

زیست‌فراهمی برخی عناصر ریزمغذی تحت تأثیر بیوجار و کمپوست بقایای هرس درختان در حضور میکوریز در ریزوسفر گندم

رقیه واحدی و میرحسن رسولی صدقیانی^{*۱}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱/۲۰)

چکیده

استفاده از روابط همزیستی بین قارچ میکوریز و ترکیبات آلی تحرک عناصر غذایی ریزمغذی را در ریزوسفر تحت تأثیر قرار می‌دهند و زیست‌فراهمی عناصر غذایی ریز مغذی در گیاه را بهبود می‌بخشند. به منظور ارزیابی تأثیر کاربرد بیوجار و کمپوست بقایای هرس درختان سیب و انگور و قارچ میکوریزی بر زیست‌فراهمی عناصر ریزمغذی در خاک آهکی در ریزوسفر گندم آزمایش گلخانه‌ای با کشت گندم در شرایط رایزوباکس انجام شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل منابع آلی (بیوجار، کمپوست و شاهد)، تلقیح میکروبی (قارچ AMF و بدون تلقیح) در خاک ریزوسفری بودند. در پایان دوره رشد، ماده آلی (OM) و زیست‌فراهمی عناصر آهن، روی، مس و منگنز در خاک‌های ریزوسفری و جذب این عناصر در گیاه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که ماده آلی، آهن، روی، مس و منگنز در خاک ریزوسفری تحت تأثیر منابع آلی و تلقیح میکوریزی افزایش معنی‌داری داشتند، به طوری که کاربرد بیوجار در شرایط تلقیح میکوریزی منجر به افزایش ۷۴/۲۳ و ۱۹/۲۸ درصدی آهن و منگنز نسبت به شرایط بدون تلقیح در خاک ریزوسفری شد. حضور قارچ میکوریز سبب افزایش زیست‌فراهمی ۹۴/۶۰ و جذب عناصر ریزمغذی و وزن خشک گیاه گندم شد.

واژه‌های کلیدی: مواد آلی، عناصر ریزمغذی، ریزوسفر، گندم

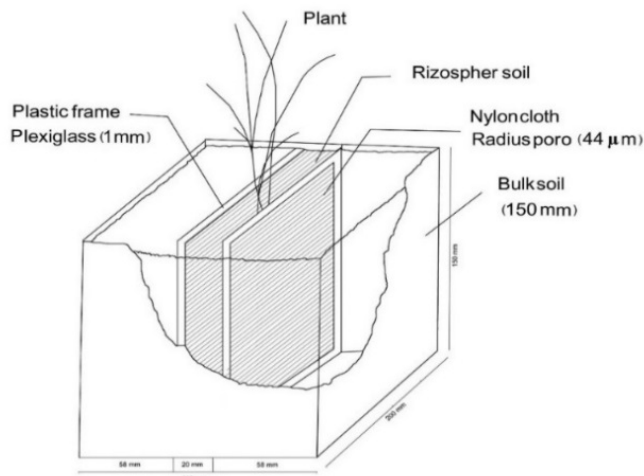
۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

*: مسئول مکاتبات: m.rsadaghiani@urmia.ac.ir

مقدمه

کمبود عناصر ریزمغذی به‌ویژه آهن، روی، مس و منگنز یکی از مشکلات عمده 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. اغلب خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران نیز آهکی است که آهک منجر به کاهش ذخیره کربن و کمبود عناصر غذایی می‌شود. بسیاری از گیاهان زراعی در این خاک‌ها با کمبود عناصر غذایی ریزمغذی روبه‌رو هستند (۱۳). از جمله راهکارهای افزایش مقدار قابل جذب این عناصر استفاده از مواد آلی اصلاحی همانند بیوپچار و کمپوست حاصل از بقایای هرس درختان میوه است. تأثیرات بیوپچار در مقابل کمپوست در خاک بسیار متفاوت است. بیوپچار دارای پتانسیل افزایش زیست‌فراهمی عناصر غذایی برای گیاهان است. با این حال مکانیسم‌ها برای این افزایش هنوز یک حدس و گمان است (۳۲). زیست‌فراهمی عناصر غذایی همانند عناصر ریزمغذی در خاک و تأثیر آنها بر رشد و عملکرد گیاهان می‌تواند با تأثیر بر افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، تغییر pH خاک، تحریک فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک و بهبود ویژگی‌های کیفی خاک یا مشارکت و کمک مستقیم عناصر غذایی از بیوپچار باشد (۱۱). همچنین تشکیل گروه‌های عاملی و محل‌های جذب در سطح بیوپچار نیز ظرفیت خاک را در ایجاد کمپلکس با یون‌های فلزی و جذب آنها افزایش می‌دهد (۳۶). افزایش مقدار آهن در گیاه لوبیا (۱۴) و روی در برخی گیاهان مانند کلم بروکلی و اسفناج تحت تأثیر بیوپچار گزارش شده است (۱۲). افزایش منگنز قابل استخراج با DTPA با مقدار کاربرد بیوپچار در خاک و پیوند مس با گروه‌های عاملی بیوپچار گزارش شده است (۱۶). کمپوست نیز حاوی مقادیر فراوانی عناصر معدنی است که بخشی از آنها برای رشد گیاه ضروری است. از مهم‌ترین این عناصر فسفر، پتاسیم، نیتروژن، منیزیم و گوگرد و همچنین عناصر ریزمغذی به‌ویژه آهن، روی، مس و منگنز است (۸). کاسترو و همکاران (۹) افزایش غلظت برخی عناصر ریزمغذی از جمله آهن، روی و مس را در کاهوی

کشت‌شده در تیمارهای شاهد و کمپوست در مقایسه با لجن فاضلاب و کود شیمیایی گزارش کردند و علت افزایش غلظت مس و روی در کاهو را محتوای زیاد این عناصر در کمپوست بیان کردند. اطلاعات کمی درباره پاسخ میکروارگانیسم‌ها به اضافه کردن بیوپچار وجود دارد (۲۰). درحالی که وجود میکروارگانیسم‌ها در ریزوسفر، بر چرخه عناصر غذایی در سیستم‌های خاک-ریشه بسیار مؤثر است. بنابراین یکی دیگر از راهکارهای افزایش زیست‌فراهمی عناصر ریزمغذی استفاده از پتانسیل قارچ‌های میکوریز آربوسکولار است. این قارچ‌ها از طریق مکانیسم‌های مختلفی حلالیت عناصر موجود در خاک را که در حالت عادی غیر قابل جذب برای گیاه هستند، افزایش می‌دهند و با گسترده کردن شبکه هیف‌های خود در خاک، افزایش سطح و سرعت جذب ریشه گیاه را نیز افزایش می‌دهند (۲۴). نتایج نشان داده است که اثر همزیستی قارچ‌های میکوریزی بر گیاهان سبب افزایش جذب عناصر آهن، روی، مس، منگنز و سایر عناصر می‌شوند (۱۷). خاک‌های غنی شده با بیوپچار به‌علت جذب و غیرفعال کردن مواد مهارکننده رشد، افزایش مواد مغذی، تغییر سطوح قابلیت‌فراهمی عناصر غذایی، حفاظت فیزیکی مستقیم قارچ‌های میکوریزی از تغذیه شکارچیان در منافذ بیوپچار و یا تغییر فرآیندهای سیگنالینگ بین گیاه و قارچ‌های میکوریزی با تغییر دینامیک این قارچ‌ها همراه هستند (۱۰) که این تغییرات در روابط گیاه و قارچ‌های میکوریز آربوسکولار مؤثر است. علاوه بر نقش مواد آلی و قارچ‌های میکوریزی بر افزایش زیست‌فراهمی عناصر ریزمغذی از طریق تأثیر آنها در کمپلکس کردن و افزایش حلالیت این عناصر، باید به تأثیر ریزوسفر نیز توجه کرد. جریان‌ات کربن در ایفای نقش منطقه ریزوسفر بسیار اهمیت دارد (۳۴). ریزوسفر محیطی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است که به‌دلیل داشتن تنوع و فعالیت میکروبی از خاک غیرریزوسفری متمایز می‌شود. عرضه مواد آلی درحال تجزیه به جامعه میکروبی وابسته به ریشه همراه با تغییرات میکروبی ایجاد شده در الگوهای ریشه‌بندی و عرضه عناصر غذایی فراهم برای گیاه که از فعالیت میکروبی



