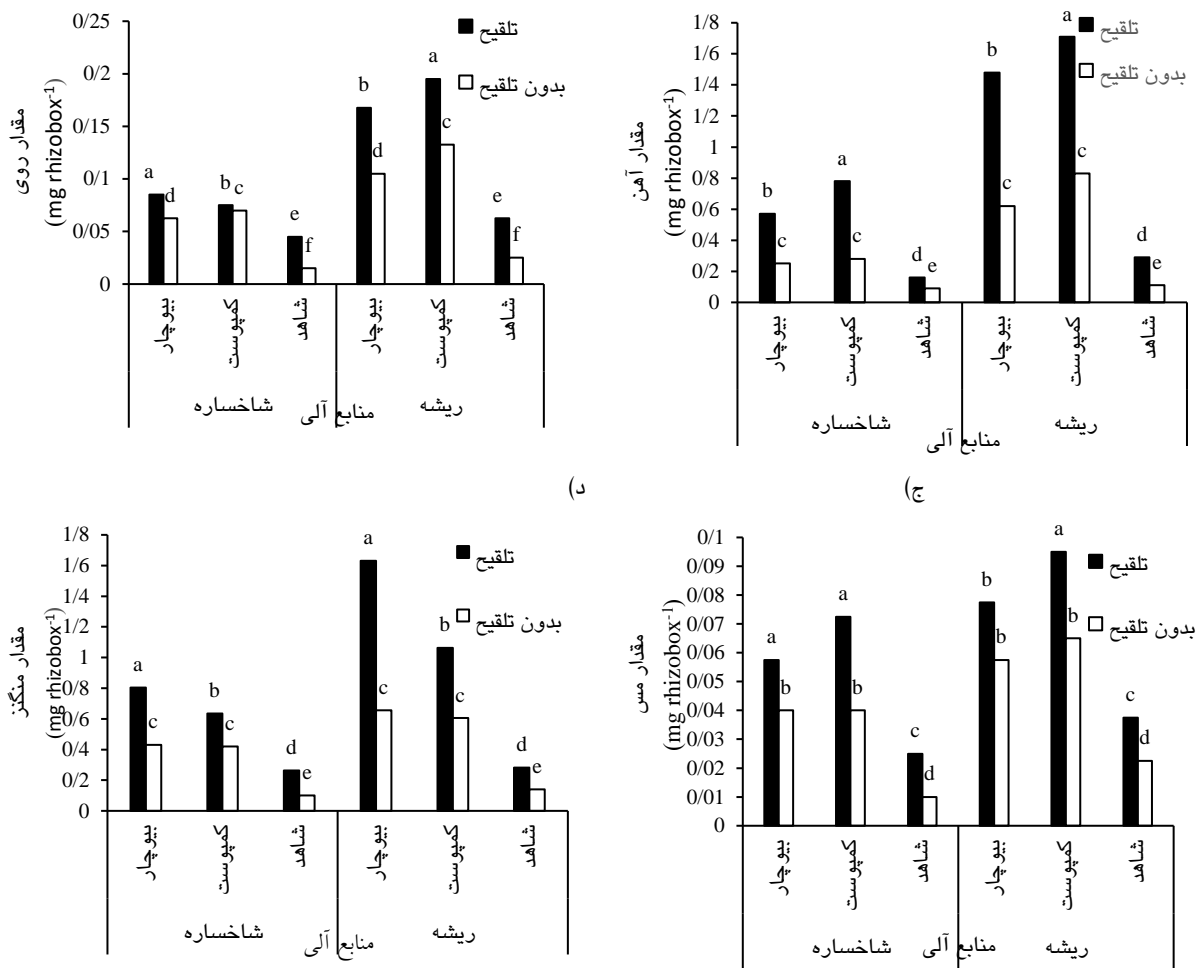
به طور کلی جذب فلزات بافت گیاه وابسته به غلظت آن‌ها در محلول خاک است. بنابراین انتظار بر این است

