برهمکنش قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* روی کارایی مصرف کودهای فسفر، وابستگی میکوریزایی و عملکرد ذرت در شرایط تنش کم آبی

مهدی قورچیانی[۱]، غلامعباس اکبری[۱]، حسینعلی علیخانی[۲*]، مهدی زارعی[۳] و ایرج اله دادی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۳/۱۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۲/۱۳)

چکیده

به منظور بررسی اثر قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* روی کارایی مصرف کودهای فسفر، وابستگی میکوریزایی، عملکرد ماده خشک و عملکرد دانه ذرت در شرایط تنش کم آبی آزمایشی به‌صورت کرت‌های دو بار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی سال ۱۳۸۸ و در دولت آباد کرج اجرا شد. تیمارها عبارت از آبیاری (آبیاری نرمال و تنش ملایم بر مبنای تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A)؛ ترکیبات سطوح مختلف مایه‌زنی بذر با قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* و تیمار کود شیمیایی فسفره (عدم مصرف کود شیمیایی فسفره، مصرف ۵۰٪ کود سوپر فسفات تریپل مورد نیاز و مصرف خاک فسفات براساس کمیت فسفر مصرفی از منبع سوپر فسفات تریپل) بودند. نتایج نشان داد که اثر آبیاری، سطوح مایه‌زنی بذر با قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* و کود شیمیایی فسفر روی عملکرد، اجزای عملکرد، عملکرد ماده خشک، بازده زراعی نسبی و کلنیزاسیون ریشه معنی‌دار است. تیمار تنش ملایم نسبت به تیمار آبیاری نرمال باعث کاهش معنی‌دار عملکرد دانه، بازده زراعی نسبی و بازده زراعی کود شد. نتایج نشان داد که در شرایط تنش ملایم عملکرد دانه و عملکرد ماده خشک با کلنیزاسیون ریشه هم‌بستگی بالایی دارند. هم‌چنین بیشترین وابستگی میکوریزایی از تیمار تنش ملایم به‌دست آمد. حداکثر بازده زراعی نسبی، بازده زراعی کود و عملکرد دانه مربوط به تیمار مایه‌زنی توأم بذر با میکوریز آربسکولار و *سودوموناس فلورسنس* بود. مصرف کود سوپرفسفات تریپل نسبت به خاک فسفات همراه با ریزموجودات حل‌کننده فسفات باعث افزایش عملکرد دانه ذرت گردید، با این‌حال حداکثرکلنیزاسیون ریشه و وابستگی میکوریزایی از تیمار عدم مصرف کود شیمیایی به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: بازده زراعی کود، باکتری *سودوموناس فلورسنس*، ذرت، قارچ میکوریز آربسکولار، وابستگی میکوریزایی

۱ گروه زراعت و اصلاح نباتات، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲. گروه مهندسی علوم خاک و آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۳. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: halikhan@ut.ac.ir

مقدمه

ذرت یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی است، که دارای سهم ۷۰-۶۵ درصدی در ترکیب جیره غذایی طیور و علوفه سیلویی برای تغذیه دام در کشور ایران است (۴). کمربند کشت ذرت در دنیا به‌دلیل ویژگی‌های خاص این گیاه مانند چهار کربنه بودن و گرماپسندی آن تطابق نزدیکی با مناطق خشک و نیمه خشک دارد (۶). از این رو خطر خشک‌سالی میزان تولید ذرت را از سالی به سال دیگر دچار نوسانات گسترده‌ای در سطح محلی، منطقه‌ای و جهانی کرده است. این امر موجب افزایش قیمت‌ها و کمبود مواد غذایی گشته است (۱۴). هم‌چنین از آنجایی که بیش از نیمی از مناطق کشت ذرت در سراسر جهان را مناطق گرمسیری دارای خاک‌های آهکی تشکیل می‌دهند و در این مناطق علاوه بر رطوبت (۱۷)، کمبود فسفر قابل جذب نیز از عوامل مهم محدودکننده رشد این گیاه می‌باشد (۱۵). از این رو مقادیر بالایی از نهاده‌های شیمیایی برای افزایش عملکرد ذرت مصرف می‌شود. استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی فسفر نه تنها بار مالی زیادی را به کشاورز تحمیل می‌کند بلکه باعث آلودگی محیط به‌خصوص آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌گردد (۸).

با توجه به روند طولانی مدت تغییرات آب و هوایی جهان و گسترش تولید ذرت در مناطق خشک و نیمه خشک، سیستم‌های کشاورزی با نهاده کم به‌دلیل علاقه فزاینده به حفاظت منابع طبیعی، کاهش تخریب زیست محیطی و افزایش هزینه کودها، به‌ویژه به منظور تولید در کشورهای در حال توسعه مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته است. اما هرچند ذرت یکی از میزبانان مؤثر میکوریز آربسکولار در شرایط کمبود آب و عناصر غذایی می‌باشد، ولی بررسی‌های اندکی روی ذرت در زمینه برآورد امکان همزیستی میکوریز آربسکولار در افزایش تحمل به خشکی و شرایط کمبود عناصر غذایی انجام گرفته است (۱۴). با توجه به این‌که قارچ میکوریز آربسکولار جایگاه منحصر به فردی را از نظر بوم‌شناسی در محیط داخل و خارج ریشه به خود اختصاص داده است و بخش عمده‌ای از زیتوده خاک را در اختیار گرفته و با بخش‌های زنده و ژئوشیمیایی زیست بوم در ارتباط می‌باشد. از این رو می‌تواند توانایی گیاهان را در سازگار شدن برای مواجهه با تنش‌های غیر زنده ایجاد شده توسط کمبود عناصر غذایی، تنش های زیان آور شوری و خشکی افزایش دهد (۸). کاهش اثرات تنش خشکی توسط مایه‌زنی گیاهان زراعی با قارچ میکوریز آربسکولار در گیاهانی مانند پیاز، ذرت و گندم توسط برخی از محققان گزارش شده است (۹، ۱۰، ۱۳و ۲۶). بومسما و وین (۱۴) گزارش کردند که کاربرد قارچ میکوریز آربسکولار با استفاده از تغییر روبط آب گیاه و کاهش اثرات ناشی از تنش خشکی و هم‌چنین افزایش زیست فراهمی عناصر غذایی در شرایط حاصل‌خیزی پایین خاک می‌تواند باعث افزایش عملکرد دانه ذرت گردد.

باکتری‌های حل‌کننده فسفات، نیز به نوبه خود به‌دلیل فعالیت‌های چندگانه‌شان در بهبود وضعیت تغذیه‌ای خاک، ترشح مواد تنظیم‌کننده رشد گیاه و جلوگیری از بروز بیماری‌های ایجاد شده توسط پاتوژن‌های خاک-زاد به‌عنوان مهم‌ترین کودهای زیستی شناخته می‌شوند (۴ و ۳۱) هم‌چنین بسیاری از این باکتری‌های نظیر گونه *سودوموناس فلورسنس* به‌عنوان ریزوباکتری‌های تحریک‌کننده رشد گیاه نیز مطرح می‌باشند (۱۲)، و حتی برخی از این باکتری‌ها توانایی بهبود توسعه میکوریزی را به‌عنوان باکتری های مددکار میکوریز دارا هستند (۱۹). از طرفی نیز کاربرد باکتری‌های حل‌کننده فسفات ضمن کاهش میزان مصرف و افزایش کارایی کودهای شیمیایی سبب افزایش رشد گیاهان به واسطه افزایش جذب فسفر می‌شوند (۷). به نظر می‌رسد با توجه به تحقیقات انجام شده استفاده از این باکتری‌های حل‌کننده فسفات و قارچ میکوریز آربسکولار به‌عنوان زاد مایه زیستی می‌تواند فسفر قابل جذب خاک را افزایش دهد و به استفاده حداقل از کودهای شیمیایی فسفر کمک کند و در نتیجه آلودگی‌های زیست محیطی را نیز کاهش و اهداف کشاورزی پایدار را محقق سازد. بنابراین با توجه به نقش این ریزموجودات حل‌کننده فسفات بر افزایش