شکل ۱. نمایی از سیستم رایزوباکس

راکتور (استوانه فلزی به قطر ۷ و ارتفاع ۳۱ سانتی‌متر) و سپس به کوره الکتریکی برای تولید بیوجار منتقل شد. تولید در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ دمایی ۱۷ درجه سانتی‌گراد در دقیقه به مدت چهار ساعت انجام شد. همچنین کمپوست بقایای هرس از گلخانه تحقیقاتی گروه علوم خاک دانشگاه ارومیه تهیه شد. در نهایت بیوجار و کمپوست بقایای هرس آسیاب و از الک نیم میلی‌متری عبور داده شد. سپس برخی ویژگی‌های آنها اندازه‌گیری شد (۲۸) (جدول ۲). برای انجام آزمون گلخانه‌ای، آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی، با چهار تکرار شامل منابع آلی (بیوجار بقایای درختان سیب و انگور، کمپوست بقایای هرس درختان سیب و انگور و شاهد بدون ماده آلی) و قارچ میکوریزی (*Glomus fasciculatum*) بدون تلقیح) بود که در گلخانه تحقیقاتی گروه علوم خاک دانشگاه ارومیه اجرا شد. به منظور کشت گیاه از رایزوباکس استفاده شد. باکس‌های ریزوسفر در ابعاد ۲۰×۱۵×۲۰ سانتی‌متر (طول، عرض و ارتفاع) استفاده شد (شکل ۱). فضای هر باکس با استفاده از صفحات مشبک نایلونی ۴۴ میکرون به دو قسمت ناحیه ریزوسفری به ضخامت دو سانتی‌متر و ناحیه غیرریزوسفری به ضخامت ۵/۸ سانتی‌متر (این ناحیه در طرف دیگر ناحیه ریزوسفری نیز با همان ضخامت تکرار شد) تقسیم شد. برای انجام آزمون‌های گلخانه‌ای، بیوجار و کمپوست بقایای هرس برحسب ۱/۵ درصد کربن آلی خالص به خاک

منشأ می‌گیرد، تأثیرگذار بوده و نتیجه اصلی تشکیل و ایفای نقش ریزوسفر است (۴). بنابراین با توجه به اینکه نقطه شروع و مسیر اصلی عناصر غذایی منطقه ریزوسفر است. بنابراین مطالعه این منطقه نتایج سودمندی به همراه دارد. با توجه به اهمیت استراتژیک گندم که نقش مهمی در تغذیه مردم در ایران دارد و کمبود شایع برخی عناصر ریزمغذی در مزارع گندم، پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر کاربرد بیوجار و کمپوست به همراه قارچ میکوریز آربوسکولار بر زیست‌فراهمی آهن، روی، مس و منگنز در یک خاک آهکی در ریزوسفر گندم در شرایط رایزوباکس انجام شد.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، خاک غیر زراعی مورد استفاده از شهرستان سلماس واقع در استان آذربایجان غربی تهیه و بعد از هوا خشک کردن از غربال دو میلی‌متری عبور داده شد. سپس برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی به روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند (۳۳) (جدول ۱). سپس در دستگاه اتوکلاو و با دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس و فشار یک و دو اتمسفر به مدت دو ساعت استریل شدند. بقایای هرس درختان سیب و انگور از باغ‌های شهرستان ارومیه جمع‌آوری و به قطعات ۲۰ میلی‌متری خرد شد. پس از خشک‌شدن، ابتدا به

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

منگنز قابل جذب	مس قابل جذب	روی قابل جذب	آهن قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	فسفر قابل جذب	نیترژن کل	کربنات کلسیم کربنات آلومین	EC	pH	بافت خاک
۷/۳۱	۰/۲۶	۰/۶۲	۱/۴۴	۹۸	۷/۶۴	۰/۰۸	۱۴/۲۵	۰/۴۷	۷/۵۳	شن لومی
						(٪)		(dS m ⁻¹)	-	

EC و pH در عصاره‌های صاف‌شده یک به پنج خاک به آب اندازه‌گیری شدند.

جدول ۲. برخی از ویژگی‌های بیوجار حاصل از ضایعات هرس درختان سیب و انگور

ویژگی‌های مورد مطالعه	بیوجار 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 (%)	۶۷/۵۳	۳۰/۰۲
نیتروژن کل (%)	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

pH و EC در عصاره صاف شده ۱ به ۱۰ بیوجار به آب و در کمپوست در عصاره صاف شده ۱ به ۵ کمپوست به آب اندازه‌گیری شدند.

آزمایشگاه برای اندازه‌گیری ماده آلی (۳۳) و عناصر ریزمغذی قابل جذب (۲۲) 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 نرم‌افزار MSTATC و رسم نمودارها با نرم‌افزار Execl انجام شد.

بحث و نتایج

جدول تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف منابع آلی و تلقیح میکروبی بر درصد ماده آلی و زیست‌فراهمی برخی عناصر ریزمغذی قابل جذب در خاک ریزوسفری نشان داد (جدول ۳) که اثر اصلی این تیمارها بر پارامترهای ذکر شده در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی‌دار بود. همچنین اثر متقابل منابع آلی × تلقیح میکروبی نیز بر ماده آلی و میزان روی قابل جذب در سطح احتمال ۰/۱ درصد، آهن و منگنز قابل جذب در سطح احتمال یک درصد و نیز مس قابل جذب در سطح احتمال پنج درصد در خاک ریزوسفری معنی‌دار بودند.