که در پی افزایش میزان عنصرهای غذایی کم‌مصرف قابل جذب خاک، جذب این عناصر در ریشه و شاخساره گندم نیز افزایش یابد یا با کاهش غلظت عناصر در خاک جذب بیشتری توسط گیاه انجام گرفته باشد (منگل و کیرکبای ۲۰۰۱). که همسو با نتایج حاصله از این پژوهش می‌باشد (شکل ۱). بنابراین علت کاهش میزان آهن قابل جذب در خاک ریزوسفر تیمار کمپوست جذب بیشتر این عنصر توسط گیاه از ریزوسفر بوده است. کاسترو و همکاران (۲۰۰۹) افزایش میزان آهن و مس را در کاهوی کشت شده در کمپوست زباله شهری گزارش کردند آن‌ها علت این افزایش را محتوای بالای غلظت این عناصر در کمپوست مصرفی (جدول ۲) بیان کردند که همسو با نتایج این تحقیق می‌باشد (شکل ۱- الف و ج). تیمارهای حاوی باکتری و بیوچار میزان آهن در ریشه و شاخساره از تیمارهای بدون تلقیح و بدون بیوچار بیشتر شد ولی در مقایسه با کمپوست این افزایش کمتر بود. دلیل این افزایش، بهبود شرایط فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک ریزوسفر است. برای مثال افزایش جذب آب، تهویه و زیست فراهمی مواد غذایی و همین طور افزایش فعالیت ریزجانداران در حضور کمپوست و بیوچار و ترشحات گیاهی و تأثیر سینرژیک آن‌ها در افزایش فراهمی عناصر غذایی برای گیاه و ریزجانداران اشاره کرد. حضور مواد مغذی گیاهی و خاکستر در بیوچار، سطح ویژه بالا و طبیعت متخلخل و ظرفیت ایجاد محیطی برای ریزجانداران به عنوان دلایل اصلی افزایش خصوصیات خاک و جذب عنصرهای غذایی توسط گیاه در خاک‌های تحت تیمار بیوچار می‌باشد (نیگوسی و همکاران ۲۰۱۲). باکتری‌های سودوموناس نیز دارای ویژگی‌های محرک رشد گیاه هستند و می‌توانند رشد گیاه را از طریق مکانیسم‌های مختلفی چون تولید سیدروفور، تولید

(الف)

هورمون‌های گیاهی و سایر عوامل محرک رشد بهبود بخشند که این نیز عامل دیگری است که می‌تواند در جهت جذب عنصرهای غذایی توسط گیاه مؤثر واقع شود. نتایج حاضر با گزارش‌های پترن و گلیک (۲۰۰۰) همخوانی دارد. اینال و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که کاربرد بیوچار در خاک سبب افزایش مقدار روی در گیاه لوبیا و ذرت شد. نتایج نشان داد افزودن بیوچار و کمپوست در حضور PGPR ها سبب افزایش جذب مس در شاخساره گیاه شد، هرچند در ریشه این افزایش را تیمار کمپوست به خود اختصاص داد. در خاک (جدول ۴) نیز جذب این عنصر غذایی در هر دو تیمار مواد آلی یکسان بود. افزودن مواد آلی در تلقیح با باکتری‌ها سبب افزایش جذب مس در گیاه شده که می‌توان به غلظت مس تحت تأثیر این تیمارها اشاره کرده که سبب شده جذب مس توسط گیاه افزایش یابد. در واقع افزودن مواد آلی به خاک، ظرفیت جذب مس بر کلوئیدهای خاک را کاهش داده و قابلیت استفاده و جذب آن توسط گیاه را از طریق تشکیل کمپلکس‌های آلی - فلز، به ویژه در خاک‌های آهکی افزایش می‌دهد. ایپولیتو و همکاران (۲۰۱۲) ثابت کردند که بیوچار می‌تواند مس را بر روی سطح یا رسوب کانی- های کربنات مس یا اکسید مس در داخل ماتریکس بیوچار جذب کند. در ارتباط با منگنز در تیمار تلقیح شده گیاه نیز می‌توان چنین بیان کرد که غلظت فلزات بافت گیاه تابعی از غلظت آن‌ها در محلول خاک است (جدول ۴). اینال و همکاران (۲۰۱۵) بیان کردند که افزودن بیوچار سبب افزایش میزان آهن، روی، منگنز و مس در گیاه لوبیا شده است در حالیکه در گیاه ذرت تنها میزان آهن، روی و منگنز افزایش یافت. آن‌ها بیان کردند که این اختلاف به نوع گیاه، مواد مترشحه از ریشه و مولکول‌های حل کننده عناصر بستگی داشته باشد.

