روابط خاک و گیاه/ سال سیزدهم / شماره چهارم / زمستان ۱۴۰۱ / صفحات ۱۰۴-۸۹ مقاله پژوهشی
DOI: 10.47176/jspi.13.4.20821 EISSN: 2783-5286 https://jspi.iut.ac.ir

تأثیر قارچ میکوریزا و باکتری باسیلوس به همراه کود آلی بر رشد و جذب عناصر غذایی فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annum* L.)

حسین نجاتی سینی[۱]، رحیم برزگر[۱]، صاحب سودائی مشائی[۲*] و مسعود قاسمی قهساره[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱)

چکیده

تغییرات اقلیمی و استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها، اثر تنش‌های غیرزیستی بر قابلیت بهره‌وری محصولات کشاورزی را تشدید و اکوسیستم را تخریب کرده است. یکی از راه‌کارها برای تعدیل این فشارها، کاربرد کودهای آلی، همزیستی مایکوریزی و تلقیح میکروبی است. بنابراین به‌منظور بررسی تأثیر کود آلی، قارچ میکوریزا و باسیلوس بر صفات رشدی فلفل دلمه‌ای، آزمایشی به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با عامل اصلی کود آلی در دو سطح (با و بدون کود آلی) و عامل فرعی تیمار کود زیستی در چهار سطح [کود زیستی میکوریزا آربسکولار (مخلوط *Rhizophagus irregularis* + *Funeliformis mosseae*)، باکتری باسیلوس (مخلوط *Bacillus subtilis* + *Bacillus amyloliquefaciens*)]، مخلوط میکوریزا + باکتری و شاهد بدون تلقیح) و در سه تکرار اجرا شد. ویژگی‌های زیستی خاک، جذب عناصر غذایی و ویژگی‌های رشد و عملکرد میوه پس از برداشت بررسی شدند. نتایج نشان داد که کاربرد کود آلی و قارچ میکوریزا وزن خشک شاخساره (به‌ترتیب ۱۰/۳ و ۱۷/۴ ٪) و عملکرد میوه (به‌ترتیب ۱۱/۵ و ۱۹/۹ ٪) را نسبت به شاهد افزایش دادند. بیش‌ترین جمعیت میکروبی ($۱/۱\times۱۰^{۷}$ CFU g^{-1}) و نسبت R/S (۱۱۰/۰) در تیمار کاربرد کود آلی با تلقیح میکوریزی حاصل شد. همزیستی میکوریزا همراه با کود آلی جذب نیتروژن (۲۰/۶ ٪)، فسفر (۴۶/۸ ٪)، آهن (۳۵/۶ ٪) و روی (۵۷/۲ ٪) را نسبت به شاهد بهبود بخشید و جذب پتاسیم را تیمار باسیلوس نسبت به شاهد ۲۲/۳ درصد افزایش داد. به‌طور کلی، ترکیب کود آلی و قارچ میکوریزا برای کشت فلفل دلمه‌ای گلخانه‌ای مناسب به‌نظر می‌رسند.

واژه‌های کلیدی: باکتری محرک رشد، عملکرد میوه، فسفر، فلفل، همزیستی میکوریزی.

مقدمه

کشاورزی جهانی با مشکلات مختلفی مانند تولید غذا برای حدود ۸ میلیارد نفر تا اواسط قرن ۲۱ مواجه است. به‌طور همزمان مردم با شرایط اقتصادی و سوء تغذیه و همچنین رقابت شدید برای منابع طبیعی و تغییرات آب و هوایی دست و پنجه نرم می‌کنند (۱۸ و ۴۷). یک چالش برای

۱- گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران
۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران
* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: soodaie@sku.ac.ir

حفظ منابع غذایی جهانی، کاهش سطح زمین‌های کشاورزی به دلایل مختلف است که با رشد جمعیت همبستگی دارد (۲۲). برای پاسخگویی به تقاضای رو به رشد غذا، کاهش تلفات محصول ناشی از شرایط مختلف محیطی بسیار مهم است (۴۵). استفاده نامتعارف و نادرست از کودهای شیمیایی و سموم دفع آفات منجر به مشکلات زیست‌محیطی مختلفی در سراسر جهان شده است. جدای از نگرانی‌های زیست‌محیطی، نیاز به بهبود کیفیت و عملکرد گیاه در عین حفظ کیفیت غذا با استفاده از کودهای آلی وجود دارد (۲۰). کشاورزی آلی و استفاده از کودهای آلی و زیستی، یک روش توسعه کل‌نگر است که پایداری محیطی، زیستگاه‌ها، چرخه‌های بیوژئوشیمیایی و فعالیت زیستی خاک را بدون استفاده از کودها یا آفت‌کش‌های معمولی بهبود می‌بخشد (۲۹). بهسازهای آلی طیف وسیعی از محصولات ساخته‌شده از اجزای طبیعی آلی هستند که ممکن است برای افزایش حاصلخیزی خاک و رشد گیاه به محیط کشت یا خاک افزوده شوند. بررسی‌های زیادی نشان داده‌اند که یک بهساز آلی، حاصلخیزی خاک را در طول سال‌ها بهبود می‌بخشد و فعالیت میکروبی و فرآیندهای آنزیمی را افزایش می‌دهد (۱۲ و ۳۹).

همزیستی میکوریزا تقریباً در ۸۰ درصد از گیاهان آوندی وجود دارد، و شبکه‌های همزیستی میکوریزا به هم پیوسته هستند، به این معنی که برخی از قارچ‌ها مانند *Rhizophagus irregularis* و *Funeliformis mosseae* تقریباً با همه گیاهان در یک اکوسیستم متعادل همزیستی دارند، درحالی‌که برخی دیگر خاص‌تر هستند (۲۷). میکوریزا به‌عنوان یک کود زیستی عمل می‌کند، زیرا جذب مواد مغذی، جذب یون‌های فسفات، کلسیم، منیزیم و پتاسیم توسط گیاهان زراعی را با کمک هیف‌های برون‌ریشه‌ای بهبود می‌بخشد (۶). این قارچ‌ها با بهبود شاخص‌های کیفیت خاک (مانند زیست‌توده خاک، ساختمان خاک و خاکدانه‌سازی) تأثیر زیست‌محیطی قابل توجهی دارند (۲۷).

ریزجانداران ریزوسفری مفید که در تحریک رشد و نمو گیاه نقش دارند، می‌توانند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم رشد و نمو گیاه را تحریک کنند (۳۶). جذب مواد مغذی، حل شدن فسفر، تثبیت نیتروژن و تولید هورمون گیاهی نمونه‌هایی از فرآیندهای مستقیم هستند (۱۱). مکانیسم‌های غیرمستقیم شامل تولید آنتی‌اکسیدان‌ها، اگزوپلی‌ساکاریدها، مقاومت سیستمیک، تعادل اسمزی، مواد شیمیایی فرار و سیدروفورها هستند که به رشد گیاه کمک می‌کنند (۱ و ۱۳).