ماده آلی

به‌طور کلی افزودن مواد آلی درصد ماده آلی ریزوسفر را

(۵/۸۰ کیلوگرم خاک برای هر باکس) اضافه و به باکس‌ها منتقل شد. مقدار قارچ میکوریز برای هر باکس حدود ۷۰ گرم بود که به قطر نیم سانتی‌متر و به فاصله یک لایه مانده از سطح خاک ریزوسفری به‌طور یکنواخت تلقیح و توزیع شد و بعد از تلقیح با سطحی یکنواخت از خاک پوشانده شد. برای کشت گیاه، بذره‌های گندم (*Triticum aestivum L.*) رقم پیش‌تاز پس از ضدعفونی با هیپوکلریت سدیم ۰/۵ درصد به تعداد شش بذر در قسمت ریزوسفری رایزوباکس‌ها کشت شدند. پس از جوانه زدن بذرها، چهار بوته نگه داشته شدند. در طول دوره کشت از آب مقطر به‌منظور آبیاری و برای تأمین مواد غذایی مورد نیاز برای تغذیه گیاهان از محلول غذایی روریسون (Rorison) استفاده شد. در پایان پس از ۶۵ روز رایزوباکس‌ها باز شدند. بخش هوایی و ریشه گیاه پس از شستشو با آب مقطر، به‌مدت ۴۸ ساعت در آون و در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد خشک و وزن خشک آنها اندازه‌گیری شدند. سپس، نمونه‌های گیاه برای تعیین عناصر ریزمغذی آسیاب شدند و آهن، روی، مس و منگنز در اندام هوایی و ریشه گیاه به روش هضم خشک توسط دستگاه جذب اتمی مدل Shimadzu-AA330 تعیین شد. خاک‌های ناحیه ریزوسفری هر تیمار خشک شدند و به

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس منابع آلی و تلقیح میکروبی بر ماده آلی و عناصر ریزمغذی قابل جذب در خاک ریزوسفری

منابع تغییرات	درجه آزادی					میانگین مربعات
	ماده آلی	آهن	روی	مس	منگنز	
منابع آلی	۱۳/۸۸۳***	۷/۰۵۹***	۲۱/۵۵۶***	۰/۰۴۹***	۱۹/۵۳۹***	۲
تلقیح میکروبی	۱/۱۹۷***	۵/۳۷۷***	۶/۰۱۰***	۰/۰۹۹***	۷/۸۲۰***	۱
منابع آلی × تلقیح میکروبی	۰/۱۲۸***	۰/۸۶۲**	۳/۹۷۸***	۰/۰۰۱*	۰/۵۹۳**	۲
خطا	۰/۰۲۰	۰/۱۶۴	۰/۰۱۴	۰/۰۰۱	۰/۱۱۶	۱۸
ضرب تغییرات (%)	۷/۱۷	۱۶/۲۱	۵/۳۹	۸/۶۲	۳/۹۶	-

***، ** و * به ترتیب معنی دار در سطح ۰/۱، ۱ و ۵ درصد

جدول ۴. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل منابع آلی و تلقیح میکروبی بر ماده آلی و عناصر ریزمغذی قابل جذب در خاک ریزوسفری

تلقیح میکروبی	منابع آلی	ماده آلی			
		(%)	(mg kg ⁻¹)	روی	مس
بیوجار	۱/۷۹ ^c	۳/۹۹ ^a	۱/۴۹ ^c	۰/۵۳ ^a	۱۰/۹۵ ^a
میکوریز	۳/۷۴ ^a	۳/۲۵ ^b	۵/۴۱ ^a	۰/۵۷ ^a	۹/۲۴ ^b
شاهد	۰/۸۹ ^e	۶۷۱ ^d	۱/۲۳ ^d	۰/۴۱ ^b	۷/۳۳ ^d
بیوجار	۱/۴۹ ^d	۲/۲۹ ^c	۱/۳۷ ^{cd}	۰/۴۲ ^b	۹/۱۸ ^b
بدون تلقیح	۳/۰۲ ^b	۲/۶۱ ^c	۲/۷۸ ^b	۰/۴۴ ^b	۸/۳۴ ^c
شاهد	۰/۶۷ ^f	۱/۱۷ ^e	۰/۹۸ ^e	۰/۲۹ ^c	۶/۵۸ ^e

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی داری ندارند.

بخش دیگر ماده آلی باقی مانده در تعامل با هیف، ساختمان خاک را بهبود داد (۲۱). تیمار بیوجار نیز در شرایط تلقیح میکوریزی در مقایسه با شرایط بدون تلقیح همانند کمپوست مقدار ماده آلی خاک ریزوسفری افزایش یافت ولی در مقایسه با کمپوست کمتر بود. هر چند به دلیل کربن بالای بیوجار مصرفی (جدول ۲) خلاف این مطلب قابل انتظار بود. با توجه به اینکه درجه حرارت منجر به تولید ترکیبات آروماتیک پایدار و خشبی شدن بیشتر مواد آلی و در نتیجه باعث تولید بیوجار مقاوم در برابر تجزیه می‌شود. از دلایل دیگر می‌توان به این موضوع اشاره کرد که احتمالاً بخشی از کربن موجود در بیوجار به دلیل ساختار پایدار بیوجار به روش مرسوم (والکی- بلک) قابل اندازه‌گیری نبوده است (۳۷). نقش ریزوسفر نیز در افزایش مواد

افزایش داده است (جدول ۴). همانطور که مقایسه میانگین داده‌ها نشان می‌دهد (جدول ۴) تلقیح میکوریزی نیز در مقایسه با شرایط بدون تلقیح سبب تشدید این افزایش شده است. به طوری که بیشترین درصد ماده آلی در خاک ریزوسفری در تیمار کمپوست تلقیح میکوریزی بود که نسبت به تیمار شاهد ۲۳/۸۴ درصد افزایش نشان داد. به نظر می‌رسد که بخش کربن فعال موجود در کمپوست پس از افزوده شدن به خاک تجزیه شده و همچنین بخشی از کربن موجود در این کود به ذخایر کربن در خاک پیوسته و باعث افزایش محتوای ماده آلی خاک شده است. جوردن و همکاران نشان دادند زمانی که کمپوست به عنوان ماده آلی به خاک اضافه شد، قارچ‌های میکوریز قسمتی از ماده آلی را صرف افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی و

افزایش در روی و مس قابل جذب در خاک و البته در شرایط تلقیح میکوریزی مشاهده شد ولی در سایر عناصر چنین نبود که نشان‌دهنده رفتار متفاوت مواد آلی در زیست‌فراهمی عناصر است که سبب شده بیوجار و کمپوست رفتارهای متفاوتی بر زیست‌فراهمی عناصر داشته باشند. مشاهده شده است که اضافه کردن بیوجار به خاک با تأثیر بر ظرفیت تبادل یونی و فعالیت‌های میکروبی بر قابلیت استفاده یون‌های غذایی مؤثر است (۳). تشکیل گروه‌های عاملی و محل‌های جذب در سطح بیوجار نیز ظرفیت خاک را در ایجاد کمپلکس با یون‌های فلزی و جذب آنها را افزایش می‌دهد (۳۶). بیوجار تهیه شده از چوب می‌تواند فعالیت‌های میکروبی در خاک را با فراهمی‌کردن زیستگاه، رطوبت، کربن، منابع لبایل و عناصر مغذی برای میکروارگانیسم‌ها افزایش دهد. بیوجارها دارای شکل نامنظم با ساختار متخلخل هستند. ساختار متخلخل بیوجار، سطوح ویژه بالا و توانایی آن برای جذب مواد آلی محلول، گازها و مواد معدنی محل مناسبی را برای سکونت میکروارگانیسم‌ها، رشد و تکثیر آنها به‌ویژه قارچ‌های میکوریز آربوسکولار فراهم می‌آورد. همچنین وجود خلل و فرج و توزیع اندازه آنها در بیوجار با حفاظت قارچ‌های میکوریزی در مقابل شکار شدن و خشکی و همچنین تأمین نیاز کربنی، انرژی و عناصر معدنی محل مناسبی را برای قارچ‌های میکوریز آربوسکولار فراهم می‌آورد. جین (۱۹) با مطالعه ویژگی کلونیزاسیون میکروبی بیوجار و تأثیر آن به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک مشاهده کرد که بیوجار در برهم‌کنش با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار منجر به افزایش فراوانی قارچ‌های میکوریزی و افزایش زیست‌فراهمی عناصر غذایی در خاک شد. چنانچه مشاهده شد مقدار روی قابل جذب در تیمار بیوجار تلقیح نسبت به تیمار بدون تلقیح تفاوت معنی‌داری نشان نداد. دلایل مختلفی برای کاهش مقدار روی قابل جذب با کاربرد بیوجار در خاک نسبت به سایر تیمارهای آلی می‌توان بیان کرد. کاهش زیست‌فراهمی روی در خاک در اثر کاربرد بیوجار می‌تواند ناشی از رشد بیشتر گیاه و در نتیجه جذب بیشتر روی از خاک باشد. اثر رقت، جذب یون‌های فلزی روی