(ب)



شکل ۱- مقایسه میانگین‌های مقدار عنصرهای غذایی کم‌مصرف در ریشه و شاخساره گیاه برای اثر متقابل منابع آلی و تلقیح میکروبی.

نتیجه‌گیری کلی

مواد آلی در حضور باکتری‌ها در ریزوسفر و فرآیندهای بیوژئوشیمیایی ریزوسفر سبب می‌شود که فعالیت‌های میکروبی در خاک بهبود یافته و ریشه گیاه به آسانی نیاز خود به عنصرهای غذایی را از این منطقه جذب کند و منجر به افزایش زیست‌فراهمی عنصرهای غذایی کم-مصرف در خاک و به تبع آن در گیاه گردد. به‌طور کلی، با توجه به رفتارهای متفاوت مواد آلی در خاک و تأثیر آن‌ها در افزایش زیست‌فراهمی عناصر در خاک و گیاه توصیه می‌شود که پژوهش‌های بیش تری در رابطه با بیوپچار تهیه شده از بقایای مختلف کشاورزی در شرایط مزرعه در خاک‌های آهکی انجام گیرد.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که کاربرد بیوپچار چه همراه با تلقیح میکروبی و چه بصورت جداگانه سبب افزایش ماده آلی خاک و افزایش زیست-فراهمی عنصرهای غذایی کم‌مصرف در خاک آهکی می-شود. هرچند این افزایش در حضور باکتری‌ها PGPR تأثیر چشمگیری داشت. تجزیه تدریجی مواد آلی در برهمکنش با باکتری‌های PGPR منجر به معدنی شدن مواد آلی شده و سبب افزایش زیست‌فراهمی عنصرهای غذایی کم‌مصرف در خاک ریزوسفر می‌شود. افزودن