پژوهش‌ها فواید باکتری‌های محرک رشد و قارچ میکوریزا را برای رشد گیاهان نشان دادند. برای فلفل تلقیح باکتری‌های جنس باسیلوس (۲۳) و یا ترکیب باکتری اسینتوباکتر (*Acinetobacter*) با میکوریزا *Rhizophagus intraradices* (۳۳)، در مجموع باعث بهبود رشد و افزایش وزن خشک میوه شدند. انگولو کاسترو و همکاران (۳) در بررسی گلخانه‌ای نشان دادند که فلفل دلمه‌ای تلقیح‌نشده نسبت به گیاه تلقیح‌شده با باکتری محرک رشد (باسیلوس و سودوموناس) و میکوریزا (جنس *Funneliformis* و *Claroideoglomus*)، به تنهایی یا در ترکیب باهم، رشد کم‌تری داشته است. و تلقیح سودوموناس یا ترکیب باسیلوس و میکوریزا رشد گیاه را افزایش داد و قارچ میکوریزا کارایی فتوشیمیایی PSII را در مقایسه با شاهد و گیاه تلقیح‌شده با باسیلوس بهبود بخشید. در کل، این تیمارهای زیستی رشد و قدرت فلفل دلمه‌ای را افزایش دادند. بیش‌ترین عملکرد و تعداد میوه فلفل دلمه‌ای با تلقیح قارچ میکوریزا و مدیریت بهینه آبیاری در کل فصل رشد به‌دست آمد که کلونیزاسیون قارچ همزیست میکوریزا اهمیت بیش‌تری نسبت به آبیاری داشت (۹). افزایش رشد گیاهان میکوریزایی‌شده تا حدی مربوط به افزایش فراهمی عناصر غذایی به‌ویژه فسفر است (۱۷). کاربرد توأم قارچ میکوریزا آربسکولار و باکتری‌های حل‌کننده فسفات باعث افزایش فسفر قابل جذب و در نتیجه انحلال بیش‌تر فسفات‌های نامحلول از منبع کودی سنگ فسفات می‌شود (۱۰). فلفل شیرین در تیمار کاربرد کود آلی (۵۷۰ گرم ورمی‌کمپوست برای هر بوته) به همراه باکتری باسیلوس سابتیلیس، بیش‌ترین افزایش را در ارتفاع بوته، قطر ساقه، تعداد برگ و تولید میوه نشان داد که نسبت به تیمار کود

شیمیایی بیش‌تر بود. کاربرد مخلوط باکتری *باسیلوس سابتیلیس* با ورمی‌کمپوست می‌تواند جایگزینی مناسب برای تولید فلفل بدون نیاز به کودهای شیمیایی باشد (۲۸).

فلفل دلمه‌ای اکنون در سرتاسر جهان به‌عنوان سبزی، ادویه و گیاه دارویی کشت می‌شود. در بین گونه‌های فلفل شیرین، گونه *Capsicum. annuum* است که تقاضای تجاری بیش‌تری به دلیل رنگ، عطر، اندازه، طعم یا تند بودن‌اش دارد، که در مناطق معتدل، گرمسیری و نیمه‌گرمسیری اروپا، آسیا، آفریقا و آمریکا کاشته می‌شود (۲۶). از این‌رو در این پژوهش از گیاه فلفل دلمه‌ای استفاده شد که یکی از مهم‌ترین سبزی‌های میوه‌ای است، که سطح زیر کشت و مصرف آن همواره در حال افزایش است (۳). از طرفی، درک برهمکنش‌های بین قارچ‌های میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد و استفاده از این رابطه برای بهبود رشد گیاه از ضروریات کشاورزی پایدار است. این پژوهش به دنبال درک رابطه بین قارچ میکوریزا و باکتری باسیلوس با یا بدون استفاده از کود آلی و تأثیر آن‌ها بر رشد و جذب عناصر غذایی گیاه فلفل دلمه‌ای در شرایط گلخانه‌ای است.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۱۴۰۰ در گلخانه‌ای (با میانگین شدت نور ۲۲۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه، رطوبت نسبی ۷۰-۵۵ درصد، میانگین دماهای شبانه و روزانه به ترتیب ۱±۱۸ و ۲±۲۴ درجه سلسیوس) واقع در بخش خان‌میرزا از استان چهارمحال و بختیاری با طول و عرض جغرافیایی به‌ترتیب ۵۱/۰۶ درجه شرقی و ۳۱/۵۶ درجه شمالی اجرا شد. بافت خاک لایه توسعه ریشه (۳۰-۰ سانتی‌متر) لومی بوده و از لحاظ رسانایی الکتریکی (۰/۵۶ دسی‌زیمنس بر متر) خطر شوری وجود نداشته و مقدار فسفر خاک (۸/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و پتاسیم (۱۹۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) آن در حد متوسط و نیتروژن کل (۰/۰۵۵ درصد) و کربن آلی (۰/۵۹ درصد) آن خیلی کم بود.

آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک-های کامل تصادفی با عامل اصلی کود آلی در دو سطح (با افزودن کود آلی و بدون کود آلی) و عامل فرعی تیمار کود زیستی در چهار سطح [کود زیستی میکوریزا آربسکولار (مخلوط *Rhizophagus irregularis + Funeliformis mosseae*)، باکتری باسیلوس (مخلوط *Bacillus subtilis + Bacillus amyloliquefaciens*)، مخلوط میکوریزا + باکتری و شاهد بدون تلقیح] در سه تکرار به اجرا درآمد. کود آلی (دارای ۲۱ درصد کربن آلی، و ۰/۹ درصد نیتروژن و با رسانایی الکتریکی ۲/۱ دسی‌زیمنس بر متر (نسبت ۱:۵ کود:آب) با منشاء کود دامی (گاوی) پوسیده به مقدار ۳ کیلوگرم در مترمربع به بستر گلخانه در کرت‌های اصلی افزوده شد. مایه تلقیح میکوریزا آربسکولار از شرکت زیست‌فناور پیشتاز واریان تهیه شد که در هنگام کشت نشا به میزان ۱۰ گرم (۲۰ اسپور در گرم) به چاله کاشت افزوده شد. ریشه نشاهای فلفل پیش از انتقال و کاشت در گلخانه در سوسپانسیون حاوی باکتری باسیلوس (دو لیتر به‌طور میانگین حاوی 10^8 سلول باکتری در لیتر) به مدت ۲۵ دقیقه نگه داشته شده (تلقیح ریشه) و سپس در بستر گلخانه نشا شدند (۲). بر مبنای عرف گلخانه‌داران منطقه و برای جلوگیری از کمبود احتمالی عناصر غذایی، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم مصرف شده و این کودها با خاک بستر به‌طور کامل مخلوط شدند. کوددهی و تغذیه تکمیلی گیاه فلفل براساس برنامه به روش کود-آبیاری (کود ۳۶-۱۲-۱۲، سولفات پتاسیم و نیترات کلسیم به مقدار دو کیلوگرم در ۱۰۰۰ مترمربع هر دو هفته یک‌بار و کود سولفات منیزیم به مقدار دو کیلوگرم در ۱۰۰۰ مترمربع هر ماه یکبار) و محلول‌پاشی (عناصر کلسیم، بر، آهن، روی، منیزیم و پتاسیم به مقدار دو در هزار هر دو هفته یک‌بار) در طول دوره رشد تأمین شد. بذور رقم نروین پس از سبز شدن در سینی نشا و در مرحله ۴ برگ حقیقی با سن حدود ۷۰ روز در ۵ فروردین ۱۴۰۰ به گلخانه برای کشت منتقل شد. هر تیمار شامل شش بوته با فاصله بین دو ردیف ۷۰ سانتی‌متر، فاصله بین بوته‌ها ۵۰ سانتی‌متر، فاصله بین تیمارها

۸۰ سانتی‌متر و فاصله بین هر بلوک یک متر در نظر گرفته شد. سپس مراقبت‌های زراعی معمول در حین دوره کشت در گلخانه شامل کنترل دما و رطوبت نسبی، آبیاری (روش قطره-ای)، هرس بوته و مبارزه با علف‌های هرز (به‌صورت فیزیکی) انجام شد. شروع برداشت از هجدهم خردادماه و پایان آزمایش در گلخانه ۲۰ اسفندماه بود که کل دوره آزمایش ۳۵۱ روز شد.