آلی نیز تأثیرگذار است زیرا سرعت ورود مواد آلی در ریزوسفر بیشتر از غیرریزوسفر است و دلیل آن سلول‌های ریزان ریشه است، علاوه بر این ترشحات ریشه‌ای مانند ترکیبات فنولی در ریزوسفر به‌عنوان محرک رشد میکروبی در خاک ریزوسفری بوده و زمانی که تجزیه می‌شوند سبب افزایش ماده آلی و عناصر غذایی غذایی در خاک می‌شوند. میکروارگانیسم‌های موجود در ریزوسفر به‌عنوان ذرات آلی بسیار فعال در خاک به‌شمار می‌روند که دارای سطحی فعال و باردار و نیز توانایی تولید و ترشح بسیاری از ترکیبات آلی و کربوهیدرات‌ها را دارا هستند که از این طریق سبب افزایش ماده آلی خاک می‌شوند.

قابلیت زیست‌فراهمی عناصر ریزمغذی قابل جذب در خاک ریزوسفری

اثر منابع آلی و تلقیح میکوریزی نشان داد که افزودن مواد آلی همراه با تلقیح میکوریزی تأثیر معنی‌داری نسبت به شرایط بدون تلقیح همراه با ماده آلی و نیز شرایط شاهد و بدون تلقیح بر زیست‌فراهمی عناصر ریزمغذی قابل جذب در خاک داشت (جدول ۴). به‌طوری که در شرایط تلقیح میکوریزی، حضور بیوجار منجر به افزایش به‌ترتیب ۷۴/۲۳ و ۱۹/۲۸ درصدی آهن و منگنز نسبت به شرایط بدون تلقیح شد. در شرایط بدون تلقیح، اختلاف آماری بین تیمارهای بیوجار و کمپوست در زیست‌فراهمی آهن قابل جذب مشاهده نشد هر چند هر دو تیمار نسبت به تیمار شاهد در هر دو سطح تلقیح میکروبی افزایش نشان دادند. همچنین بالاترین میزان روی و مس قابل جذب نیز مربوط به تیمار تلقیح میکوریزی کمپوست بود که نسبت به شرایط بدون تلقیح به‌ترتیب ۹۴/۶۰ و ۲۹/۵۴ درصدی در مقایسه با تیمار بدون تلقیح شد. هر چند اختلاف معنی‌داری در میزان مس قابل جذب در بین تیمارهای میکوریزی بیوجار و کمپوست مشاهده نشد.

با توجه به بالا بودن میزان عناصر ریزمغذی در کمپوست مصرفی (جدول ۲) انتظار بر این بود که پس از افزودن به خاک نیز سبب افزایش زیست‌فراهمی این عناصر شود. هر چند این

دماهای بالاتر باشد. نواک و همکاران (۲۷) همچنین بیان کردند که منگنز می‌تواند به‌طور انتخابی در مکان‌های تبادل بیوپچار پوست گردو جذب شود.

به‌طور کلی نتایج نشان داد مواد آلی مانند بیوپچار و کمپوست در حضور قارچ‌های میکوریز سبب افزایش زیست‌فراهمی عناصر ریزمغذی شدند. مواد آلی کربن مورد نیاز قارچ‌های میکوریزی را فراهم کرده در نتیجه این قارچ‌ها با گسترش هیف‌های خود در خاک منجر به افزایش سطح ریشه و کاهش فاصله انتشار شده، در نتیجه منجر به افزایش زیست‌فراهمی عناصر فلزی غیرمتحرک می‌شود (۱۸). مکانیسم‌های مختلفی اعم از نقش میکروارگانیسم‌ها، ریزوسفر و نیز تبادلات شیمیایی خاک و سایر عوامل در خاک و گیاه مسئول افزایش کاهش نگهداری عناصر غذایی در خاک است. افزایش زیست‌فراهمی عناصر ریزمغذی به‌ویژه آهن و روی در شرایط تلقیح میکوریزی ممکن است به‌دلیل تولید سیدوفورهای میکروبی نیز باشد. سیدروفورها ترکیبات آلی با وزن مولکولی اندک هستند که تمایل زیادی برای ترکیب شدن با کاتیون‌های مختلف دارند، میکروارگانیسم‌های خاک در شرایط کمبود آهن یا روی با ترشح سیدروفور که کمپلکس پایداری با آنها می‌دهد، آنها را به‌صورت محلول و قابل دسترس در می‌آورند (۲۱). تولید سیدروفور در قارچ‌های میکوریزی گزارش شده است (۲). علاوه بر سیدروفور، فیتوسیدروفورها مترشح از گیاه گندم نیز موجب افزایش زیست‌فراهمی عناصر ریزمغذی در خاک ریزوسفری می‌شوند (۲۹).

میزان عناصر ریزمغذی جذب شده گیاه گندم

جدول (۵) نشان دهنده نتایج تجزیه واریانس تأثیر منابع آلی و تلقیح میکروبی بر میزان عناصر غذایی ریزمغذی (آهن، روی، مس و منگنز) و عناصر ریزمغذی در ریشه و اندام هوایی گندم است. نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد اثرات اصلی منابع آلی و تلقیح میکروبی بر میزان جذب شده آهن، روی، مس و منگنز در سطح احتمال ۱٪ درصد معنی‌دار بودند. همچنین اثر

سطح ذرات بیوپچار و غیرمتحرک شدن آنها نیز می‌تواند موجب کاهش روی قابل جذب خاک شود. بیوپچار می‌تواند یون‌های فلزی به‌ویژه روی یا مس را در سطح خود جذب کند و در نتیجه زیست‌فراهمی آنها را کاهش دهد (۶). مندز و همکاران (۲۳) با کاربرد لجن فاضلاب و بیوپچار تولید شده از آن به یک خاک مدیترانه‌ای (شنی) نشان دادند که قابلیت جذب روی و مس در نتیجه کاربرد بیوپچار نسبت به لجن فاضلاب کاهش معنی‌داری نشان داد که مطابق با نتایج این پژوهش بود. بر اساس نتایج به‌دست آمده تیمار کمپوست تلقیح میکوریزی بیشترین تأثیر را در مقدار روی و مس زیست‌فراهم در خاک داشت. برخلاف سایر عناصر ریزمغذی زیست‌فراهمی مس در شرایط بدون تلقیح در تیمارهای بیوپچار و کمپوست اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد میکوریزی نشان نداده است. علت این امر را می‌توان به پایداری کربن (کمپوست > بیوپچار) در این تیمارها نسبت داد چرا که مس با مواد آلی کمپلکس‌های آلی پایدار نامحلول ایجاد کرده است و مقدار مس قابل جذب را کاهش می‌دهد. برنال و مک‌گراث (۷) گزارش کردند کاهش بخش زیست‌فراهم فلزات ریزمغذی به‌ویژه مس در ریزوسفر ممکن است به‌علت تشکیل کمپلکس با ترکیبات آلی ریزوسفر و یا جذب و برداشت توسط ریشه باشد. تائو و همکاران (۳۵) کاهش مس در ریزوسفر گیاه گندم را به تشکیل کمپلکس مس با مواد آلی نسبت دادند. همچنین آنها نشان دادند که تغییرات شکل‌های شیمیایی مس در ریزوسفر با حضور میکروارگانیسم‌ها بیشتر است. افزایش منگنز قابل استخراج با DTPA با مقدار کاربرد بیوپچار در خاک توسط پژوهشگران گزارش شده است (۱۶). همچنین افزایش فراهمی منگنز قابل جذب در خاک با کاربرد بیوپچار به بیوپچار تهیه شده در دمای کمتر نسبت داده شده است. احتمالاً منگنز در دمای ۳۵° درجه سانتی‌گراد به‌صورت انتخابی توسط مکان‌های تبادل جذب شده باشد و تعداد این مکان‌های تبادل خاص زمانی که دمای گرم‌اکافت بالا افزایش می‌یابد، کاهش یابد که می‌توان توسط کل بار سطحی منفی بزرگ‌تر در دمای ۳۵° درجه سانتی‌گراد در مقایسه با