عملکرد و کارایی مصرف کودهای فسفر در گیاهان زراعی هدف از این آزمایش، بررسی اثرات قارچ میکوریزی و باکتری *سودوموناس فلورسنس* روی میزان کارایی کودهای فسفر، درصد وابستگی میکوریزایی، عملکرد ماده خشک و عملکرد دانه ذرت تحت شرایط تنش کم آبی و کاهش مصرف کودهای شیمیایی فسفر بوده است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال زراعی ۱۳۸۸ در مزرعه تحقیقاتی واقع در دولت آباد کرج با مختصات جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی و ارتفاع ۱۳۱۲ متر از سطح دریا، به‌صورت کرت‌های دو بار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، در سه تکرار به اجرا درآمد. فاکتورهای مورد بررسی در این آزمایش عبارت از: آبیاری در دو سطح (آبیاری پس از۶۰ (آبیاری نرمال) و ۱۲۰ (تنش ملایم) میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاسA)، ترکیبات سطوح مختلف مایه‌زنی بذر با قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* در چهار سطح (کاربرد توأم باکتری *سودوموناس فلورسنس* –قارچ میکوریز آربسکولار، کاربرد قارچ میکوریز آربسکولار، کاربرد باکتری *سودوموناس فلورسنس*، عدم کاربرد باکتری *سودوموناس فلورسنس* – قارچ میکوریز آربسکولار (شاهد)) (۲ و ۳۲) و تیمار کود شیمیایی فسفره در سه سطح (عدم مصرف کود شیمیایی فسفره (شاهد) مصرف ۵۰٪ کود سوپر فسفات تریپل مورد نیاز براساس نتایج آزمون خاک جدول ۱ (به میزان ۳۷/۵ کیلوگرم در هکتار) و مصرف خاک فسفات (به میزان۴۴/۵ کیلوگرم در هکتار) براساس کمیت فسفر مصرفی از منبع سوپر فسفات تریپل) بود. کود سوپرفسفات تریپل و خاک فسفات تغلیظ شده آسفوردی یزد در این بررسی به‌ترتیب دارای ۴۶ و ۳۹ درصد فسفر از منبع P_2O_5 بود.

قبل از کاشت ذرت به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه، نمونه‌برداری از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر به عمل آمد و مشخص گردید که خاک محل آزمایش از سری خاک‌های آهکی کرج و دارای بافت لوم رسی، pH= ۸/۳، قابلیت هدایت الکتریکی ۱/۶۲ دسی زیمنس بر متر و ماده آلی ۰/۷۳ درصد بوده است (جدول۱). عملیات تهیه زمین مطابق عرف منطقه با اجرای یک شخم و دو دیسک عمود بر هم قبل از کاشت اجرا شد. عملیات کاشت در خرداد ماه صورت گرفت و بذور به‌صورت کپه‌ای و با قرار دادن ۲ الی۳ بذر سالم در روی پشته‌های ۷۵ سانتی‌متری و به فاصله ۲۰ سانتی‌متر در روی ردیف کشت، کاشته و در مرحله ۴-۳ برگی تنک شدند. هم‌زمان با کاشت بذرها، بلافاصله کودهای نیتروژن و و پتاسیم بر مبنای آزمون خاک و مطابق با توصیه کودی برای ذرت به‌صورت نواری به خاک داده شد. علاوه بر این کود نیتروژن در نوبت دیگر نیز به‌صورت سرک در اختیار گیاه قرار گرفت. در این آزمایش از بذر ذرت، رقم تری وی کراس ۵۲۴ استفاده شد.

باکتری مورد استفاده در این بررسی از جدایه *سودوموناس فلورسنس* بود، که از بانک ژن گروه مهندسی علوم خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج تهیه شد، بذور پس از قرار گرفتن در سوسپانسیون باکتری با جمعیت 1×10^{8} باکتری زنده و فعال در هر میلی‌لیتر ($CFU\ ml^{-1}$) پس از ۴۸ ساعت در مزرعه کشت شدند. قارچ میکوریزی مورد استفاده در این تحقیق از طریق کشت تله‌ای با گیاه سورگوم و با اسپورهای قارچ *گلوموس موسه* در آزمایشگاه بیولوژی خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج تهیه شد. زاد مایه میکوریزی به‌صورت مخلوطی از اسپور، هیف، ریشه‌های کلنیزه شده گیاه سورگوم و ماسه بادی با مقدار کلنیزاسیون ۷۰ درصد و میانگین اسپور ۱۲ عدد در هر گرم بستره بود، قبل از کاشت حدود پنج تا شش گرم از زاد مایه میکوریزی به ازای هر بذر در حفره کاشت بذور در عمق سه تا چهار سانتی‌متری قرار داده شد.

برای اندازه‌گیری عملکرد و اجزای عملکرد پس از فرارسیدن مرحله رسیدگی فیزیولوژیک دانه، با رعایت حاشیه از هر کرت فرعی فرعی ۱۰ بوته انتخاب و صفات مورد نظر اندازه‌گیری شدند. بازده زراعی نسبی با استفاده از رابطه

جدول۱. نتایج آزمون خاک محل آزمایش

pH	قابلیت هدایت الکتریکی dS/m	ماده آلی (٪)	نیتروژن کل (٪)	فسفر (السن) mg/kg	پتاسیم قابل استفاده mg/kg	کلاس بافت
۸/۳	۱/۶۲	۰/۷۳	۰/۰۷۱	۱۳/۵	۱۲۴	لوم رسی

جاگدیس واران و همکاران (۲۰)، بازده زراعی کود با استفاده از رابطه دورداس و همکاران (۱۸) و درصد وابستگی میکوریزایی با استفاده از رابطه پلانشت و همکاران (۲۴) و درصد ماده خشک گیاه نیز با استفاده از رابطه ایرانی پور و همکاران (۳) محاسبه گردید.

$$\text{بازده زراعی نسبی} = \frac{\text{وزن خشک در تیمار شاهد} - \text{وزن خشک در تیمار مورد نظر}}{\text{وزن خشک در تیمار شاهد} - \text{وزن خشک در سوپر فسفات تریپل}} * 100$$

$$\text{بازده زراعی کود} = \frac{\text{عملکرد دانه در قطعه شاهد} - \text{عملکرد دانه در قطعه کود خورده}}{\text{میزان کود داده‌شده}} * 100$$

$$\text{وابستگی میکوریزی} = \frac{\text{عملکرد دانه میکوریزی نشده} - \text{عملکرد دانه میکوریزی شده}}{\text{عملکرد دانه میکوریزی شده}} * 100$$

$$\text{ماده خشک گیاه} = \frac{\text{وزن خشک نمونه گیاه در دمای 75 درجه سانتی گراد (گرم)}}{\text{وزن تر نمونه گیاه (گرم)}} * 100$$

هم‌چنین برای محاسبه کلنیزاسیون ریشه از ریشه‌های نازک گیاه به اندازه تقریبی یک گرم نمونه‌برداری و به آزمایشگاه منتقل شد و پس از رنگ‌آمیزی با محلول لاکتوگلیسرول-جوهر آبی با روش تقاطع خطوط شبکه (۲۲) کلنیزاسیون ریشه محاسبه شد. داده‌ها با نرم‌افزار SAS تجزیه شدند و مقایسه میانگین‌ها نیز با روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال ۵ درصد توسط نرم‌افزار MSTAT-C محاسبه گردیدند.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس نشان دادند که اثر سطوح آبیاری روی تمام صفات به جز در صفات درصد ماده خشک و بازده زراعی کود معنی‌دار است. اثر مایه‌زنی بذر با قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* در صفات وزن ۳۰۰ دانه، تعداد کل دانه در بلال، عملکرد ماده خشک، عملکرد دانه، بازده زراعی کود و کلنیزاسیون ریشه در سطح احتمال یک درصد و برای بازده زراعی نسبی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود؛ هم‌چنین اثر کود شیمیایی فسفر نشان دادند که اختلاف معنی‌داری بین سطوح مختلف کود شیمیایی فسفر برای تمام صفات وجود دارد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نیز نشان دادند که حداکثر میزان صفات مورد مطالعه از تیمار آبیاری نرمال به‌دست آمد، و تیمار تنش ملایم نسبت به تیمار آبیاری نرمال وزن ۳۰۰ دانه، تعداد کل دانه در بلال، عملکرد ماده خشک، عملکرد دانه، بازده زراعی کود، بازده زراعی نسبی و کلنیزاسیون ریشه را به‌ترتیب به میزان ۱۹/۳، ۲۳/۷، ۱۹/۴، ۱۸/۸، ۲۹/۶، ۱۰/۵ و ۱۸/۵ درصد کاهش داد. تیمار مایه زنی توأم بذر با قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* در تمام صفات مورد بررسی باعث افزایش میزان صفات در مقایسه با کاربرد جداگانه آنها شد و این اختلاف بین کاربرد توأم ریزموجودات و کاربرد جداگانه آنها برای صفات وزن ۳۰۰ دانه، تعداد کل دانه در بلال، عملکرد دانه، عملکرد ماده خشک و کلنیزاسیون ریشه معنی‌دار بود. در کاربرد جداگانه این ریزموجودات نیز کارایی قارچ میکوریز آربسکولار نسبت به باکتری *سودوموناس فلورسنس* بیشتر بود. حداکثر وزن ۳۰۰ دانه، تعداد دانه در بلال، عملکرد ماده خشک، درصد ماده خشک و عملکرد دانه مربوط به تیمار مصرف سوپر فسفات تریپل بود که اختلاف آن با تیمار مصرف خاک فسفات معنی‌دار بود. کاربرد سوپرفسفات تریپل نسبت به خاک فسفات نیز باعث افزایش معنی‌دار بازده زراعی کود شد، هم‌چنین بازده زراعی نسبی خاک فسفات نسبت به سوپرفسفات تریپل ۵۴/۷ درصد بود. با این حال حداکثر کلنیزاسیون ریشه در تیمار عدم استفاده از کودهای شیمیایی فسفر (شاهد) به‌دست آمد و کاربرد کودهای فسفاته باعث کاهش معنی‌داری کلنیزاسیون ریشه شد (جدول ۳).