پس از رسیدن و رنگ‌گرفتن میوه‌ها، برداشت به‌صورت هفتگی صورت گرفت و شاخص‌های رشد، تعداد میوه، عملکرد بوته و وزن تازه و خشک شاخساره و شاخص اثر تلقیح میکروبی[1] (MIE) که برابر است با تفاوت وزن خشک گیاه تلقیح‌شده با گیاه تلقیح‌نشده تقسیم بر وزن خشک گیاه تلقیح-شده، مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (۵).

در اواسط مرحله گلدهی از تیمارها، نمونه‌های ریشه و خاک جمع‌آوری شد. برای تعیین جمعیت میکروبی ریزوسفر (R) براساس سری رقت ۱۰ تایی، با روش کشت روی محیط جامد[2] انجام شد (۳۴) و بر اساس واحدهای تشکیل‌دهنده کلنی (CFU) پس از ۵ روز انکوباسیون در دمای ۲۶ درجه سلسیوس گزارش شد. نسبت جمعیت میکروبی در خاک ریزوسفری به خاک غیرریزوسفری (R/S) هم محاسبه شد (۲۴). برای رنگ‌آمیزی ریشه میکوریزایی از روش مک‌گونیگل و همکاران (۳۰) استفاده شد، و درصد کلونیزاسیون با روش خطوط متقاطع محاسبه شد (۲۱). ویژگی‌های خاک مانند رسانایی الکتریکی در عصاره ۵:۱ آب به خاک (۳۸)، pH در سوسپانسیون ۵ :۱ آب به خاک (۴۳)، نیتروژن کل در خاک و گیاه به روش کلدال (۸)، فسفر در خاک و گیاه به روش رنگ‌سنجی (وانادات-مولیبدات) و با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر و پتاسیم به روش طیف‌سنجی شعله‌ای (۱۴ و ۴۱) اندازه‌گیری شدند.

پس از بررسی فرضیات تجزیه واریانس شامل همگنی واریانس‌ها و نرمال‌بودن باقی‌مانده‌ها، اثر عوامل تغییرات تیمار محرک رشد بر شاخص‌های رشد و عملکرد فلفل دلمه‌ای با استفاده از تجزیه واریانس بررسی شد و همچنین مقایسه میانگین‌ها با روش دانکن در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از نرم‌افزار SPSS (v. 23) انجام شد.

نتایج و بحث

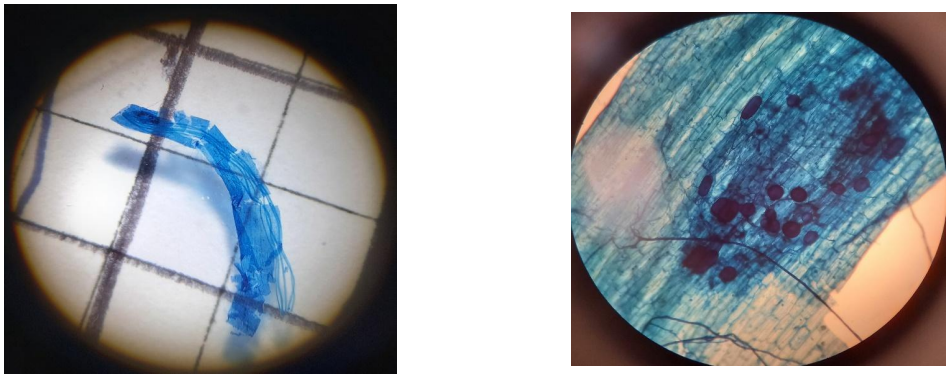
تعیین همزیستی قارچ میکوریزا و درصد کلونیزاسیون

به وسیله رنگ‌آمیزی ریشه با رنگ تریپان بلو و مشاهده این ریشه‌ها با میکروسکوپ نوری اندام‌های قارچی مانند ویزیکول و هیف‌های درون و برون‌سلولی پوست ریشه مشاهده شد (شکل ۱) که نشان از برقراری رابطه همزیستی قارچ میکوریزا با ریشه گیاه فلفل در تیمار قارچ است. درصد کلونیزاسیون در تیمار قارچ میکوریزا (۳۱/۴ درصد) بیش‌تر از تیمار مخلوط قارچ با باکتری باسیلوس (۱۳/۲ درصد) بود و از طرفی در تیمار کاربرد کود آلی نیز بیش‌تر از تیمار بدون کاربرد کود آلی شد. افزایش درصد کلونیزاسیون در یک گونه قارچی به‌گونه گیاهی و نوع قارچ بستگی دارد و پس از جوانه‌زدن اسپور، رشد هیف حاصل از جوانه‌زدن است که نقش اساسی در کلونیزاسیون ریشه ایفا می‌کند (۴۰). کرمانی‌زاده و همکاران (۲۵) نیز تاثیر مثبت کاربرد ورمی‌کمپوست بر درصد کلونیزاسیون میکوریزایی و گسترش هیف‌های خارجی را گزارش کردند. نتایج آنها نشان داد به دنبال تأثیری که قارچ میکوریزا بر گسترش و رشد ریشه گیاه میزبان داشت، رشد و نمو و عملکرد گیاه بهبود یافت.

وزن تازه و خشک شاخساره

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد که وزن تازه و خشک شاخساره فلفل به‌طور معنی‌داری در سطح یک درصد تحت تأثیر تیمارهای کود آلی و کاربرد قارچ میکوریزا و باکتری قرار گرفته است. به‌طوری‌که بیش‌ترین وزن تازه (۱۶۹۲/۹ گرم در بوته) و وزن خشک (۳۷۶/۸ گرم در بوته) در تیمار استفاده از کود آلی مشاهده شد که نسبت به تیمار بدون کاربرد کود آلی به‌ترتیب ۱۱/۰ و ۱۰/۳ درصد بیش‌تر بود. در تیمار تلقیح قارچ و باکتری، بیش‌ترین وزن تازه (۱۷۴۲/۰ گرم در بوته) و وزن

1. Microbial inoculation effect
2. Spread plate



ب الف

شکل ۱. رنگ‌آمیزی ریشه و مشاهده ویزیکول و هیف‌های قارچی درون ریشه (الف) و تعیین درصد کلونیزاسیون (ب)

Fig. 1. Root staining and observing the vesicle and fungal hyphae inside the root (right) and determining the colonization percentage (left).

جدول ۱. تجزیه واریانس اثر تیمارها بر صفات اندازه‌گیری‌شده در فلفل دلمه‌ای گلخانه‌ای.

Table 1. Analysis of variance of the effect of treatments on measured traits in greenhouse bell pepper.