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس منابع آلی و تلفیح میکروبی بر عناصر ریزمغذی و وزن خشک در گیاه

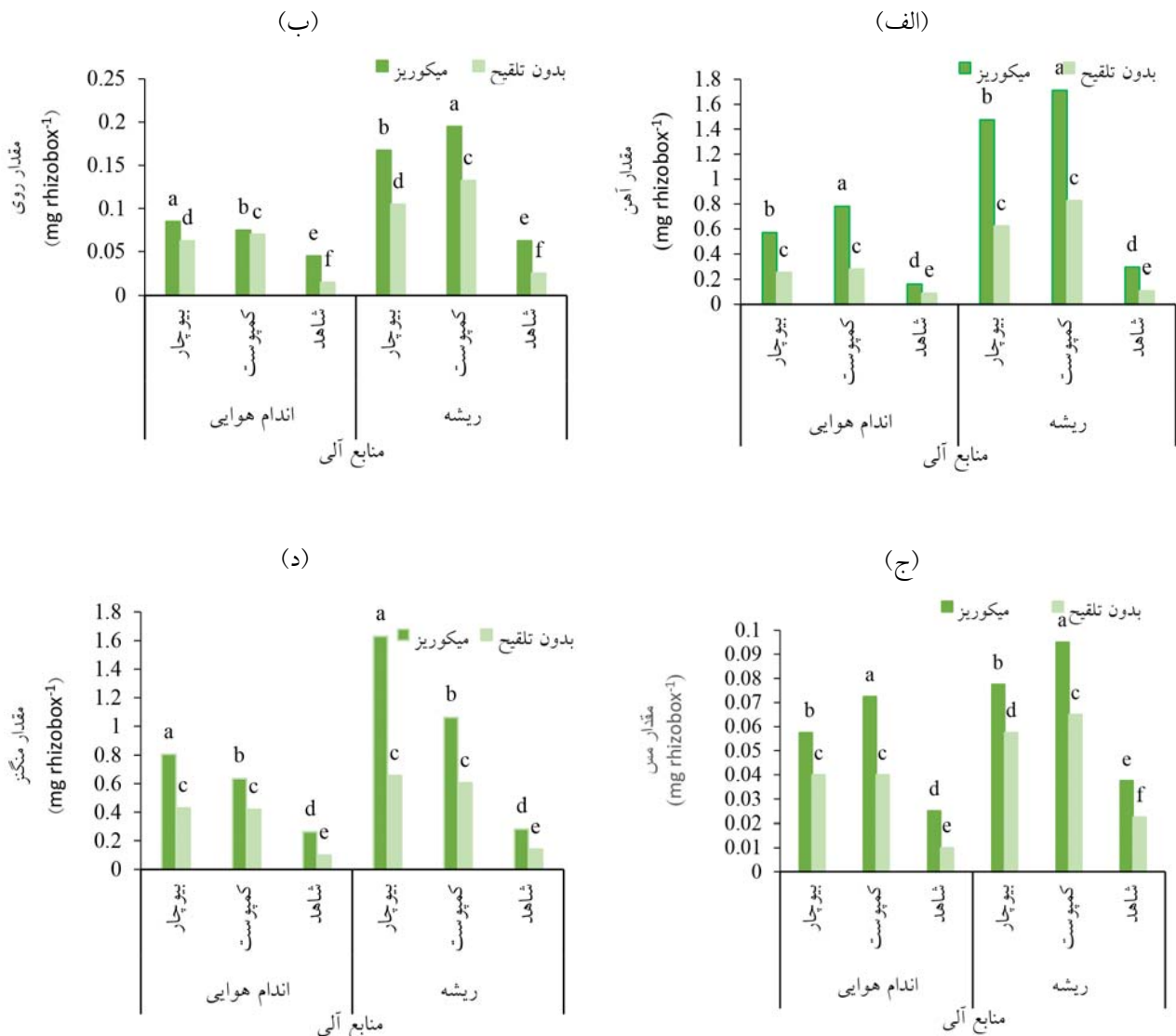
وزن خشک کل گیاه	منابع تغییرات								منابع تغییرات	
	مگنژ ریشه	مگنژ اندام هوایی	مس ریشه	مس اندام هوایی	ریش‌ه	ریش‌ه روی اندام هوایی	آهن ریشه	آهن اندام هوایی		درجه آزادی
۱۴/۸۰۱***	۱/۸۰***	۰/۴۲۴***	۰/۰۰۵***	۰/۰۰۳***	۰/۰۳۲***	۰/۰۰۵***	۲/۵۵۲***	۰/۳۴۷***	۲	منابع آلی
۹/۹۸۵***	۱/۶۵۴***	۰/۳۷۸***	۰/۰۰۳***	۰/۰۰۲***	۰/۰۱۸***	۰/۰۰۳***	۲/۴۶۴***	۰/۵۴۳***	۱	تلفیح میکروبی
۰/۰۷۰***	۰/۳۵۳***	۰/۰۲۵**	۰/۰۰۰۱***	۰/۰۰۰۱***	۰/۰۰۰۱***	۰/۰۰۰۱***	۰/۳۱۲***	۰/۰۹۳***	۲	منابع آلی × تلفیح میکروبی
۰/۰۴۱	۰/۰۶۰	۰/۰۱۳	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۲۵	۰/۰۰۳	۱۸	خطا
۶/۲۱	۳۳/۵۴	۲۵/۸۴	۱۱/۵۹	۲۳/۴۵	۱۵/۲۹	۳۲/۹۳	۱۸/۷۴	۱۵/۸۲		ضریب تغییرات (%)