منابع مورد استفاده

- Beesley L and Marmiroli M, 2011. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. *Environmental Pollution* 159:474-480.
- Cakmakci R, Donmez MF and Erdogan U, 2007. The effect of plant growth promoting rhizobacteria on barley seedling growth, nutrient uptake, some soil properties, and bacterial counts. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 31:189-199.
- Castro E, Manas P and De Las Heras J, 2009. A comparison of the application of different waste products to a lettuce crop: Effects on plant and soil properties. *Scientia Horticulturae* 123: 148-155.
- Chin-A-Woeng TFC, Bloemberg GV and Lugtenberg BJ, 2003. Phenazines and their role in biocontrol by *Pseudomonas* bacteria. *New Phytologist* 157:503–523.
- Enders A, Hanley K, Whitman T, Joseph S and Lehmann J, 2012. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology* 114: 644–653.
- Figueiredo MVB, Seldin L, Araujo FF and Mariano RLR, 2011. Plant growth promoting rhizobacteria: Fundamentals and applications. Pp. 21–42. In: Maheshwari DK (ed.), *Plant Growth and Health Promoting Bacteria*. Berlin, Springer- Verlag.
- Francis I, Holsters M and Vereecke D, 2010. The grampositive side of plant-microbe interaction. *Environmental Microbiology* 12: 1–12.
- García-Fraile P, Menéndez E and Rivas R, 2015. Role of bacterial biofertilizers in agriculture and forestry. *AIMS Bioengineering* 2: 183–205.
- Gartler J, Robinson B, Burton K and Clucas L, 2013. Carbonaceous soil amendments to biofortify crop plants with zinc. *Science of the Total Environment* 465: 308–313.
- Hammer EC, Balogh-Brunstad Z, Jakobsen I, Olsson PA, Stipp SLS and Rillig MC, 2014. A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces. *Soil Biology and Biochemistry* 77: 252–260.
- Hinsinger P, Plassard C, Tang C and Jaillard B, 2003. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. *Plant and Soil* 248: 43-59.
- Huang QY, Chen WL and Guo XJ, 2002. Sequential fractionation of Cu, Zn and Cd in soils in the absence and presence of rhizobia. p.1453, In: *Proceedings of WCSS*, August 14-21, Thailand.
- Inal A, Gunes A, Sahin O, Taskin MB and Kaya EC, 2015. Impacts of biochar and processed poultry manure, applied to a calcareous soil, on the growth of bean and maize. *Soil Use and Management* 31: 106–113
- Ippolito JA, Novak JM, Busscher WJ, Ahmedna M, Rehrh D and Watts DW, 2012. Switchgrass biochar affects two Aridisols. *Environmental Quality* 41: 1123–1130.
- Ippolito JA, Spokas KA, Novak JM, Lentz RD and Cantrell KB, 2015. Biochar elemental composition and factors influencing nutrient retention. Pp. 138–164. In: Lehmann J and Joseph S, (eds.). *Biochar for Environmental Management*, 2nd Ed. Routledge, Earthscan.
- Jordan NR, Zhang J and Huerd S, 2000. Arbuscular-mycorrhizal fungi: potential roles in weed management. *Weed Research* 40: 397-410.
- Lehmann J and Joseph S, 2015. Biochar for environmental management: an introduction. Pp. 1–13. In: Lehmann J and Joseph S (eds.), *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Routledge, New York.
- Lindsay WL and Norvell WA, 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42: 421-428.
- Maddoni GA, Ruiz RA, Vilariño P and García de Salamone IE, 2004. Fertilización en los cultivos para grano. Pp. 499-557. In: Satorre EH, Benech Arnold R, Slafer G, de la Fuente E, Miralles D, Otegui M and Savin R (eds). *Producción de Granos, Bases Funcionales Para su Manejo*. Editorial FAUBA, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires.
- Méndez A, Gómez A, Paz-Ferreiro J and Gascó G, 2012. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. *Chemosphere* 89(11): 1354-1359.
- Mengel K and Kirkby E, 2001. *Principles of Plant Nutrition*. 5th Ed., International Potash Institute, Bern, Switzerland.
- Nadeem SM, Imran M, Naveed M, Khan MY, Ahmad M, Zahird ZA and Crowleyb DE, 2017. Synergistic use of biochar, compost and plant growth-promoting rhizobacteria for enhancing cucumber growth under water deficit Conditions. *Science of Food and Agriculture* 97 (15): 5139-5145.