ضریب تبیین R^2 (%)	ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	خطا Error	OF × MI	تلقیح میکروبی Microbial inoculation (MI)	خطای نوع اول First type error	کود آلی Organic fertilizer (OF)	بلوک Block	منبع تغییرات Source of variance
-	-	12	3	3	2	1	2	Degree of freedom
0.87	4.51	5278	$2770^{n.s}$	52727^{**}	29312	171366^{**}	2432	Shoot fresh weight
0.89	4.2	226.6	$206.6^{n.s}$	3527^{**}	1163^{*}	7367^{**}	77.81	Shoot dry weight
0.84	1.35	1.01	$0.17^{n.s}$	7.74^{**}	2.80	26.9^{**}	2.09	Fruit diameter
0.82	3.34	1.25	$1.26^{n.s}$	15.82^{**}	0.29	12.02^{**}	0.54	Fruit number
0.92	5.28	46.83	$80.21^{n.s}$	1197^{**}	182.5	2192^{**}	31.64	Yield
	7.53	109.3	$33.05^{n.s}$	$12.01^{n.s}$	121.3	$10.75^{n.s}$	164.1	Plant height
0.99	10.03	0.004	0.51^{**}	1.07^{**}	0.001	$0.009^{n.s}$	0.01	Microbial population
0.98	12.24	66.32	5411^{**}	6238^{**}	87.74	$11.34^{n.s}$	30.03	R/S ratio
0.98	13.6	0.73	14.53^{**}	195.7^{**}	0.14	34.51^{**}	0.52	Microbial inoculation effect (MIE)
0.83	7.97	8.25	$1.52^{n.s}$	61.21^{**}	21.63	205.4^{**}	19.66	N uptake
0.89	7.81	0.02	0.07^{*}	0.41^{**}	0.19	0.14^{*}	0.02	P uptake
0.88	6.18	5.53	60.73^{**}	59.46^{**}	36.57	$15.16^{n.s}$	1.45	K uptake
0.84	7.98	1.13	$1.06^{n.s}$	19.15^{**}	1.61	$0.26^{n.s}$	0.34	Fe uptake
0.78	14.2	0.09	$0.02^{n.s}$	0.66^{**}	0.6	$0.001^{n.s}$	0.17	Zn uptake

ns، ** و * به‌ترتیب بیانگر اثر غیرمعنی‌دار و اثر معنی‌دار در سطوح احتمال یک و پنج درصد است.

ns, ** and * denote non-significant and significant effects at the 1 and 5 % probability levels, respectively.

منبع تغییرات، درجه آزادی (Degree of freedom)، وزن تازه شاخساره (Shoot fresh weight)، وزن خشک شاخساره (Shoot dry weight)، قطر میوه (Fruit diameter)، تعداد میوه (Fruit number)، عملکرد (Yield)، ارتفاع گیاه (Plant height)، جمعیت میکروبی (Microbial population)، نسبت جمعیت میکروبی خاک ریزوسفری به خاک غیرریزوسفری (R/S ratio)، اثر تلقیح میکروبی (MIE)، جذب نیتروژن (N uptake)، جذب فسفر (P uptake)، جذب پتاسیم (K uptake)، جذب آهن (Fe uptake) و جذب روی (Zn uptake).

خشک شاخساره (۳۹۲/۶ گرم در بوته) در تیمار قارچ میکوریزا حاصل شد که نسبت به شاهد به‌ترتیب ۱۴/۳ و ۱۷/۴ درصد بیش‌تر بود. پس از تیمار قارچ مایکوریزا، تیمار مخلوط قارچ و باکتری *باسیلوس* در رتبه دوم قرار گرفت. پژوهش‌های گارهام و همکاران (۱۹) نشان داد که گوجه فرنگی تلقیح‌شده با قارچ میکوریزا وزن خشک بیش‌تری نسبت به تیمار غیرمیکوریزایی داشتند. این نتایج، با یافته‌های انگلوکاستر و همکاران (۳)، بوکزکواسکا و سالاتا (۹) و عزتی‌کنده و همکاران (۴) هم‌خوانی داشت.

قطر و تعداد میوه

تأثیر کاربرد کود آلی و سطوح تیمار تلقیح میکروبی بر قطر و تعداد میوه فلفل دلمه‌ای معنی‌دار ($p < 0.01$) بود (جدول ۱). به‌طوری‌که بیش‌ترین قطر و تعداد میوه در تیمار کاربرد کود آلی (به‌ترتیب ۷۸/۶۶ میلی‌متر و ۳۴/۱۶ میوه در مترمربع) دیده شد که نسبت به تیمار بدون کاربرد کود آلی به‌ترتیب ۲/۸۱ و ۴/۳۰ درصد بیش‌تر بود، و در تیمار تلقیح میکروبی، بیش‌ترین قطر میوه در تیمار باکتری *باسیلوس* (۷۸/۸۰ میلی‌متر) و تعداد میوه در تیمار میکوریزا (۳۵/۸۳ میوه در مترمربع) دیده شد. کم‌ترین تعداد میوه (۳۲/۱۶ میوه در مترمربع) هم در شاهد بدون تلقیح بود. انجیلی و همکاران (۱۵) بیش‌ترین تعداد میوه فلفل را در تیمار تلقیح با قارچ میکوریزا (*Glomus intraradices*) مشاهده کردند. استرادالونا و دیویس (۱۶) گزارش دادند که تلقیح گیاهان فلفل دلمه‌ای با قارچ میکوریزا تعداد میوه را نسبت به گیاهان غیرمیکوریزی افزایش داد. آن‌ها بیش‌ترین تأثیر همزیستی میکوریزی در افزایش تعداد میوه و عملکرد گیاه را مربوط به جذب عناصر غذایی (به‌ویژه فسفر و پتاسیم) برای گیاه دانستند.

ارتفاع گیاه

تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد که ارتفاع بوته فلفل تحت تأثیر کود آلی و تیمارهای تلقیح میکروبی قرار نگرفت و تیمارها از لحاظ آماری معنی‌دار نبودند. با این‌حال بیش‌ترین ارتفاع بوته (۱۴۰/۰۴ سانتی‌متر) در تیمار مخلوط قارچ میکوریزا و باکتری *باسیلوس* دیده شد (جدول ۲). لاراکاپیستران (۲۸) مشاهده کرد که در تیمار مصرف کود آلی (۵۷۰ گرم ورمی-کمپوست برای هر بوته) به همراه باکتری *باسیلوس سابتیلیس*، بیش‌ترین افزایش در ارتفاع بوته، قطر ساقه، تعداد برگ و تولید میوه وجود دارد.

عملکرد میوه

با توجه به جدول (۱) تجزیه واریانس، تیمارها دارای تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۱ ٪ از نظر عملکرد میوه بودند ولی برهم‌کنش تیمارها معنی‌دار نشد. مقایسه میانگین اثر تیمار کود آلی نشان داد (جدول ۲) که کاربرد کود آلی باعث افزایش عملکرد میوه فلفل (۱۵/۱۷ کیلوگرم در مترمربع) شد که نسبت به تیمار بدون کاربرد کود آلی ۱۱/۵ درصد افزایش یافت. مقایسه میانگین اثر تیمار تلقیح میکروبی نشان داد که بیش‌ترین عملکرد میوه در تیمار تلقیح میکوریزی (۱۵/۹۴ کیلوگرم در مترمربع) دیده شد که نسبت به تیمار تلقیح با باکتری *باسیلوس* و شاهد به‌ترتیب ۱۰/۰ و ۱۹/۹ درصد بیش‌تر بود. مناویولانت و همکاران (۳۱) و انجیلی و همکاران (۱۵) گزارش دادند که گیاه فلفل دلمه‌ای تلقیح‌شده با قارچ میکوریز عملکرد و وزن خشک میوه بیش‌تری نسبت به گیاه بدون تلقیح میکوریز در دو شرایط تنش خشکی و عدم تنش داشتند. ییلما (۴۶) اظهار داشت که در تولید فلفل، تلقیح با قارچ‌های مایکوریزا آربوسکولار نقش بسزایی در افزایش عملکرد اقتصادی و بهبود رسیدگی میوه از طریق بهبود جذب عناصر غذایی، کاهش اثر شوری و تحمل به بیماری‌ها داشت. تریماناندا و همکاران (۴۴)

نیز نشان دادند که تلقیح فلفل با قارچ مایکوریزا آربوسکولار از نظر رسیدگی میوه، عملکرد اقتصادی و تحمل به بیماری نسبت به شاهد تفاوت معنی‌داری داشت و تلقیح قارچ میکوریزا (*Glomus mosseae*) به مقدار ۱۵ گرم در هر بوته توانست ارتفاع بوته (۷۰/۶۷ سانتی‌متر)، قطر ساقه (۶/۳ سانتی‌متر) و

جدول ۲. مقایسه میانگین تأثیر اصلی تیمارهای کود آلی و تلقیح میکروبی بر صفات مورد بررسی فلفل دلمه‌ای.