** و ***: به ترتیب معنی‌دار در سطح ۰/۱ و ۰/۰۱ درصد.

جذب عناصر در گیاه تحت تأثیر غلظت عناصر در خاک است. به گونه‌ای انتظار می‌رود با افزایش غلظت عناصر در خاک، جذب آنها در گیاه نیز بیشتر شود یا با کاهش غلظت عناصر در خاک جذب بیشتری توسط گیاه انجام گرفته باشد (۲۴). نتایج مشابهی در این پژوهش مشاهده شد (شکل ۲). بنابراین علت کاهش میزان آهن در تیمار کمپوست در خاک ریزوسفری جذب بیشتر این عنصر توسط گیاه از ریزوسفر بوده است. کاسترو و همکاران (۹) افزایش عناصر ریزومغذی همانند 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 بیان کردند که مؤید مطابقت با نتایج این پژوهش است (شکل ۲- الف و ج). تیمار تلقیح میکوریزی بیوچار نیز سبب افزایش میزان آهن در ریشه و اندام هوایی گندم شد ولی در مقایسه با کمپوست این افزایش کمتر بود. حضور مواد مغذی گیاهی و خاکستر در بیوچار، سطح ویژه بالا و طبیعت متخلخل و ظرفیت ایجاد محیطی برای میکروارگانیسم‌ها به‌عنوان دلایل اصلی افزایش ویژگی‌های خاک و جذب عناصر غذایی توسط گیاه در خاک‌های تحت تیمار بیوچار است (۲۶). در بین تیمارهای بدون تلقیح نیز اختلاف آماری معنی‌داری در میزان آهن بین بیوچار و کمپوست هم در ریشه و هم در اندام هوایی مشاهده نشد. سلیم (۳۰) مشاهده کرد که بیوچار مقدار آهن را در برگ گندم نسبت به کنترل افزایش داد همچنین مقدار آهن ریشه هم نسبت به دانه افزایش یافته بود. آدیجومو و همکاران (۱) گزارش کردند که کاربرد تیمار بیوچار سبوس برنج سبب افزایش معنی‌دار جذب روی توسط گیاه ذرت شد. افزودن مواد آلی به‌ویژه کمپوست در حضور قارچ‌های میکوریزی سبب افزایش جذب مس در گیاه شده که می‌توان به غلظت مس تحت تأثیر این تیمار اشاره کرد که سبب شده جذب مس توسط گیاه افزایش یابد. در واقع افزودن مواد آلی به‌ویژه کمپوست به خاک، ظرفیت جذب مس بر کلونیدهای خاک را کاهش و قابلیت استفاده و جذب آن توسط گیاه را از طریق تشکیل کمپلکس‌های آلی- فلز، به‌ویژه

اصلی نوع بیوچار و اثر متقابل نوع \times مقدار بیوچار بر مقدار روی خاک نیز در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنادار بود همچنین اثر متقابل منابع آلی \times تلقیح میکروبی بر میزان عناصر آهن (ریشه و اندام هوایی)، روی (ریشه و اندام هوایی)، مس ریشه در سطح احتمال ۰/۱ درصد و مس اندام هوای و منگنز (ریشه و اندام هوایی) در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بودند.

نتایج تجزیه گیاه نشان داد که افزودن مواد آلی به‌ویژه کمپوست به خاک در حضور قارچ میکوریزی، مقدار آهن اندام هوایی و ریشه را افزایش داد (شکل ۲- الف). بیشترین میزان جذب روی بخش هوایی گیاه در تیمار بیوچار تلقیح میکوریزی مشاهده شد که $1/50$ برابر بیشتر از تیمار بیوچار بدون تلقیح بود و با تیمار کمپوست و تیمار شاهد در هر دو سطح تلقیح تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری نشان داد (شکل ۲- ب). همچنین کاربرد ماده آلی همراه با حضور قارچ میکوریزی تأثیر معنی‌داری نسبت به شرایط شاهد در هر دو سطح تلقیح بر مقدار این عنصر در ریشه گیاه داشت. البته مقدار روی در تیمار کمپوست همراه با تلقیح میکوریزی در مقایسه با سایر تیمارها بیشترین مقدار بود (شکل ۲- ب). همچنین تیمار کمپوست تلقیح میکوریزی $1/75$ و $1/42$ برابر جذب مس را به‌ترتیب در اندام هوایی و ریشه را نسبت به تیمارهای بدون تلقیح افزایش داد (شکل ۲- ج). در شرایط بدون تلقیح منابع آلی نیز، اختلاف آماری معنی‌داری بین بیوچار و کمپوست بر خلاف ریشه در جذب مس مشاهده نشد. مقایسه میانگین اثر متقابل تلقیح میکروبی و منابع آلی بیانگر افزایش معنی‌دار مقدار منگنز گیاه در بخش هوایی و ریشه بود. البته بیوچار سبب افزایش مقدار این عنصر در تلقیح میکوریزی نسبت به شرایط بدون و نیز سایر تیمارها در هر دو سطح تلقیح شد (شکل ۲- د). بر اساس نتایج به‌دست آمده بالاترین میزان منگنز در ریشه در تیمار کمپوست مشاهده شد. تیمارهای بیوچار و کمپوست اختلاف معنی‌داری در جذب منگنز در شرایط بدون تلقیح در ریشه و اندام هوایی نشان ندادند.

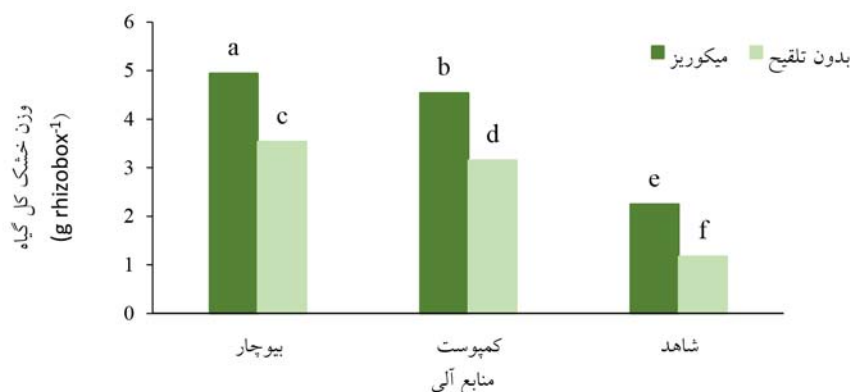


شکل ۲. مقایسه میانگین اثر متقابل منابع آلی و تلقیح میکروبی بر مقدار عناصر ریزمغذی: الف) آهن، ب) روی، ج) مس و د) منگنز در ریشه و اندام هوایی گیاه گندم. میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

است که نتیجه گزارش شده مشابه سلیم (۳۰) است. وی نیز با مطالعه تأثیر کاربرد بیوجار و عصاره جلبک دریایی بر رشد، عملکرد و ترکیب معدنی گیاه گندم تحت شرایط خاک شنی گزارش کرد که با کاربرد دو درصد بیوجار مقدار منگنز در ریشه و بخش هوایی گندم افزایش یافت و این افزایش در بخش ریشه بیشتر از اندام هوایی گندم بود.

به‌طور کلی نتایج نشان داد که افزودن کمپوست و بیوجار چه به‌شکل جداگانه و چه به‌صورت تلفیقی با تلقیح میکوریزی

در خاک‌های آهکی افزایش می‌دهد. نامگی و همکاران (۲۵) نشان دادند با کاربرد بیوجار محتوای مس در بخش هوایی گیاه کاهش یافت که به‌دلیل جذب مس توسط بیوجار بود. درحالی که ایپولیتو و همکاران (۱۵) ثابت کردند که بیوجار می‌تواند مس را روی سطح یا رسوب کانی‌های کربنات مس یا اکسید مس در داخل ماتریکس بیوجار جذب کند. در ارتباط با منگنز در تیمار تلقیح میکوریزی گیاه نیز می‌توان چنین بیان کرد که غلظت فلزات بافت گیاه تابعی از غلظت آنها در محلول خاک



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل منابع آلی و تلقیح میکروبی بر وزن خشک کل گیاه. میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

منابع آلی و تلقیح میکروبی بر وزن خشک کل گیاه نسبت به شاهد معنی‌دار بود (شکل ۳). بیشترین وزن خشک ریشه در تیمار بیوچار تلقیح میکوریزی (۴/۹۴ گرم در رایزوباکس) بود که اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها داشت. کمترین وزن خشک در شاهد (۱/۱۷ گرم در رایزوباکس) در شرایط بدون تلقیح بود. تیمار بیوچار در هر دو سطح تلقیح در مقایسه با بیوچار وزن خشک گیاه گندم را افزایش داد.