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس عملکرد، اجزای عملکرد و درصد کلنیزاسیون ریشه تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری، مایه‌زنی با قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* و کود شیمیایی فسفر

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن ۳۰۰ دانه	تعداد کل دانه در بلال	عملکرد ماده خشک	درصد ماده خشک	عملکرد دانه	بازده زراعی کود	بازده نسبی زراعی	کلنیزاسیون ریشه
بلوک	۲	۸۸/۵ns	۱۵۱۱۲/۲*	۰/۸^{ns}	۱۰۷/۴^{ns}	۰/۵^{ns}	۰/۶^{ns}	۵۶/۱^{ns}	۱۶/۷^{ns}
آبیاری (I)	۱	۶۳۳۱/۱**	۲۲۳۹۷۴/۵**	۱۶۷/۹**	۶/۱^{ns}	۴۸/۷**	۱۲/۳*	۵۹۴/۴*	۱۰۶۰*
ریز موجودات حل کننده فسفات (FB)	۳	۷۳۲/۳**	۷۰۱۷۷/۹**	۴۴/۳**	۵۲/۴^{ns}	۱۴/۵**	۶/۹**	۳۷۲/۶*	۳۳۴۳/۴**
FB×I	۳	۶۴/۷*	۳۳۱۲/۱^{ns}	۱/۳^{ns}	۳۲/۵^{ns}	۱/۹*	۰/۷^{ns}	۳۹/۵^{ns}	۶۲/۷*
کودشیمیایی فسفره (P)	۲	۷۲۱/۶**	۵۲۷۳۰/۷**	۵۱/۲**	۸۷/۳*	۲۲/۳**	۱۳۱/۲**	۶۰۱۵۳/۲**	۲۷۴/۳**
I×P	۲	۳/۹^{ns}	۹۹۴۴/۷**	۳/۱*	۱۰۱/۲*	۱/۸*	۵/۷**	۵۹۴/۳**	۶/۷^{ns}
FB×P	۶	۷۰/۶*	۲۰۱۲/۴^{ns}	۰/۵^{ns}	۷۵/۱*	۰/۴^{ns}	۴/۴**	۳۷۲/۶**	۱۹/۲^{ns}
FB×I×P	۶	۲۶/۵^{ns}	۱/۰^{ns}	۱/۱^{ns}	۳۷/۳^{ns}	۰/۷^{ns}	۰/۷	۳۹/۵^{ns}	۷/۶^{ns}
خطا	۳۲	۲۱/۲	۱۶۲۱	۰/۱	۲۷/۹	۰/۵	۰/۷	۹۲/۴	۱۱/۸
ضریب تغییرات٪	–	۵/۳	۹/۷	۵/۹	۹/۳	۹/۴	۳۶/۸	۱۸/۷	۹/۱

**، * و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪ و غیرمعنی‌دار

جدول ۳. نتایج مقایسه میانگین عملکرد، اجزای عملکرد و درصد کلنیزاسیون ریشه تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری، مایه‌زنی با قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* و کود شیمیایی فسفر

تیمار	میانگین مربعات							
	وزن ۳۰۰ دانه (گرم)	تعداد کل دانه در بلال	عملکرد ماده خشک (تن درهکتار)	درصد ماده خشک	عملکرد دانه (تن درهکتار)	بازده زراعی کود (درصد)	بازده نسبی زراعی (درصد)	کلنیزاسیون ریشه (درصد)
آبیاری (I)								
آبیاری نرمال	۹۵/۵^{a}	۴۶۹/۴^{a}	۱۵/۵^{a}	۵۷/۳^{a}	۸/۵^{a}	۲/۷^{a}	۵۴/۳^{a}	۴۱/۷^{a}
کم آبیاری	۷۷/۱^{b}	۳۵۷/۹^{b}	۱۲/۵^{b}	۵۶/۷^{a}	۶/۹^{b}	۱/۹^{a}	۴۸/۶^{b}	۳۴/۰^{b}
ریزموجودات حل کننده فسفات (FB)								
شاهد	۷۸/۷^{a}	۳۳۴/۳^{c}	۱۲/۲^{d}	۳۳۴/۳^{c}	۶/۷^{d}	۱/۶^{c}	۴۵/۲^{b}	۱۹/۴^{d}
باکتری *سودوموناس فلورسنس*	۸۴/۰^{b}	۴۰۵/۷^{b}	۱۳/۴^{c}	۴۰۵/۷^{b}	۷/۳^{c}	۱/۹^{bc}	۵۱/۱^{ab}	۳۶/۳^{c}
قارچ میکوریز آربسکولار	۸۹/۲^{c}	۴۲۹/۹^{b}	۱۴/۶^{b}	۴۲۹/۹^{b}	۸/۰^{b}	۲/۶^{ab}	۵۳/۷^{a}	۴۵/۷^{b}
کاربرد توام باکتری وقارچ	۹۳/۴^{d}	۴۸۴/۹^{a}	۱۵/۸^{a}	۴۸۴/۹^{a}	۸/۸^{a}	۲/۹^{a}	۵۵/۷^{a}	۵۰/۱^{a}
کود شیمیایی فسفره (P)								
شاهد	۸۰/۳^{c}	۳۷۲/۴^{c}	۱۲/۷^{c}	۳۷۲/۴^{c}	۶/۸^{c}	–[۱]	-	۴۱/۵^{a}
سوپرفسفات تریپل	۹۱/۰^{a}	۴۶۴/۶^{a}	۱۵/۶^{a}	۴۶۴/۶^{a}	۸/۷^{a}	۴/۶^{a}	۱۰۰^{a}	۳۴/۹^{c}
خاک فسفات	۸۷/۶^{b}	۴۰۴/۰^{b}	۱۳/۸^{b}	۴۰۴/۰^{b}	۷/۶^{b}	۲/۱^{b}	۵۴/۷^{b}	۳۷/۲^{b}

در هرستون، میانگین‌های دارای حروف لاتین مشابه فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ می باشند.

[۱]- داده‌هایی که با – نشان داده شده به‌علت عدم مصرف کود فسفر قابل محاسبه نبودند.

نتایج تجزیه واریانس بر همکنش سطوح آبیاری و مایه‌زنی بذر با قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* نشان دادند که تنها در صفات وزن ۳۰۰ دانه، عملکرد دانه و کلنیزاسیون ریشه اختلاف آماری معنی‌دار وجود دارد (جدول ۲). بیشترین میزان عملکرد دانه، وزن ۳۰۰ دانه و کلنیزاسیون ریشه در هر دو شرایط آبیاری نرمال و تنش ملایم مربوط به مایه‌زنی توأم بذر با قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* بود (جدول ۴). هر چند اثر برهمکنش سطوح آبیاری و مایه‌زنی بذر با این ریزموجودات برای صفات بازده زراعی کود، بازده زراعی نسبی معنی‌دار نشد (جدول ۲)، اما نتایج مقایسه میانگین نشان دادند که کاربرد توأم این ریزموجودات حل‌کننده فسفات نسبت به کاربرد جداگانه آنها در هر دو شرایط تنش و آبیاری نرمال باعث افزایش بازده زراعی کود و بازده زراعی نسبی شده است.