Table 2. Mean comparisons of the main effects of organic fertilizer and microbial inoculation on bell pepper growth traits.

تیمارها Treatments	وزن تازه شاخساره (گرم در بوته) Shoot fresh weight (g/plant)	وزن خشک شاخساره (گرم در بوته) Shoot dry weight (g/plant)	قطر میوه (میلی‌متر) Fruit diameter (mm)	تعداد میوه (در مترمربع) Fruit number	عملکرد (کیلوگرم در مترمربع) Yield (kg m^{-2})	ارتفاع بوته (سانتی‌متر) Plant height (cm)
با کود آلی With organic fertilizer	1692.9a	376.8a	78.66a	34.16a	15.17a	139.4a
بدون کود آلی Without organic fertilizer	1523.9b	341.7b	76.54b	32.75b	13.60b	138.1a
تلقیح میکوریزا Mycorrhizal inoculation	1742.0a	392.6a	78.07ab	35.83a	15.94a	139.3a
تلقیح باسیلوس *Bacillus* sp.	1574.0b	354.1b	78.80a	33.00b	14.49b	138.9a
میکوریزا + باسیلوس Mycorrhiza + Bacillus	1593.7b	355.8b	76.18c	32.83b	13.82b	140.04a
شاهد (بدون تلقیح) Control (Non-inoculated)	1524.0b	334.5c	77.34bc	32.16b	13.29b	136.75a

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد است.

Means with the same letters in each column indicate no significant difference based on Duncan's test at 5% probability level.

وزن میوه (۱۰۹/۲ گرم) را افزایش دهد. نتایج این پژوهش با یافته‌های بیوکزووسکا و سالتا (۹) و انگولوکاستر و همکاران (۳) هم‌خوانی دارد.

اثر تلقیح میکروبی (MIE)

تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد که تیمارها و برهم‌کنش بین آن‌ها دارای تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۱ ٪ از نظر کارایی تلقیح میکروبی هستند. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش تیمارها نشان داد که اثر تیمار کود آلی و تلقیح میکروبی بر صفت اثر تلقیح میکروبی (MIE) معنی‌دار ($p < 0.05$) شد (جدول ۳)، به‌طوری‌که در تیمار بدون کاربرد کود آلی، گیاه تلقیح‌شده با قارچ میکوریز، بیش‌ترین کارایی تلقیح میکروبی (۲۲/۷۳ درصد) را داشت که تفاوت معنی‌داری را با گیاهان تلقیح‌شده با باکتری *باسیلوس* (۲/۲۳ درصد) نشان داد. در تیمار کاربرد کود آلی، گیاه تلقیح‌شده با قارچ میکوریزا (۱۵/۷۶ درصد) و تیمار باکتری *باسیلوس* (۸/۳۴ درصد) بود. این نتایج نشان می‌دهد تأثیر تلقیح قارچ میکوریزی در خاک‌های فقیر از لحاظ مقدار ماده آلی، خیلی بیش‌تر از خاک‌های غنی از لحاظ ماده آلی است. بیدوندو و همکاران (۷) نشان دادند که تلقیح *Glomus intraradices* باعث افزایش رشد سویا تا ۱۷/۳۲ درصد نسبت به گیاهان شاهد غیرمیکوریزایی شد. بیش‌ترین زیست‌توده خشک در گیاهان سویا تیمارشده با باکتری *پینی‌باسیلوس* (*Paenibacillus* sp.) دیده شد، و اثر تلقیح میکروبی (MIE) ۱۰/۶ درصد برای تیمار باکتری و ۱۸/۲

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش تیمارهای کود آلی و تلقیح میکروبی بر صفات مورد بررسی فلفل دلمه‌ای.

Table 3. Mean comparisons of the interaction effect of organic fertilizer and microbial inoculation on bell pepper growth traits.

تیمارها Treatments		اثر تلقیح میکروبی (درصد) MIE (%)	جمعیت میکروبی ($\times 10^6$ CFU g^{-1}) Microbial population ($\times 10^6$ CFU g^{-1})	نسبت جمعیت ریزوسفری به غیرریزوسفری R/S ratio	جذب فسفر (گرم در مترمربع) P uptake ($g\ m^{-2}$)	جذب پتاسیم (گرم در مترمربع) K uptake ($g\ m^{-2}$)
با کود آلی With organic fertilizer	تلقیح میکوریزا Mycorrhizal inoculation	15.76b	11.00a	110.0a	2.29a	37.26b
	تلقیح باسیلوس *Bacillus* sp.	8.34c	1.40d	14.0d	2.00ab	46.48a
	میکوریزا+ باسیلوس Mycorrhize+ Bacillus	5.76d	1.35d	13.5d	1.71c	33.58bc
	شاهد Control	0.00	1.20d	12.0d	1.56	38.04b
بدون کود آلی Without organic fertilizer	تلقیح میکوریزا Mycorrhizal inoculation	22.73a	4.00c	40.0c	1.95b	39.26b
	تلقیح باسیلوس *Bacillus* sp	2.23e	0.75e	6.5e	1.71c	38.28b
	میکوریزا+ باسیلوس Mycorrhize+ Bacillus	6.11cd	9.00b	90.0b	1.86bc	38.99b
	شاهد Control	0.00	0.65e	7.5e	1.41d	32.46c

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد است.

Means with the same letters in each column indicate no significant difference based on Duncan's test at 5% probability level.

درصد برای تیمار ترکیب باکتری با قارچ میکوریز مشاهده شد. میوتیوکومار و همکاران (۳۲) نیز مشاهده کردند که اثر تلقیح میکروبی (MIE) در تیمارهای مختلف میکروبی متفاوت است و در گیاه تلقیح‌شده به‌صورت ترکیبی از قارچ میکوریزا، *ازتوباکتر* و *آزوسپیریلوم* بیش‌ترین (۶۲/۲ درصد) بود.