افزایش و یا کاهش عملکرد گیاهان به به نوع خاک بستگی دارد. هرچه خاک کیفیت پایین‌تری داشته باشد (مقدار مواد آلی کمتر و ظرفیت پایین‌تر نگهداری عناصر غذایی (همانند خاک مورد استفاده در این پژوهش جدول (۱) احتمال تحریک و افزایش عملکرد گیاه بیشتر است (۲۸). در بسیاری از مطالعات، بیوچار به دلیل دارا بودن ویژگی‌های بسیار متفاوت در مقایسه با خاک پیرامون ریشه، منجر به بهبود رشد ریشه شده است. بدین دلیل که ریشه‌ها به درون حفرات بیوچار نفوذ می‌کنند و بیوچار با تغییر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک مانند بهبود قابلیت دسترسی عناصر غذایی، آب، تهویه و جذب میکروب‌های مفید باعث بهبود حاصلخیزی خاک شده و در نهایت موجب افزایش رشد و عملکرد گیاه می‌شود (۲۰). در رابطه با تأثیر مثبت کاربرد بیوچار و قارچ میکوریز آربوسکولار بر وزن خشک می‌توان بیان کرد؛ قارچ میکوریزی مورد استفاده در

باعث افزایش جذب روی، مس و منگنز در گیاه شد و این افزایش در شرایط تلقیح میکوریزی بیشتر بود. با توجه به محتوی بالای مواد آلی موجود در منابع آلی فعالیت‌های میکروبی در خاک بهبود یافته و میزان عناصر میکرو در خاک و به تبع آن در گیاه در تیمارهای آلی در مقایسه با تیمار شاهد افزایش زیادی داشته است. میسلیم قارچ‌های میکوریزی از طریق ارتباط ریشه گیاه با محیط‌های اطراف ریشه، سبب افزایش حجمی از خاک که در اختیار ریشه گیاه است می‌شود. این مسئله سبب بقای گیاه در محیط‌هایی که با کمبود آب و عناصر غذایی مواجه هستند؛ می‌شود و استفاده از مواد آلی از طریق تحریک این میکروارگانیسم‌ها و عرضه مداوم و پایدار عناصر غذایی معدنی به گیاه سبب افزایش عملکرد می‌شود (۳۱).

نتایج به‌دست آمده از شکل (۲) نشان داد که مقدار عناصر ریزمغذی در ریشه بیشتر از مقدار آنها در بخش هوایی بود. احتمالاً رسوب این عناصر در سطح ریشه و اشغال سایت‌های فعال در جذب این عناصر (۵) باعث شده است که مقدار آنها در ریشه گندم بسیار بیشتر از بخش هوایی آن به‌دست آید و از طرف دیگر، مانع جذب و انتقال بیشتر این عناصر به بخش هوایی گیاه گندم شود.

بر اساس مقایسه میانگین داده‌ها می‌توان اظهار داشت که اثر

برهم‌کنش مثبت مواد آلی با قارچ میکوریز در ریزوسفر فرایندهای بیوژئوشیمیایی ریزوسفر سبب می‌شود که ریشه گیاه به آسانی نیاز خود به عناصر غذایی را از این منطقه جذب کند و منجر به افزایش زیست‌فراهمی عناصر ریزمغذی و افزایش عملکرد در گیاه شود. در نهایت، با توجه به رفتارهای متفاوت کمپوست و بیوجار در خاک و در پی آن افزایش زیست‌فراهمی عناصر در گیاه و نیز با توجه به اینکه پژوهش‌های بیشتری در کمپوست در مقایسه با بیوجار بر زیست‌فراهمی عناصر انجام گرفته است، بنابراین پژوهش‌های بیشتر در ارتباط با تهیه بیوجار از منابع متفاوت برای رشد گندم و سایر گیاهان زراعی در شرایط مزرعه در خاک‌های آهکی و ارزیابی اقتصادی کاربرد بیوجار در این خاک‌ها توصیه می‌شود.

سپاسگزاری

بخشی از نتایج این پژوهش در قالب طرح پژوهشی شماره ۸۵۱۲۵/۶۰ با استفاده از اعتبارات "صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور" انجام شده است که بدین وسیله تقدیر و تشکر می‌شود.

این پژوهش نیز احتمالاً به دلیل دارا بودن صفات محرکی رشدی (تولید ایندول استیک اسید، آنزیم ACC-deaminase و سیدروفور، توانایی بالایی در حل کردن فسفات‌های نامحلول و کارایی تثبیت نیتروژن) و همچنین توانایی افزایش جذب عناصر توسط گیاه سبب بهبود رشد و عملکرد گیاه شده است. در طی کنش‌های متقابل قارچ میکوریزی با بیوجار، بیوجار با افزایش جذب آب و عناصر غذایی و نیز نگهداری این قارچ در سطوح خود سبب افزایش رشد و توسعه سیستم ریشه‌ای گیاه شده و در نهایت افزایش وزن خشک گیاه و عملکرد گیاه گندم را به دنبال داشته است.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان این گونه بیان کرد که افزودن بیوجار و کمپوست بقایای هرس درختان سیب و انگور سبب افزایش ماده آلی خاک و افزایش زیست‌فراهمی عناصر ریزمغذی در خاک آهکی می‌شود. به طوری که تجزیه تدریجی مواد آلی توأم با افزایش فعالیت قارچ میکوریزی منجر به معدنی شدن مواد آلی شده است و سبب افزایش زیست‌فراهمی عناصر غذایی ریزمغذی در خاک می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Adejumo, S. A., M. O. Owolabi and I. F. Odesola. 2016. Agro-physiologic effects of compost and biochar produced at different temperatures on growth, photosynthetic pigment and micronutrients uptake of maize crop. *African Journal of Agricultural Research* 11(8): 661-673.
2. Aliasgharzad, N., E. Shirmohamadi and S. Oustan. 2009. Siderophore production by mycorrhizal sorghum roots under micronutrient deficient condition. *Soil and Environment* 28: 119-123.
3. Atkinson, C. J., J. D. Fitzgerald and N. A. Higgs. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant and Soil* 337: 1-18.
4. Barea, J. M., R. Azcon and C. Azcon-Aguilar. 2002. Mycorrhizosphere interactions to improve plant fitness and soil quality. *Antonie van Leeuwenhoek* 81: 343-351.
5. Becker, M. and F. Asch. 2005. Iron toxicity in rice – conditions and management concepts. *Soil Science and Plant Nutrition* 168: 558-573.
6. Beesley, L. and M. Marmiroli. 2011. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. *Environmental Pollution* 159: 474-480.
7. Bernal, M. P. and S. P. McGrath. 1994. Effects of pH and heavy metal concentrations in solution culture on the proton release, growth and elemental composition of *Alyssum murale* and *Raphanus sativus* L. *Plant and Soil* 166: 83-92.
8. Bramryd, T. 2001. Effect of liquid and dewatered sewage sludge applied to a Scot pine stand (*Pinus sylvestris* L.) in central Sweden. *Forest Ecology and Management* 147: 197-216.
9. Castro, E., P. Manas and J. De Las Heras. 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.