اثر بر همکنش کود شیمیایی فسفر و آبیاری در تمام صفات به جز در صفات وزن ۳۰۰ دانه و کلنیزاسیون ریشه معنی‌دار بود (جدول ۲) و حداکثر میانگین این صفات نیز مربوط به تیمار آبیاری نرمال به همراه مصرف کود سوپر فسفات تریپل بود. هم‌چنین در شرایط کم آبیاری نیز استفاده از کود سوپر فسفات تریپل نسبت به خاک فسفات بهتر بود (جدول ۴). بازده زراعی نسبی خاک فسفات نیز نسبت به سوپرفسفات تریپل به میزان ۳۷/۱ درصد در شرایط آبیاری نرمال و به میزان ۵۴/۳ درصد در شرایط تنش ملایم کمتر بود (جدول ۴).

اثر بر همکنش کود شیمیایی فسفر و مایه‌زنی بذر با قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* تنها برای صفات وزن ۳۰۰ دانه و درصد ماده خشک درسطح احتمال پنج درصد و برای صفات بازده زراعی کود و بازده زراعی نسبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲)، بیشترین میانگین این صفات نیز مربوط به تیمار مایه‌زنی توأم بذر با قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* به همراه مصرف کود سوپر فسفات تریپل بود (جدول ۴). بازده زراعی کود سوپرفسفات تریپل در تمام تیمارهای ریزموجودات حل‌کننده فسفات به‌صورت کاربرد توأم و جداگانه نسبت به بازده زراعی کود خاک فسفات بیشتر بود، با این حال نتایج نشان دادند که بازده زراعی نسبی خاک فسفات در شرایط کاربرد توأم قارچ میکوریز و باکتری *سودوموناس فلورسنس* کمترین اختلاف (۳۲/۸ درصد) را با بازده زراعی سوپرفسفات تریپل داشته است (جدول ۴).

بررسی هم‌بستگی ساده بین صفات نشان داد که عملکرد دانه در هر دو شرایط آبیاری نرمال و تنش ملایم هم‌بستگی مثبت و معنی‌داری با صفات وزن ۳۰۰ دانه، تعداد کل دانه در بلال، عملکرد ماده خشک، و کلنیزاسیون ریشه دارد. بیشترین هم‌بستگی عملکرد دانه در شرایط آبیاری نرمال با عملکرد ماده خشک (۰/۹۷**) و تعداد کل دانه در بلال (۰/۶۵**) و در شرایط تنش ملایم نیز با عملکرد ماده خشک (۰/۹۶**) و وزن ۳۰۰ دانه (۰/۶۳**) به‌دست آمد (جدول ۵).

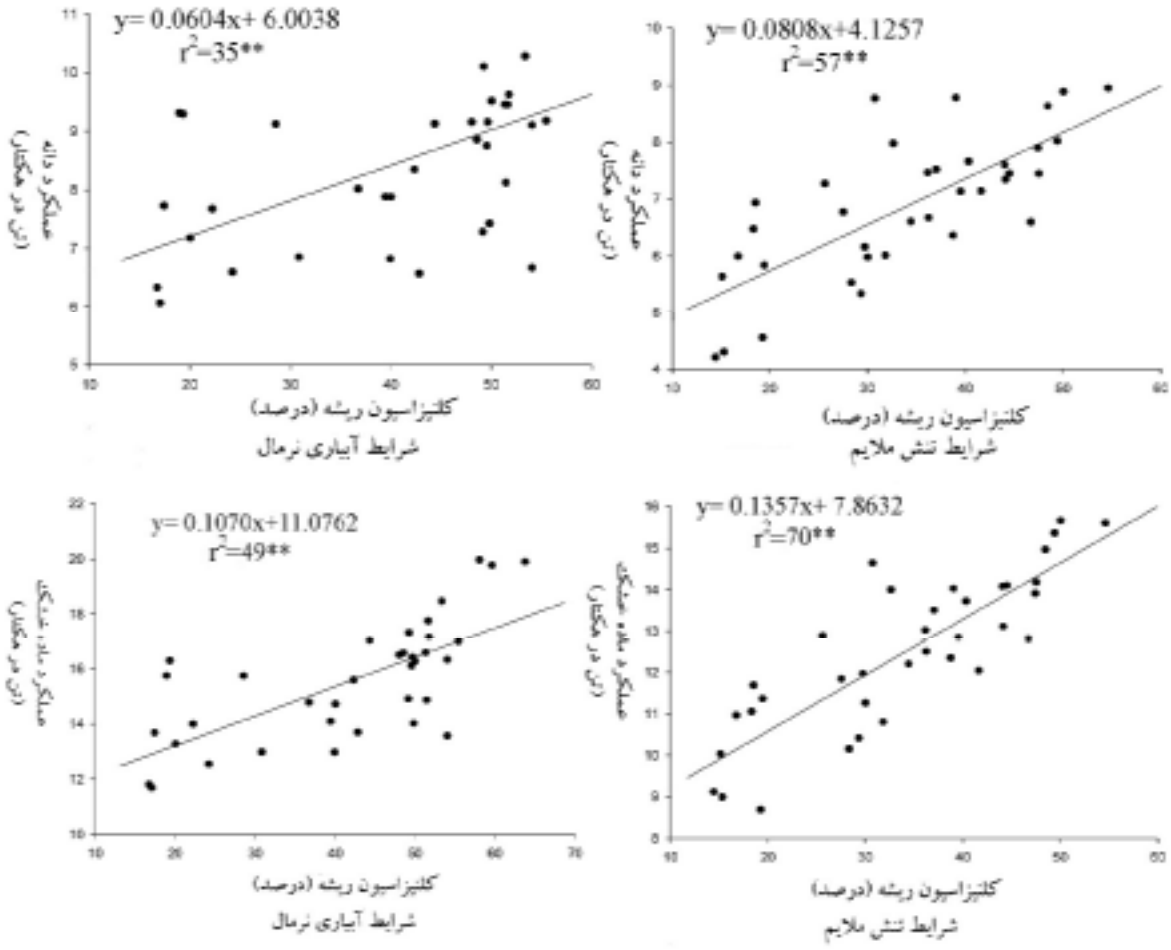
شکل ۱ بیانگر رابطه عملکرد دانه و عملکرد ماده خشک با کلنیزاسیون ریشه تحت شرایط آبیاری نرمال و تنش ملایم است. در کل نتایج به‌دست آمده از شکل ۱ نشان می‌دهد که عملکرد دانه و عملکرد ماده خشک تحت شرایط تنش ملایم نسبت به شرایط آبیاری نرمال رابطه بیشتری با کلنیزاسیون ریشه دارند. و در این بین نیز در هر دو شرایط آبیاری نرمال و تنش ملایم، رابطه عملکرد ماده خشک با کلنیزاسیون ریشه بیشتر از رابطه عملکرد دانه با کلنیزاسیون ریشه بوده است.

وابستگی میکوریزایی تحت شرایط آبیاری نرمال نسبت به شرایط تنش ملایم ۶۷/۰۷ درصد کاهش یافت (شکل ۲). از این رو می‌توان چنین استنباط کرد که عملکرد دانه ذرت در شرایط تنش خشکی وابستگی بیشتری به همزیستی میکوریزی نسبت به شرایط آبیاری نرمال دارد. هم‌چنین نتایج به‌دست آمده نشان داد که وابستگی میکوریزایی در تیمار واجد کاربرد سوپرفسفات تریپل نسبت به تیمار خاک فسفات و شاهد به‌ترتیب به میزان ۱۱/۸۷ و ۵۳/۸۷ درصد کمتر بود (شکل ۲).