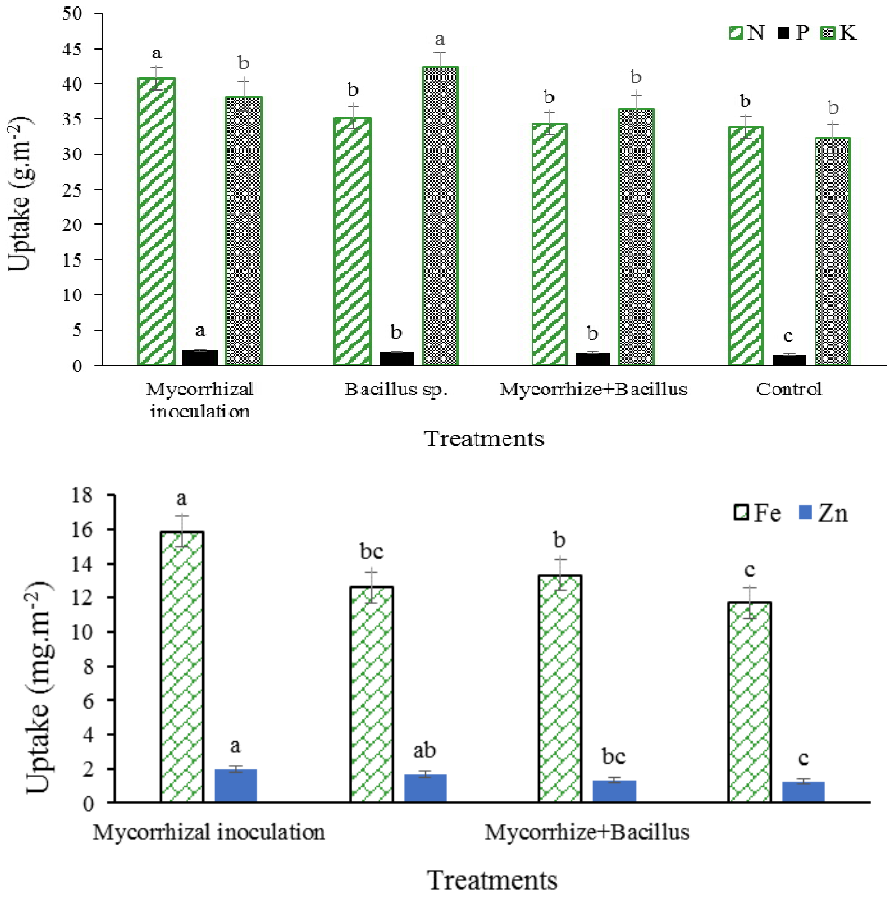
جمعیت میکروبی در ریزوسفر و نسبت R/S

تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد که جمعیت میکروبی و نسبت R/S (جمعیت میکروبی خاک ریزوسفری به جمعیت میکروبی خاک غیرریزوسفری) تحت تأثیر کاربرد کود آلی قرار نگرفت ولی تاثیر تیمار تلقیح میکروبی و برهم‌کنش تیمار کود آلی با تیمار تلقیح میکروبی در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بوده‌اند. اثر برهم‌کنش کود آلی و تلقیح میکروبی بر جمعیت میکروبی ریزوسفر و نسبت R/S معنی‌دار ($p < 0.05$) شد (جدول ۳)، به‌طوری‌که بیش‌ترین جمعیت میکروبی (CFU g^{-1} ۱/۱×۱۰^{۷}) و نسبت R/S (۱۱۰/۰) در تیمار کاربرد کود آلی با تلقیح میکوریز حاصل شد و کم‌ترین مقدار در تیمار بدون کاربرد کود آلی و شاهد بود. این نتایج نشان می‌دهد مصرف کود آلی می‌تواند جمعیت میکروبی خاک ریزوسفری را افزایش دهد. نسبت R/S به نوع گیاه و نوع میکروب بستگی دارد ولی تحت تأثیر منطقه قرار نمی‌گیرد و هر چه این نسبت بیش‌تر باشد وابستگی میکروب به ریشه و تراوشات ریشه‌ای بیش‌تر است. اگر این نسبت کم‌تر از یک باشد یعنی ریشه برای آن میکروب بازدارندگی ایجاد کرده است. برای باکتری‌ها، مقادیر این شاخص معمولاً دردامنه ۵ تا ۲۰ و گاهی تا ۱۰۰ (برای باکتری‌های استراتژی r) متغیر است (۳۵). علاوه بر این، تغییر در نسبت R/S، معیاری برای ارزیابی سلامت کلی گیاهان است. به‌طور معمول، نسبت R/S زمانی که گیاهان تحت تنش مواد مغذی هستند افزایش می‌یابد، زیرا گیاهان منابع بیش‌تری را برای افزایش کسب منابع محدودکننده اختصاص می‌دهند و نسبت R/S در شرایط کافی منابع کاهش می‌یابد (۴۲).

جذب عناصر غذایی

همان‌طوری که تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان می‌دهد، جذب نیتروژن ($p < 0.01$) و فسفر ($p < 0.05$) به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر کاربرد کود آلی قرار گرفت ولی اثر این تیمار بر جذب عناصر پتاسیم، آهن و روی از لحاظ آماری معنی‌دار نشد. درحالی‌که جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن و روی به‌طور معنی‌داری ($p < 0.01$) تحت تأثیر تیمار تلقیح میکروبی قرار گرفت. برهم‌کنش تیمارها هم جذب فسفر ($p < 0.05$) و پتاسیم ($p < 0.01$) را تحت تأثیر قرار داده و معنی‌دار شد. مقایسه میانگین نشان داد (جدول ۲) که جذب نیتروژن در تیمار کاربرد کود آلی بیش‌تر (۳۸/۹۶ گرم بر مترمربع) از تیمار بدون کاربرد کود آلی است. در تیمار تلقیح میکروبی، بیش‌ترین جذب نیتروژن (۴۰/۷۵ گرم در مترمربع) در تیمار قارچ میکوریزی دیده شد که نسبت به شاهد ۲۰/۶ درصد افزایش یافت. تیمار تلقیح باکتری *باسیلوس* در مرتبه دوم قرار گرفت که نسبت به شاهد افزایش ۴/۰ درصدی را نشان داد. بیش‌ترین جذب فسفر (۲/۲۹ گرم بر مترمربع) در تیمار کاربرد کود آلی و تلقیح قارچ میکوریز دیده شد (شکل ۳) که در تیمار بدون کاربرد کود آلی، جذب فسفر به ۱/۹۵ گرم بر مترمربع کاهش یافته است. البته تأثیر معنی‌دار کاربرد کود آلی بر بقیه صفات هم از جمله درصد کلونیزاسیون، عملکرد، وزن خشک اندام هوایی و اثر تلقیح میکروبی (MIE) دیده شد. تیمار قارچ میکوریزی افزایش ۴۶/۸ درصدی در جذب فسفر توسط گیاه فلفل را نشان داد. اعتصامی و همکاران (۱۷) و کابلو و همکاران (۱۰) نیز افزایش جذب فسفر گیاه را با کاربرد توام قارچ میکوریزا آربسکولار و باکتری-های حل‌کننده فسفات نشان دادند.

جذب پتاسیم در تیمار کاربرد کود آلی و تلقیح با باکتری *باسیلوس* به بیش‌ترین مقدار (۴۶/۴۸ گرم بر مترمربع) رسید که نسبت به شاهد ۲۲/۳ درصد افزایش نشان داد (جدول ۳) ولی در تیمار بدون کاربرد کود آلی، بیش‌ترین جذب پتاسیم در تیمار قارچ میکوریز مشاهده شد که به‌جزء با شاهد، با بقیه تیمارها از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نداشت. مقایسه میانگین نشان داد (شکل ۲) که جذب آهن (Fe) و روی (Zn) تحت تأثیر تیمار کود آلی قرار نگرفتند ولی تحت تأثیر تیمارهای تلقیح میکروبی قرار گرفتند، به‌طوری‌که جذب آهن (۱۵/۸۶ میلی‌گرم بر مترمربع) و روی (۱/۹۸ میلی‌گرم بر مترمربع) در تیمار قارچ میکوریزی بیش‌تر از بقیه تیمارها شد. جذب آهن در تیمار قارچ میکوریزی نسبت به شاهد ۳۵/۶ درصد و جذب روی ۵۷/۲



شکل ۲. مقایسه میانگین تاثیر تیمارهای تلقیح میکروبی بر جذب عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم در فلفل دلمه‌ای (ستون‌هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

Fig. 2. Mean comparisons of the effect of microbial inoculation treatments on nutrients uptake of N, P, K (A) and Fe and Zn (B) in bell pepper growth traits; Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).
Mycorrhizal inoculation (تلقیح میکوریزا), *Bacillus* sp. (تلقیح گونه‌های باسیلوس),
Mycorrhize+ *Bacillus* (تلقیح میکوریزا + باسیلوس), Control (شاهد).