- Najafi Giri M, 2015. Effect of different biochars application on some soil properties and nutrients availability in a calcareous soil. Iranian Journal of Soil Research 29(3): 352-358. (In Persian with English abstract).
- Nigussie A, Kissi E, Misganaw M and Ambaw G, 2012. Effect of biochar application on soil properties and nutrient uptake of lettuces (*Lactuca sativa*) grown in chromium polluted soils. American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental 12 (3): 369-376.
- Novak JM, Lima IM, Xing B, Gaskin JW, Steiner C, Das KC, Ahmedna M, Rehrh D, Watts DW, Busscher WJ and Schomberg H, 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. Annals of Environmental Science 3: 195-206.
- Olszyk DM, Shiroyama T, Novak JM, Cantrell KB, Sigua G, Watts DW and Johnson MG, 2020. Biochar affects essential nutrients of carrot taproots and lettuce leaves. Hortscience 1-11.
- Patten CL and Glick BR, 2002. Role of *Pseudomonas putida* indole acetic acid in development of the host plant root system. Applied Environmental Microbiology 68(8): 3795-3801.
- Rajkovich S, Enders A, Hanley K, Hyland C, Zimmerman AR and Lehmann J, 2011. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. Biology and Fertility of Soils 48(3): 271-284.
- Roberts DA, Paul NA, Cole AJ and de Nys R, 2015. From waste water treatment to land management: conversion of aquatic biomass to biochar for soil amelioration and the fortification of crops with essential trace elements. Journal of Environmental Management 157:60-68.
- Sarfraz R, Hussain A, Sabir A, Ben Fekih I, Ditta A and Xing S, 2019. Role of biochar and plant growth promoting rhizobacteria to enhance soil carbon sequestration—a review. Environmental Monitoring Assessment 191:251.
- Sohi SP, Krull E, Lopez-Capel E and Bol R, 2010. A review of biochar and its use and function in soil. Advances in Agronomy 105: 47-82.
- Sorrenti G, Masiello CA and Toselli M, 2016. Biochar interferes with kiwifruit Fe-nutrition in calcareous soil. Geoderma 272: 10-19
- Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH, Soltanpour PN, Tabatabai MA, Johnston CT and Sumner ME, 1996. Methods of Soil Analysis Part 3- Chemical Methods. Soil Science Society of America Book Ser. 5, Madison, Wisconsin, USA, 1390 p.
- Subramanian KS, Tenshia V, Jayalakshmi K and Ramachandran V, 2009. Role of arbuscular mycorrhizal fungus (*Glomus intraradices*) – (fungus aided) in zinc nutrition of maize. Agricultural Biotechnology and Sustainable Development 1: 29-38.
- Tao S, Liu WX, Chen YJ, Xu FL, Dawson RW, Li BG, Cao J, Wang XJ, Hu JY and Fong X, 2004. Evaluation of factors influencing root-induced changes of copper fractionation in rhizosphere of a calcareous soil. Environmental Pollution 129: 5-12.
- Uchimiya M, Klasson KT, Wartelle LH and Lima IM, 2011. Influence of soil properties on heavy metal sequestration by biochar amendment: 1. Copper sorption isotherms and the release of cations. Chemosphere 82: 1431-1437.
- Vahedi R and Rasouli-Sadaghiani MH, 2019. The effect of application of biochar and pruning waste compost with PGPR inoculation on macronutrient availability in wheat rhizosphere. Applied Soil Research 6(4): 16-30. (In Persian with English abstract)
- Van Herwijnen R, Hutchings TR, Al-Tabbaa A, Moffat AJ, Johns ML and Ouki SK, 2007. Remediation of metal contaminated soil with mineral-amended composts. Environmental Pollution 150(3): 347-354.
- Varma A and Chincholkar S, 2007. Microbial Siderophores. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Vyas P and Gulati A, 2009. Organic acid production in vitro and plant growth promotion in maize under controlled environment by phosphate-solubilizing fluorescent *Pseudomonas*. BMC Microbiology 22: 9 - 174.
- Warman PR, Murphy C, Burnham J and Eaton L, 2004. Soil and plant response to MSW compost applications on lowbush blueberry fields in 2000 and 2001. Small Fruit Reviews 3: (1/2): 19-31.
- Yang MM, Mavrodi DV, Mavrodi OV, Bonsall RF, Parejko JA, Paulitz TC, Thomashow LS, Yang HT, Weller DM and Guo JH, 2011. Biological control of take-all by fluorescent *Pseudomonas* spp. from Chinese wheat fields. Phytopathology 101: 1481-1491.