جدول ۴. نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل صفات اندازه‌گیری شده در بررسی برهمکنش قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* روی کارایی مصرف کودهای فسفر، وابستگی میکوریزایی و عملکرد ذرت در شرایط تنش کم آبی

تیمار	میانگین مربعات								
	وزن ۳۰۰ دانه (گرم)	تعداد کل دانه در بلال	عملکرد ماده خشک (تن در هکتار)	درصد ماده خشک	عملکرد دانه (تن در هکتار)	بازده زراعی کود (درصد)	بازده نسبی زراعی (درصد)	کلنیزاسیون ریشه (درصد)
FB×I								
F0B0×I1	۸۷/۸^{b}	۳۷۷/۲^{cd}	۱۳/۸^{d}	۵۷/۴^{a}	۷/۷^{bc}	۱/۷^{ab}	۴۷/۹^{ab}	۲۰/۶^{e}
F0B1×I1	۹۴/۴^{a}	۴۷۰/۹^{b}	۱۴/۹^{c}	۵۶/۰^{a}	۸/۱^{bc}	۲/۴^{ab}	۵۶/۰^{a}	۴۱/۸^{c}
F1B0×I1	۱۰۰/۰^{a}	۴۷۵/۳^{b}	۱۵/۷^{b}	۵۷/۷^{a}	۸/۴^{b}	۳/۲^{a}	۵۶/۱^{a}	۵۰/۴^{ab}
F1B1×I1	۱۰۰/۲^{a}	۵۵۴/۴^{a}	۱۷/۶^{a}	۵۸/۱^{a}	۹/۹^{a}	۳/۳^{a}	۵۷/۲^{a}	۵۴/۱^{a}
F0B0×I2	۶۹/۶^{d}	۲۹۱/۴^{e}	۱۰/۵^{f}	۵۶/۶^{a}	۵/۷^{e}	۱/۴^{b}	۴۲/۵^{b}	۱۸/۲^{e}
F0B1×I2	۷۳/۸^{cd}	۳۴۰/۴^{de}	۱۱/۹^{e}	۵۴/۳^{a}	۶/۶^{d}	۱/۵^{b}	۴۶/۲^{ab}	۳۰/۸^{d}
F1B0×I2	۷۸/۴^{c}	۳۸۴/۵^{cd}	۱۳/۴^{d}	۶۰/۹^{a}	۷/۶^{c}	۱/۹^{ab}	۵۱/۳^{ab}	۴۱/۰^{c}
F1B1×I2	۸۶/۸^{b}	۴۱۵/۴^{bc}	۱۴/۱^{d}	۵۵/۱^{a}	۷/۸^{bc}	۲/۵^{ab}	۵۴/۳^{a}	۴۶/۲^{b}
P×I								
P0×I1	۸۹/۱^{b}	۴۱۵/۲^{c}	۱۴/۰^{c}	۵۴/۱^{b}	۷/۵^{c}	−۱	–	۴۶/۰^{a}
P1×I1	۱۰۰/۷^{a}	۵۴۳/۹^{a}	۱۷/۵^{a}	۶۱/۶^{a}	۹/۹^{a}	۵/۶^{a}	۱۰۰^{a}	۳۸/۴^{bc}
P2×I1	۹۶/۹^{a}	۴۴۹/۲^{b}	۱۵/۱^{b}	۵۶/۲^{b}	۸/۲^{b}	۲/۴^{c}	۶۲/۹^{b}	۴۰/۷^{b}
P0×I2	۷۱/۵^{d}	۳۲۹/۵^{e}	۱۱/۳^{f}	۵۶/۳^{b}	۶/۲^{e}	–	–	۳۷/۱^{c}
P1×I2	۸۱/۴^{c}	۳۸۵/۴^{d}	۱۳/۶^{d}	۵۶/۳^{b}	۷/۶^{c}	۳/۷^{b}	۱۰۰^{a}	۳۱/۴^{d}
P2×I2	۷۸/۴^{c}	۳۵۸/۸^{de}	۱۲/۵^{e}	۵۷/۵^{ab}	۶/۹^{d}	۱/۸^{c}	۴۵/۷^{c}	۳۳/۷^{d}
P×FB								
P0×F0B0	۷۵/۸^{fg}	۳۰۱/۰^{f}	۱۰/۶^{g}	۵۱/۸^{b}	۵/۶^{f}	–	–	۲۱/۰^{f}
P1×F0B0	۸۱/۱^{ef}	۳۷۸/۵^{de}	۱۳/۶^{e}	۵۶/۹^{ab}	۷/۷^{d}	۳/۰^{c}	۱۰۰^{a}	۱۸/۰^{f}
P2×F0B0	۷۹/۳^{fg}	۳۲۳/۳^{ef}	۱۲/۴^{f}	۵۱/۷^{b}	۶/۸^{e}	۱/۷^{d}	۳۵/۷^{d}	۱۹/۱^{f}
P0×F0B1	۷۴/۹^{g}	۳۵۵/۸^{def}	۱۲/۱^{f}	۵۳/۸^{ab}	۶/۶^{e}	–	–	۴۱/۰^{d}
P1×F0B1	۸۷/۸^{cd}	۴۶۵/۹^{ab}	۱۵/۱^{c}	۵۷/۲^{ab}	۸/۴^{bc}	۴/۳^{b}	۱۰۰^{a}	۳۳/۱^{e}
P2×F0B1	۸۹/۶^{bcd}	۳۹۵/۳^{cd}	۱۳/۱^{e}	۵۸/۵^{ab}	۷/۰^{e}	۱/۶^{d}	۵۳/۴^{c}	۳۴/۸^{e}
P0×F1B0	۸۵/۳^{de}	۳۷۵/۱^{de}	۱۳/۴^{e}	۵۵/۱^{ab}	۷/۷^{d}	–	–	۴۸/۲^{b}
P1×F1B0	۹۳/۸^{b}	۵۰۳/۵^{a}	۱۵/۹^{b}	۶۱/۱^{a}	۸/۸^{b}	۴/۸^{b}	۱۰۰^{a}	۴۲/۹^{cd}
P2×F1B0	۸۸/۸^{bcd}	۴۱۱/۰^{bcd}	۱۴/۴^{d}	۵۸/۳^{ab}	۸/۰^{cd}	۲/۲^{cd}	۶۱/۱^{bc}	۴۶/۱^{bc}
P0×F1B1	۸۵/۴^{de}	۴۵۷/۵^{abc}	۱۴/۵^{d}	۵۶/۶^{ab}	۷/۸^{d}	–	–	۵۶/۰^{a}
P1×F1B1	۱۰۱/۷^{a}	۵۱۰/۶^{a}	۱۷/۷^{a}	۶۲/۲^{a}	۱۰/۰^{a}	۶/۶^{a}	۱۰۰^{a}	۴۵/۶^{bc}
P2×F1B1	۹۳/۲^{b}	۴۸۶/۵^{a}	۱۵/۳^{c}	۶۰/۸^{a}	۸/۵^{b}	۳/۱^{c}	۶۷/۲^{b}	۴۸/۹^{b}

I: سطوح آبیاری، آبیاری نرمال (I1)، تنش ملایم (I2)؛ FB: سطوح مایه‌زنی بذر با قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس*، کاربرد توام باکتری *سودوموناس فلورسنس*– قارچ میکوریز آربسکولار (F1B1)، کاربرد قارچ میکوریز آربسکولار (F1B0)، کاربرد باکتری *سودوموناس فلورسنس* (F0B1)، شاهد (F0B0)؛ P: سطوح کود شیمیایی فسفره، شاهد (P0)، مصرف ۵۰ ٪ کود سوپر فسفات تریپل مورد نیاز براساس نتایج آزمون خاک (P1)، مصرف خاک فسفات براساس کمیت فسفر مصرفی از منبع سوپر فسفات تریپل (P2). در هرستون، میانگین‌های دارای حروف لاتین مشابه فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ می‌باشند. ۱– داده‌هایی که با – نشان داده شده به‌علت عدم مصرف کود فسفر قابل محاسبه نبودند.