درصد افزایش را نشان داد. همزیستی میکوریزی علاوه بر کمک قابل توجه به تامین فسفر برای گیاهان، می‌تواند به گیاهان در جذب بیش‌تر عناصر غذایی مانند مس، پتاسیم، منیزیم، نیتروژن و روی کمک کند، به‌ویژه زمانی‌که به اشکال کم‌محلول در خاک وجود داشته باشند (۱۷). قارچ میکوریزا سطح جذب منطقه ریشه را ۱۰۰-۱۰ درصد افزایش می‌دهد و توانایی گیاه را برای استفاده بیش‌تر از منابع خاک بهبود می‌بخشد. این قارچ‌ها با افزایش سطح جذب ریشه‌ها و همچنین تولید مواد شیمیایی مانند گلومالین (گلیکوپروتئین ترشح شده توسط هیف‌ها و اسپورها) جذب مواد مغذی را افزایش می‌دهند. گلومالین در خاک به جذب مواد مغذی مانند آهن و فسفر که به سختی حل می‌شوند کمک می‌کند (۶، ۱۷ و ۴۲).این نتایج، با یافته‌های انگلوکاستر و همکاران (۳) و جوو و همکاران (۴) همخوانی دارد.

همبستگی خطی بین صفات

همبستگی خطی (پیرسون) بین صفات اندازه‌گیری‌شده در جدول (۴) نشان داده شد. عملکرد میوه با وزن خشک

جدول ۴. ضرایب همبستگی پیرسون بین صفات اندازه‌گیری‌شده گیاه فلفل دلمه‌ای گلخانه‌ای.

Table 4. Pearson's correlation coefficients between measured traits in the greenhouse bell pepper plants.

وزن تازه شاخساره (Wf)	1.00									
وزن خشک شاخساره (Wd)	0.95**	1.00								
قطر میوه (Fd)	0.52**	0.58*	1.00							
تعداد میوه (Fn)	0.69**	0.76**	0.39	1.00						
عملکرد (Y)	0.95**	0.95**	0.52*	0.89**	1.00					
جمعیت میکروبی (Mp)	0.50*	0.54**	-0.06	0.62**	0.60**	1.00				
جذب نیتروژن (Nu)	0.84**	0.87**	0.48*	0.67**	0.82**	0.30	1.00			
جذب فسفر (Pu)	0.79**	0.82**	0.34	0.66**	0.79**	0.63**	0.63**	1.00		
جذب پتاسیم (Ku)	0.39	0.41*	0.46*	0.19	0.32	0.12	0.23	0.57**	1.00	
جذب آهن (Fu)	0.44*	0.48*	0.15	0.67**	0.57**	0.37	0.49*	0.41*	0.11	1.00
جذب روی (Zu)	0.42*	0.49*	0.47*	0.56**	0.52**	0.29	0.27	0.58**	0.45*	0.61**

ns، ** و * به‌ترتیب بیانگر همبستگی غیرمعنی‌دار و اثر معنی‌دار در سطوح احتمال یک و پنج درصد است.

ns, ** and * denote non-significant and significant correlation at the 1 and 5 % probability levels, respectively.
Wf (Shoot fresh weight), Wd (Shoot dry weight), Fd (Fruit diameter), Fn (Fruit number), Y (Yield), Mp (Microbial population), Nu (N uptake), Pu (P uptake), Ku (K uptake), Fu (Fe uptake), Zu (Zn uptake).

شاخساره (**۰/۹۵=r)، تعداد میوه (**۰/۸۹=r)، قطر میوه (*۰/۵۲=r)، میزان جذب نیتروژن (**۰/۸۲=r)، جذب فسفر (**۰/۷۹=r)، جذب آهن (**۰/۵۷=r) و جذب روی (**۰/۵۲=r) همبستگی مثبت معنی‌دار داشت. جمعیت میکروبی خاک ریزوسفر با وزن تازه اندام هوایی (*۰/۵۰=r)، وزن خشک اندام هوایی (**۰/۵۴=r)، تعداد میوه (**۰/۶۲=r) و عملکرد میوه (*۰/۶۰=r) همبستگی مثبت معنی‌دار داشت. رگوو و همکاران (۳۷) نیز همبستگی مثبت عملکرد میوه با وزن میوه و ماده خشک میوه و همچنین همبستگی منفی عرض بوته، ارتفاع، ارتفاع دو شاخه اول و تشکیل میوه بین شاخه‌ها با عملکرد میوه را در گیاه فلفل (*Capsicum baccatum*) گزارش دادند.

نتیجه‌گیری

قارچ میکوریز آربوسکولار و همزیستی با گیاه بهترین ارتباط بیولوژیک است که باعث بهبود رشد و بهره‌وری گیاهان می‌شود که در تولید فلفل دلمه‌ای نقش بسزایی در افزایش عملکرد و بهبود رسیدگی میوه دارد. جمع‌بندی نتایج پژوهش حاضر در مورد اثر کود آلی و تلقیح میکروبی با قارچ میکوریزا بر رشد فلفل دلمه‌ای نشان داد که کاربرد تیمارهای مذکور تأثیر معنی‌داری بر اکثر صفات مورد بررسی به همراه داشته و سبب افزایش آنها (به استثنای ارتفاع گیاه) شد. کاربرد کود آلی به‌طور قابل توجهی وزن شاخساره، قطر و تعداد میوه، عملکرد، درصد کلونیزاسیون ریشه توسط میکوریزا، و جذب نیتروژن و فسفر را افزایش داد. تلقیح قارچ میکوریزا به‌طور قابل توجهی وزن خشک شاخساره، تعداد و عملکرد میوه و جذب نیتروژن، فسفر، آهن و روی را در فلفل دلمه‌ای بهبود بخشید. علاوه بر این، تلقیح باکتری باسیلوس به‌تنهایی، بر قطر میوه و جذب پتاسیم و روی تأثیر معنی‌داری داشت و از طرفی ترکیب قارچ میکوریزا با باکتری باسیلوس تأثیر قابل توجهی بر صفات رشدی فلفل دلمه‌ای نشان نداد. به‌طور کلی استفاده از قارچ‌های

میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد در تولید فلفل می‌تواند نقش مهمی در پایداری کشاورزی و عملکرد اکولوژیک آن داشته باشد، زیرا می‌توانند بهره‌وری را به میزان قابل توجهی افزایش داده و استفاده از مواد شیمیایی مختلف زراعی مورد استفاده در تولید فلفل را کاهش دهند.