10. Domene, X., S. Mattana, K. Hanley, A. Enders and J. Lehmann. 2014. Medium-term effects of corn biochar addition on soil biota activities and functions in a temperate soil cropped to corn. *Soil Biology and Biochemistry* 72: 152-162.
11. Enders, A., K. Hanley, T. Whitman, S. Joseph, J. Lehmann. 2012. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology* 114: 644-653.
12. Gartler, J., B. Robinson, K. Burton and L. Clucas. 2013. Carbonaceous soil amendments to biofortify crop plants with zinc. *Science of the Total Environment* 465: 308-313.
13. Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale and W. L. Nelson. 2005. Soil Fertility and Fertilizers: an Introduction to Nutrient Management. 7th Edition. Pearson Education Inc., Upper Saddle River. New Jersey, USA.
14. Inal, A., A. Gunes, O. Sahin, M. B. Taskin and E. C. Kaya. 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.
15. Ippolito, J. A., J. M. Novak, W. J. Busscher, M. Ahmedna, D. Rehrh and D. W. Watts. 2012. Switchgrass biochar affects two Aridisols. *Environmental Quality* 41: 1123-1130.
16. Ippolito, J. A., K. A. Spokas, J. M. Novak, R. D. Lentz and K. B. Cantrell. 2015. Biochar elemental composition and factors influencing nutrient retention. pp. 138-164. In: Lehmann, J. and S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management*, 2 Ed. Routledge, Earthscan.
17. Jeffries, P. 2001. Achievements in the Past and Outlook for the Future of AMF. Research School of Biosciences, University of Kent. Canterbury. Kent.
18. Jifon, J. L., J. H. Graham, D. L. Drouillard and J. P. Syvertsen, 2002. Growth depression of mycorrhizal Citrus seedlings grown at high phosphorus supply is mitigated by elevated CO₂. *New Phytology* 153: 133-142.
19. Jin, H. Y. 2010. Characterization of microbial life colonizing biochar and biochar-amended soils. PhD. Thesis, Cornell University.
20. Lehmann, J., M. C. Rillig, J. Thies, C. A. Masiello, W. C. Hockaday and D. Crowley. 2011. Biochar effects on soil biota a review. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 1812-1836.
21. Leoni, L., C. Amborsi, A. Petrucca, and P. Visca. 2002. Transcriptional regulation of pseudobactin synthesis in the plant growth promoting pseudomonas B10. *FEMS Microbiology Letter* 208: 219-225.
22. Lindsay, W. L. and W. A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42: 421-428.
23. Méndez, A., A. Gómez, J. Paz-Ferreiro and G. Gascó. 2012. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. *Chemosphere* 89(11): 1354-1359.
24. Mengel, K. and E. Kirkby. 2001. Principles of Plant Nutrition. 5th Ed., International Potash Institute, Bern, Switzerland.
25. Namgay, T. and B. Singh. 2010. Influence of biochar application to soil on the availability of As, Cd, Cu, Pb and Zn to maize (*Zea mays L.*). *Australian Journal of Soil Research* 48: 638-647.
26. Nigussie, A., E. Kissi, M. Misganaw and G. Ambaw. 2012. Effect of biochar application on soil Properties and nutrient uptake of Lettuces (*Lactuca sativa*) grown in chromium polluted soils. *Am-Euras, American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental* 12 (3): 369-376.
27. Novak, J. M., I. M. Lima, B. Xing, J. W. Gaskin, C. Steiner, K. C. Das, M. Ahmedna, D. Rehrh, D. W. Watts, W. J. Busscher and H. Schomberg. 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science* 3: 195-206.
28. Rajkovich, S., A. Enders, K. Hanley, C. Hyland, A. R. Zimmerman and J. Lehmann. 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.
29. Rengel, Z. and V. Romheld. 2000. Root exudation and Fe uptake and transport in wheat genotypes differing in tolerance to Zn deficiency. *Plant and Soil* 222: 25-34.
30. Salim, B. B. M. 2016. Influence of biochar and seaweed extract applications on growth, yield and mineral composition of wheat (*Triticum aestivum L.*) under sandy soil conditions. *Annals of Agricultural Science* 61: 257-265.
31. Schusler, A. 2001. A new fungal phylum, the Glomeromycota: Phylogeny and evolution. *Mycological Research* 105: 1413-1421.
32. Sohi, S. P., E. Krull, E. Lopez-Capel and R. Bol. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy* 105: 47-82.
33. Sparks, D. L., A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston and M. E. Sumner. 1996. Methods of soil analysis Part 3- Chemical methods. Soil Science Society of America Book Ser. 5, Madison, Wisconsin, USA.
34. Tao, S., W. X. Liu, Y. J. Chen, F. L. Xu, R. W. Dawson, B. G. Li, J. Cao, X. J. Wang, J. Y. Hu and X. Fong. 2004. Evaluation of factors influencing root-induced changes of copper fractionation in rhizosphere of a calcareous soil. *Environmental Pollution* 129: 5-12.
35. Toal, M. E., C. Yeomans, K. Killham and A. A. Meharg. 2000. A review of rhizosphere carbon flow modelling.

Plant and Soil 222:263–281.

36. Uchimiya, M., K. T. Klasson, L. H. Wartelle and I. M. Lima. 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.
37. Vahedi, R., M. H. Rasouli-Sadaghiani and M. Barin. 2018. The effect of rhizosphere on availability of soil elements in the presence of biochar and compost pruning waste and mycorrhizal. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 8(1): 107-124.

Bioavailability of Selected Micronutrients as Affected by Biochar and Compost of Trees Pruning in the Presence of Mycorrhiza at Wheat Rhizosphere

R. Vahedi and M. H. Rasouli-Sadaghiani^{1*}

(Received: December 5-2018; Accepted: April 9-2019)

Abstract

Synergistic relationships between mycorrhizal fungi (AMF) and organic compounds affect the mobility of the micronutrient elements in the rhizosphere and improve their bioavailability. In order to evaluate the effect of biochar and pruning waste compost of apple and grape trees, as well as AMF, on micronutrient bioavailability in calcareous soil at the wheat rhizosphere, an experiment was carried out in a completely randomized design under greenhouse conditions in a rhizobox study. Some factors including the organic sources (pruning waste biochar, pruning waste compost and control), microbial inoculation (AMF and no inoculation) were considered. 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 and their uptake by wheat plant were determined. The results indicated that OM, Fe, Zn, Mn and Cu were significantly increased in the rhizosphere soil under the influence of organic sources and mycorrhizal inoculation. Furthermore, biochar application in the mycorrhizal treatment resulted in 74.73% and 19.28% increase in Fe and Mn, as compared to non-inoculated conditions, in rhizosphere. The presence of mycorrhizal fungi increased the bioavailability of 94.66% and 29.54% Zn and Cu in the compost treatment, as compared to non-inoculated ones. Application of organic sources and mycorrhizal inoculation increased the micronutrient uptake and plant dry weight.

Keywords: Organic matter, Micronutrient elements, Rhizosphere, Wheat

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

*: Corresponding Author, Email: m.sadaghiani@urmia.ac.ir