شکل ۱. رابطه بین عملکرد دانه و عملکرد ماده خشک با کلنیزاسیون ریشه در شرایط آبیاری نرمال و تنش ملایم

شکل ۲. درصد وابستگی میکوریزایی در سطوح مختلف آبیاری (سمت چپ) و در سطوح مختلف کود شیمیایی فسفر (سمت راست)

بحث

علت کاهش عملکرد دانه در این بررسی بیشتر مربوط به کاهش تعداد دانه در بلال بود (جدول ۵)، در واقع می‌توان اظهار داشت که تنش خشکی از طریق تغییر در اجزای عملکرد باعث کاهش عملکرد دانه می‌گردد (۶). این یافته‌ها مطابق با یافته‌های سایر محققان در زمینه کاهش عملکرد دانه ذرت تحت تأثیر شرایط تنش رطوبتی بود (۱۱ و ۲۷). نتایج به‌دست آمده از این بررسی نشان دادند که مایه‌زنی توأم بذر با قارچ میکوریز

جدول ۵. نتایج هم‌بستگی ساده بین عملکرد، اجزای عملکرد دانه، عملکرد ماده خشک با کلنیزاسیون ریشه تحت شرایط آبیاری کامل (روی قطر) و تنش ملایم (زیر قطر)

	وزن ۳۰۰ دانه	تعداد کل دانه	عملکرد ماده خشک	عملکرد دانه	کلنیزاسیون ریشه
وزن ۳۰۰ دانه	۱	۰/۵۲**	۰/۶۹**	۰/۶۴**	۰/۶۶**
تعداد کل دانه	۰/۶۱**	۱	۰/۷۱**	۰/۶۵**	۰/۶۸**
عملکرد ماده خشک	۰/۷۲**	۰/۷۲**	۱	۰/۹۷**	۰/۷۰**
عملکرد دانه	۰/۶۳**	۰/۶۱**	۰/۹۶**	۱	۰/۵۹**
کلنیزاسیون ریشه	۰/۷۱**	۰/۷۷**	۰/۸۴**	۰/۷۵**	۱

**، * و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪ و غیرمعنی‌دار

آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* نسبت به تیمارهای مایه‌زنی جداگانه توسط این ریزموجودات، یک اثر هم افزایی مثبت داشته و منجر به افزایش بیشتر عملکرد و اجزای عملکرد شده است (جدول ۳). افزایش وزن هزار دانه و تعداد دانه در بلال با استفاده از کاربرد توأم باکتری *سودوموناس فلورسنس* و قارچ میکوریزآربسکولار روی ذرت توسط احتشامی و همکاران (۲) گزارش شده است. رضوان بیدختی و همکاران (۵) در بررسی خود در گیاه گندم اظهار داشتند که فسفر یکی از عناصر اصلی مورد نیاز گیاه بوده و در تشکیل گل و دانه‌بندی اهمیت زیادی دارد و وجود باکتری‌های تسهیل‌کننده جذب فسفر سبب استفاده بهتر گیاه از فسفر غیرقابل جذب خاک شده و نشان‌دهنده این موضوع است که تأمین فسفر کافی سبب افزایش تعداد دانه می‌گردد.

از طرفی قارچ میکوریز آربسکولار نیز جذب عناصر غذایی، به‌ویژه فسفر و عناصر ریز مغذی نظیر روی و مس را بهبود می‌بخشد و باعث تحریک رشد و کاهش اثرات تنش‌های محیطی روی گیاه میزبان می شود (۲۵) به‌علاوه قارچ میکوریز آربسکولار قادر است از طریق افزایش زیتوده ساقه در مرحله قبل از گلدهی به‌دلیل افزایش زیست فراهمی و جذب عناصر غذایی توسط هیف‌ها و یا بهبود رشد ریشه و در نتیجه افزایش ظرفیت فتوسنتزی در دوره قبل از گلدهی، در مرحله پس از گلدهی با انتقال مجدد این مواد فتوسنتزی از منبع به مخزن عملکرد دانه در ذرت را بهبود ببخشد (۱۴). هم‌چنین نتایج این آزمایش نشان دادند که قارچ میکوریز آربسکولار در کنترل شرایط تنش رطوبتی نسبت به باکتری *سودوموناس فلورسنس* از مزیت نسبی بیشتری برخوردار بوده است. این مطلب را می‌توان این گونه توضیح داد که میسیلیوم‌ها و هیف‌های قارچ میکوریز آربسکولار حجم وسیعی از خاک را در اختیار گیاه میزبان قرار می‌دهند در نتیجه زیست فراهمی آب و عناصر غذایی را افزایش داده و اثرات تنش رطوبتی را تعدیل می‌کنند (۱۴). ویدادا و همکاران (۳۲) نیز بیان داشتند که کاربرد قارچ میکوریز آربسکولار نسبت به باکتری *سودوموناس فلورسنس* در افزایش ماده خشک و عملکرد سورگوم از کارایی بیشتری برخوردار بوده است.

به‌طورکلی نتایج جدول ۴ در رابطه با اثر مایه‌زنی بذر با قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* به همراه مصرف کودهای شیمیایی فسفر نشان دادند که کارایی ریزموجودات حل‌کننده فسفات در افزایش عملکرد دانه به همراه کود سوپر فسفات تریپل نسبت به خاک فسفات بیشتر بوده است. از آن جایی که فسفر نقش مؤثری در فاز زایشی گیاه ذرت دارد، زیست فراهمی بیشتر فسفات در حضور باکتری‌های *سودوموناس فلورسنس* و قارچ میکوریز آربسکولار باعث افزایش عملکرد و اجزای عملکرد می‌شود. نتایج به‌دست آمده از بررسی بسیاری از محققین نظیر اختر و سیدیکویی (۸)، بیاری و همکاران (۱۲)، ویاز وگولاتی (۳۱) و تانگ و همکاران (۲۹) همگی حاکی از افزایش عملکرد گیاهان زراعی، با کاربرد

ریزموجودات حل‌کننده فسفات بود که با نتایج حاصل از این تحقیق مطابقت داشت. در این بررسی اختلاف کمی بین افزایش عملکرد دانه و عملکرد ماده خشک ذرت در تیمار کاربرد توأم ریزموجودات حل‌کننده فسفات به همراه کود سوپرفسفات تریپل در مقایسه با خاک فسفات وجود داشت. به هر حال این مطلب احتمالاً می‌تواند بیانگر این موضوع باشد که ریزموجودات حل‌کننده فسفات در این بررسی توانایی کمتری در انحلال خاک فسفات داشته‌اند، که نتایج حاصل از برآورد بازده زراعی کود و بازده زراعی نسبی نیز مؤید این امر می‌باشند. با وجود این مطلب روند مشابهی در اثر هم‌افزایی مثبت کاربرد توأم ریزموجودات حل‌کننده فسفات در مقایسه با کاربرد جداگانه این ریزموجودات در افزایش بازده زراعی کود و بازده زراعی نسبی در تیمار واجد خاک فسفات مشاهده گردید.

تحقیقات حاکی از آن است که با استفاده از ریزموجودات حل‌کننده فسفات کارایی مصرف کودهای فسفر افزایش می‌یابد (۱۶و۳۳). راندمان مصرف کود بالا به‌وسیله گیاهان، هزینه‌های نهاده کودی و شدت تلفات عناصر غذایی را کاهش و عملکرد محصول را افزایش می‌دهد (۷). ابدالی (۱) بیان داشت که بیشترین میزان عملکرد دانه در شرایط کاربرد قارچ میکوریز آربسکولار و استفاده از سطح متوسط فسفر (۴۵ کیلوگرم در هکتار) به‌دست می‌آید، و در سطوح مصرف بالای کود فسفر، عملکرد دانه کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد در تغذیه بهینه گیاه آنچه حائز اهمیت است، مصرف مقدار متعادلی از عناصر غذایی مورد نیاز در منطقه گسترش ریشه‌ها می‌باشد. در شرایطی که میزان عناصر در منطقه توسعه ریشه، جهت نقل و انتقال مواد به گیاه در حد مطلوبی باشد مواد تولید شده در فرآیند فتوسنتز کمیت و کیفیت لازم در محصول را داشته و میزان کارایی مصرف کود نیز معقول خواهد بود (۲۰). در همین راستا یزدانی و همکاران (۷) بیان داشتند که بالاترین بازده زراعی کود فسفر مربوط به تیمار مصرف نهاده کافی به همراه کود زیستی بوده است و این تیمار نسبت به تیمار مصرف کود شیمیایی فسفر موجب افزایش بازده زراعی کود فسفر شده است.

کلنیزاسیون ریشه در این بررسی در شرایط تنش خشکی نسبت به شرایط آبیاری نرمال ۱۸/۵ درصد کاهش یافت (جدول ۳). اما کاربرد قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* به‌صورت توأم و جداگانه در شرایط تنش ملایم باعث افزایش کلنیزاسیون ریشه نسبت به تیمار عدم مایه‌زنی با این ریزموجودات شد. ال-کراکی و همکارن (۹) نیز در بررسی شان در گیاه گندم مشاهده کردند که درصد کلنیزاسیون ریشه در مایه‌زنی با *گلوموس موسه* تحت شرایط آبیاری نرمال نسبت به شرایط تنش آبی در هر سه مرحله پنجه‌زنی، خوشه رفتن و پر شدن دانه بیشتر می باشد. احتشامی و همکاران (۲) گزارش کردند که استفاده از زادمایه میکوریزی سبب افزایش کلنیزاسیون ریشه می‌شود اما استفاده از زادمایه باکتری *سودوموناس فلورسنس* باعث کاهش معنی دار کلنیزاسیون ریشه نسبت به تیمار شاهد شده است، هم چنین آنها مشاهده کردند که برهمکنش قارچ و باکتری باعث افزایش کلنیزاسیون ریشه شده است.

با وجود عدم معنی‌داری اثر متقابل کود فسفره و قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* برای صفت کلنیزاسیون ریشه، بیشترین و کمترین میزان کلنیزاسیون ریشه به‌ترتیب از تیمار شاهد و تیمار مصرف بهینهٔ کود سوپرفسفات تریپل و کاربرد توأم ریز موجودات حل‌کننده فسفات به‌دست آمد (جدول ۴). جاوید (۲۱) نشان داد که کلنیزاسیون ریشه و اجزای قارچ در سیستم‌های کوددهی شده با سوپرفسفات تریپل کاهش می‌یابد، ولی کاربرد خاک فسفات باعث کاهش ناچیز کلنیزاسیون ریشه و اجزای قارچ میکوریزی می‌گردد. در رابطه با کلنیزاسیون ریشه نیز به نظر می‌رسد در سیستم‌های زراعی، مصرف بالای نهاده‌های شیمیایی با کاهش یا تغییر اختصاص منابع به شریک قارچی باعث کاهش کلنیزاسیون ریشه می‌شود (۲۵) بدین صورت که گیاه میزبان تخصیص منابع را به ریشه‌هایش کاهش می‌دهد و در نتیجه رقابت برای منابع کربن محدود شده افزایش می‌یابد، که یکی از تأثیرات آن کاهش کلنیزاسیون ریشه گیاه میزبان است (۳۰).

درصد وابستگی میکوریزایی در این بررسی نشان داد که عملکرد دانه ذرت تحت شرایط تنش خشکی وابستگی بیشتری به همزیستی میکوریزی نسبت به شرایط آبیاری نرمال دارد. هم‌بستگی بیشتر کلنیزاسیون ریشه با عملکرد دانه و عملکرد ماده خشک در شرایط تنش ملایم نسبت به شرایط آبیاری نرمال می‌تواند مؤید این امر باشد (شکل ۱). این نتایج با نتایج به‌دست آمده از مطالعه سوبرامانیان و همکاران (۲۸) و بلندنظر و همکاران (۱۳) که بیشتر بودن وابستگی میکوریزایی در شرایط تنش را گزارش نمودند، مطابقت داشت. هم‌چنین نتایج به‌دست آمده نشان داد که مصرف سوپرفسفات تریپل نسبت به خاک فسفات و شاهد باعث کاهش وابستگی میکوریزایی می‌گردد، به نظر می‌رسد نتایج شکل ۲ به خوبی بیانگر تأثیر منفی مصرف کود شیمیایی فسفره در رابطه با کاهش مزایای همزیستی میکوریزایی باشد. سوبرامانیان و همکاران (۲۶) بیان داشتند که کاربرد کودهای فسفره باعث کاهش وابستگی میکوریزایی در ذرت می‌گردد، به‌علاوه این نتایج نیز با نتایج حاصله از تحقیق اورتاس و همکاران (۲۳) در رابطه با کاهش وابستگی میکوریزایی با مصرف کودهای فسفر مطابقت داشت.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که کاربرد قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* در تلفیق با کودهای شیمیایی فسفره مبتنی بر یک نظام زراعی کم نهاده می‌تواند با کاهش مصرف کودهای شیمیایی اثرات منفی ناشی از مصرف این کودها را در بوم نظام‌های زراعی کاهش دهد، علاوه بر آن این ریزموجودات با استفاده از مکانیسم‌های پیچیده می‌توانند اثرات تنش‌های زیست محیطی از جمله تنش رطوبتی را به حداقل برسانند، هم‌چنین اثر هم‌افزایی که بین قارچ میکوریز آربسکولار و باکتری *سودوموناس فلورسنس* در این آزمایش دیده شد توانست اکثر صفات از جمله وزن ۳۰۰ دانه، تعداد کل دانه در بلال، عملکرد ماده خشک، عملکرد دانه، بازده زراعی کود، بازده زراعی نسبی و کلنیزاسیون ریشه ذرت را بیش از سایر تیمارها افزایش دهد؛ باکتری *سودوموناس فلورسنس* در این آزمایش در سطحی پایین‌تر از قارچ میکوریز آربسکولار توانست جذب فسفر و اثرات منفی ناشی از تنش خشکی را بهبود ببخشد، در حقیقت استفاده از قارچ‌های میکوریز آربسکولار که با دارا بودن هیف‌ها و میسلیوم‌های درون و برون ریشه‌ای منطقه تخلیه ریشه را برای جذب آب و مواد غذایی گسترش می‌دهند به همراه استفاده از باکتری‌های حل‌کننده فسفات نظیر باکتری *سودوموناس فلورسنس* (باکتری‌های کمکی میکوریز آربسکولار) می‌تواند با افزایش فسفر قابل دسترس در خاک به کاهش مصرف کودهای شیمیایی فسفره در راستای رسیدن به اهداف کشاورزی پایدار کمک بسزایی نماید.

منابع مورد استفاده

۱. ابدالی، ر. ۱۳۸۴. بررسی تأثیر کاربرد میکوریز و مقادیر فسفر در سطوح مختلف آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد و برخی خصوصیات مرفولوژیک ذرت پاپ کورن. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج.

۲. احتشامی، م.، م. آقاعلیخانی، م. چائی چی و ک. خاوازی. ۱۳۸۷. تأثیر کودهای زیستی فسفاته بر خواص کمی و کیفی ذرت دانه‌ای سینگل کراس ۷۰۴ در شرایط تنش کم آبی. مجله علوم گیاهان زراعی ۴۰(۱): ۲۶-۱۵.

۳. ایرانی پور، ر.، م.ج. ملکوتی، م.ج. عابدی و ا. السادات سجادی. ۱۳۸۶. اثرات اصلی خاک فسفات، گوگرد و باکتری *تیوباسیلوس* بر شاخص‌های عملکرد محصول ذرت و اثرات باقیمانده آن بر عملکرد محصول جو. مجله علوم خاک و آب ۲۱(۲): ۲۰۵-۱۹۵.

۴. حمیدی، ا.، ا. اصغرزاده، ر. چوگان، م. دهقان شعار، ا. قلاوند و م.ج. ملکوتی. ۱۳۸۶. بررسی کاربرد کودهای ریزوباکتریایی افزاینده رشد گیاه (PGPR) در زراعت ذرت با نهاده کافی. مجله علوم محیطی ۴(۴):۲۰-۱.

۵. رضوان بیدختی، ش.، ع. دشتبان، م. کافی و س. سنجانی. ۱۳۸۸. ارزیابی اثر کاربرد سویه‌هایی از باکتری *سودوموناس* بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم در سطوح مختلف فسفر. نشریه بوم‌شناسی کشاورزی ۱(۱):۴۰-۲۳.

۶. لک، ش.، ا. نادری، ع. سیادت، ا. آیینه‌بند و ق. نورمحمدی. ۱۳۸۵. اثر سطوح مختلف نیتروژن و تراکم گیاه روی عملکرد و اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ تحت شرایط مختلف رطوبتی در خوزستان. مجله علوم زراعی ایران ۸(۲): ۱۷۶-۱۵۳.

۷. یزدانی، م.، ه. پیردشتی، م.ع. اسماعیلی و م.ع. بهمنیار. ۱۳۸۹. اثر تلقیح باکتری‌های حل‌کننده فسفر و محرک رشد بر کارایی مصرف کودهای ازته و فسفره در کشت ذرت سینگل کراس ۶۰۴. مجله الکترونیک تولید گیاهان زراعی ۳(۲): ۸۰-۶۵.

8. Akhtar, M. S. and Z. A. Siddiqui. 2008. Arbuscular mycorrhizal fungi as potential bioprotestants against plant pathogens. PP. 61–97, *In:* Z. A. Siddiqui *et al*. (Eds.), Mycorrhizae: Sustainable Agriculture and Forestry, Springer Science+ Business Media B.V.
9. Al-Karaki, G. N., B. McMichael and J. Zak. 2004. Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. Mycorrhiza 14: 263–269.
10. Auge´, R. M. 2001.Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. Mycorrhiza 11: 3-42.
11. Banziger, M., G. O. Edmeades, D. Beck and M. Bellon. 2000. Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize, from theory to practice. CIMMYT, Mexico DF.
12. Biari, A., A. Gholami and A. Rahmani. 2008. Growth promotion and enhanced nutrient uptake of maize by application of plant growth promoting rhizobacteria in arid region of Iran. J. Boil. Sci. 8: 1015-1020.
13. Bolandnazar, S., N. Aliasgarzad, M. R. Neishabury and N. Chaparzadeh. 2007. Mycorrhizal colonization improves onion (*Allium cepa* L.) yield and water use efficiency under water deficit condition. Scientia Horti. 114: 11–15.
14. Boomsma, C. R. and T. J. Vyn. 2008. Maize drought tolerance: Potential improvements through arbuscular mycorrhizal symbiosis. Field Crops Res. 108: 14–31.
15. Calderon-Vazquez C., E. Ibarra-Laclette, J. Caballero-Perez and L. Herrera-Estrella. 2008. Transcript profiling of Zea mays roots reveals gene responses to phosphate deficiency at the plant- and species-specific levels. J. Experim. Bot. 59(9): 2479–2497.
16. Cherr, C. M., J. M. S. Scholberg and R. McSorley. 2006. Green manure approaches to crop production. Agron. J. 98: 302-319.
17. CIMMIT, 2010. Maize- global alliance for improving food security and the livelihoods of the resource-poor in the developing world. Draft proposal submitted by CIMMYT and IITA, to the CGIAR Consortium Board.
18. Dordas, C. A., A. S. Lithourgidis, T. Matsi and N. Barbayiannis. 2008. Application of liquid cattle manure and inorganic fertilizers affect dry matter, nitrogen accumulation, and partitioning in maize. Nutr. Cycl. Agro. Agroecosys. 80: 283-296.
19. Garbaye, J. 1994. Helper bacteria-a new dimension to the mycorrhizal symbiosis. New Phytol. 128: 197-210.
20. Jagadeeswaran, R., V. Murugappan and M. Govindaswamy. 2005. Effect of slow release NPK fertilizer sources on the nutrient use efficiency in turmeric (*Curcuma longa* L.). World J. Agric Sci. 1: 65-69.
21. Javaid, A. 2009. Arbuscular mycorrhizal mediated nutrition in plants. J. Plant Nutr. 32: 1595–1618.
22. Kormanik P. P. and A. C. McGraw. 1982. Quantification of Vesicular-arbuscular Mycorrhizae in Plant Roots. PP. 37-45. *In:* Paul, St. (Ed.), Methods and Principles of Mycorrhizal Research. NC Sheed, American Phytopathological Society.
23. Ortas, I., D. Ortakci, Z. Kaya, A. Cinar and N. Onelge. 2002. Mycorrhizal dependancy of sour orange in relation to phosphorus and zinc nutrition. J. Plant Nutr. 25:1263–1279.
24. Plenchette, C., J. A. Fortin and V. Furlan. 1983. Growth response of several plant species to mycorrhiza in a soil of moderate fertility. I. Mycorrhizal dependency under field conditions. Plant Soil 70:199–209.
25. Siddiqui, Z. A. and J. Pichtel. 2008. Mycorrhizae: An Overview. PP. 1-35, *In:* Z. A. Siddiqui *et al*. (Eds.), Mycorrhizae: Sustainable Agriculture and Forestry. Springer Science+ Business Media B.V.
26. Subramanian, K. S., C. A. Bharathi and O. Jegan. 2008. Response of maize to mycorrhizal colonization at varying levels of zinc and phosphorus. Biol. Fertil. Soils 45:133–144.
27. Subramanian K. S., C. Charest, L. M. Dwyer and R. I. Hamilton. 1997. Effects of arbuscular Mycorrhiza on leaf water potential, sugar content and P content during drought and recovery of maize. Can. J. Bot. 75: 1582–1591.

28. Subramanian, K. S., P. Santhanakrishnan and P. Balasubramania. 2006. Response of field grown tomato plants to arbuscular mycorrhizal fungal colonization under varying intensities of drought stress. Sci. Hort. 107: 245–253.
29. Tang, M., H. Chen, J. C. Huang and Z. Q. Tian. 2009. AM fungi effects on the growth and physiology of Zea mays L. seedlings under diesel stress. Soil Biol. Biochem. 41: 936–940.
30. Verbruggen, E. and E. Toby-Kiers. 2010. Evolutionary ecology of mycorrhizal functional diversity in agricultural systems. Evol. Appl. 547–560.
31. Vyas, P. and A. Gulati. 2009. Stress tolerance and genetic variability of phosphate solubilizing Pseudomonas fluorescent from the cold deserts of the trans-Himalayas. Microb. Ecol. 58: 425-434.
32. Widada, J., D. I. Damarjaya and S. Kabirun. 2007. The interactive effects of arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobacteria on the growth and nutrients uptake of sorghum in acid soil. First International meeting on microbial phosphate solubilization developments. Plant Soil 102: 173-177.
33. Wilhelm, J.M., F. Johnson, L. Karlen and T. David. 2007. Corn stover to sustain soil organic carbon further constrains biomass supply. Agron J. 99: 1665-1667.

Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and *Pseudomonas fluorescens* on Phosphorus Fertilizer Use Efficiency, Mycorrhizal Dependence and Maize Yield under Water Deficit Conditions

M. Ghorchiani[1], GH. Akbari[1], H. A. Alikhani[2]*, M. Zarei[3] and I. Allahdadi[1]

(Received : May 31-2011 ; Accepted : May 2-2012)

Abstract

In order to evaluate the effect of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi and *Pseudomonas fluorescens* bacteria on phosphorus fertilizer use efficiency, mycorrhizal dependence and grain yield and dry matter yield of maize under water deficit conditions, a field experiment was conducted as split-split plot arrangement based on randomized complete block design with three replications. The treatments in this experiment were included as follows: irrigation (normal irrigation and water deficit stress based on evaporation from class A pan evaporation); combined different seed inoculations with AM and *Pseudomonas fluorescens* and treatment of chemical phosphate fertilizer (non- consumption of phosphate fertilizer, consumption of 50 percent of triple superphosphate fertilizer needed, and consumption of rock phosphate, based on the quantity of consumed phosphorus of triple superphosphate source). The results showed that effects of irrigation, seed inoculation with AM and *Pseudomonas fluorescens* biological phosphate fertilizer and chemical phosphate fertilizer were significant on yield and yield components, dry matter yield, relative agronomic efficiency and root colonization. Mild stress significantly reduced grain yield, relative agronomic efficiency and fertilizer agronomic efficiency compared to optimum irrigation. Results showed that grain and dry matter yield are highly correlated with root colonization under mild stress condition. Maximum mycorrhizal dependence was obtained in mild stress condition. Maximum relative agronomic efficiency, fertilizer agronomic efficiency, yield and yield components was related to seed inoculation with AM and *Pseudomonas fluorescens*. The use of triple superphosphate fertilizer were increased grain yield in comparison with rock phosphate along with inoculation of phosphate solubilizing microorganisms. However, maximum root colonization and mycorrhizal dependence was achieved in non- consumption treatment of phosphate fertilizer.

Keywords: Relative agronomic efficiency, *Pseudomonas fluorescens*, Maize, Arbuscular mycorrhizal fungi, Mycorrhizal dependence.

1. Dept. of Agron. and Plant Breed., Campus of Abureyhan, Univ. of Tehran., Tehran, Iran
2. Dept. of Soil and Water Sci. Eng., Campus of Agric. and Natur. Resour., Univ. of Tehran, Karaj, Iran
3. Dept. of Soil Sci., College of Agric., Shiraz Univ., Iran
*: Corresponding Author, Email: halikhan@ut.ac.ir