منابع مورد استفاده

1. Abbas, R., Rasul, S., Aslam, K., Baber, M., Shahid, M., Mubeen, F., Naqqash, T., 2019. Halotolerant PGPR: a hope for cultivation of saline soils. *Journal of King Saud University – Science* 31(4): 1195–1201.
2. Ali-Ehyayi, M., Behbahanizadeh, A.A., 1993. Description of Soil Chemical Analysis Methods. Technical Journal No. 893, Soil and Water Research Institute, Tehran, 129 p. (in Persian)
3. Angulo-Castro, A., Ferrera-Cerrato, R., Alarcón, A., Almaraz-Suárez, J.J., Delgadillo-Martínez, J., Jiménez-Fernández, M., García-Barradas, O., 2021. Improved growth of bell pepper (*Capsicum annuum*) plants by inoculating arbuscular mycorrhizal fungi and beneficial rhizobacteria. *Scientia Fungorum* 51: 258–281.
4. Azatykandeh, H., Bolandnazar, S., Sarikhani, M., 2018. Effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhiza on growth, yield and quality of onion (*Allium cepa* L.) Horand landrace. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production* 28(4): 41–57.
5. Bagyaraj, D.J., 1992. Vesicular-arbuscular mycorrhiza: application in agriculture. In: Norris, J.R., Read, D.J., Varma, A.K. (Eds.), Methods in Microbiology. Academic Press, London, pp. 819–833.
6. Begum, N., Cheng, Q., Abass, A.M., Sajjad, R., Ishfaq, K.M., Muhammad, A., Lixin, Z., 2019. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science* 10: 1–15.
7. Bidondo, L.F., Silvani, V., Colombo, R., Pérgola, M., Bompadre, J., Godeas, A., 2011. Pre-symbiotic and symbiotic interactions between *Glomus intraradices* and two *Paenibacillus* species isolated from AM propagules, In vitro and in vivo assays with soybean (AG043RG) as plant host. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 1866–1872.
8. Bremner, J.M., Mulvaney, C.S., 1982. Nitrogen total. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 595–624.
9. Buczkowska, H., Sałata, A., 2020. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and plant irrigation with yield –forming factors in organic sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivation. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus* 19: 125–138.
10. Cabello, M., Irrazabal, G., Bucsinszhy, A.M., Saparrat, M., Schalamuck, S., 2005. Effect of an arbuscular mycorrhizal fungus, *G. mosseae* and a rock-phosphate-solubilizing fungi, *P. thomii* on *Mentha piperita* growth in a soilless medium. *Journal of Basic Microbial* 45(3): 182–189.
11. Compant, S., Clément, C., Sessitsch, A., 2010. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biology and Biochemistry* 42(5): 669–678.
12. Du Jardin, P., 2015. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae* 196: 3–14.
13. Egamberdieva, D., Wirth, S., Bellingrath-Kimura, S.D., Mishra, J., Arora, N.K., 2019. Salt-tolerant plant growth promoting rhizobacteria for enhancing crop productivity of saline soils. *Frontiers in Microbiology* 10: 2791. https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02791.
14. Emami, A., 1996. Plant Analysis Methods, Soil and Water Research Organization. Publication 982. Vol. 1: pp. 128. (in Persian)
15. Enjili, M., Esmaielpour, B., Fatemi, H., Jalilvand, P., 2018. Effects of mycorrhizal fungi on growth and yield of sweet pepper (*Caspicum annuum* L.) under drought stress conditions. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture* 9(2): 39–52. (in Persian with English abstract)
16. Estrada-Luna, A., Davies, F., 2003. Arbuscular mycorrhizal fungi influence water relations, gas exchange, abscisic acid and growth of micropropagated chile ancho pepper (*Capsicum annuum*) plantlets during acclimatization and post-acclimatization. *Journal of Plant Physiology* 160(9): 1073–1083.
17. Etesami, H., Jeong, B.R., Glick, B.R., 2021. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi, phosphate–solubilizing bacteria, and silicon to P uptake by plant. *Frontiers in Plant Science* 12: 699618. doi: 10.3389/fpls.2021.699618.
18. Food and Agriculture Organization, 2017. The Future of Food and Agriculture-Trends and Challenges. Food and

Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 180 p.
19. Garham, J.H., Miller, R.M., 2005. Mycorrhizas: gene to function. *Plant and Soil* 274: 79–100.
20. Gerhardson, B., 2002. Biological substitutes for pesticides. *Trends in Biotechnology* 208: 338–343.
21. Giovannetti, M., Mosse, B., 1980. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytologist* 84(3): 489–500.
22. Hirel, B., Tétu, T., Lea, P.J., Dubois, F., 2011. Improving nitrogen use efficiency in crops for sustainable agriculture. *Sustainability* 39: 1452–1485.
23. Joo, G., Kim, Y., Lee, I., Song, K., Rhee, I., 2004. Growth promotion of red pepper plug seedlings and the production of gibberellins by *Bacillus cereus*, *Bacillus macroides* and *Bacillus pumilus*. *Biotechnology Letters* 26: 487–491.
24. Katznelson, H., 1946: The rhizosphere effect of mangels on certain groups of microorganisms. *Soil Science*, 62: 343–354.
25. Kermanizadeh, B., Gholamalizadeh, A., Sabbagh, S.K., Sirousmehr, A., 2016. Effect of arbuscular mycorrhiza fungi and organic fertilizers on yield and nutrients uptake of two wheat cultivars. *Journal of Soil and Plant Interaction* 7 (2):59–69. (in Persian with English abstract)
26. Kumar, A., Elad, Y., Tsechansky, L., Abrol, V., Lew, B., Offenbach, R., Graber, E.R., 2018. Biochar potential in intensive cultivation of *Capsicum annuum* L. (sweet pepper): crop yield and plant protection. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 98: 495–503.
27. Kumari, R., Bhatnagar, S., Deepali, N, Mehla, N, Vashistha, A., 2022. Potential of organic amendments (AM fungi, PGPR, vermicompost and seaweeds) in combating salt stress- A review. *Plant Stress* 6:100111. https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100111
28. Lara-Capistrán, L., Zulueta-Rodríguez, R., Murillo-Amador, B., Romero-Bastidas, M., Rivas-García, T., Hernández-Montiel, L.G., 2021. Agronomic response of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) to application of *Bacillus subtilis* and vermicompost in greenhouse. *Terra Latinoam* 38(3): 693–704.
29. Lobley, M., Butler, A., Reed, M., 2009. The contribution of organic farming to rural development: an exploration of the socio-economic linkages of organic and non-organic farms in England. *Land Use Policy* 263: 723–735.
30. McGonigle, T., Miller, M., Evans, D., Fairchild, G. and Swan, J., 1990. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular—arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist* 115(3): 495–501.
31. Mena-Violante, H.G., Ocampo-Jiménez, O., Dendooven, L., Martínez-Soto, G., González-Castañeda, J., Davies, J. Olalde-Portugal, V., 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance fruit growth and quality of chile ancho (*Capsicum annum* L cv San Luis) plants exposed to drought. *Mycorrhiza* 16(4): 261–267.
32. Muthukumar, T., Udaiyan, K., Rajeshkannan, V., 2001. Response of neem (*Azadirachta indica* A. Juss) to indigenous arbuscular mycorrhizal fungi, phosphate-solubilizing and asymbiotic nitrogen fixing bacteria under tropical nursery conditions. *Biology and Fertility of Soils* 34(16): 417–426.
33. Padmavathi, T., R. Dikshit, Seshagiri, S., 2015. Effect of *Rhizophagus* spp. and plant growth-promoting *Acinetobacter junii* on *Solanum lycopersicum* and *Capsicum annuum*. *Brazilian Journal of Botany* 38: 273–280.
34. Pandey, A., Palni, L.M., 2007. The rhizosphere effect in trees of the Indian central Himalaya with special reference to altitude. *Applied Ecology and Environmental Research* 5(1): 93–102.
35. Pinton, R., Varanini, Z., Nannipieri, P., 2001: The Rhizosphere. Marcel Dekker, Inc. New York, Basel.
36. Prasad, M., Srinivasan, R., Chaudhary, M., Choudhary, M., Jat, L.K., 2019. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) for sustainable agriculture: perspectives and challenges. In: Singh, A.K., Kumar, A., Singh, P.K. (Eds.), PGPR Amelioration in Sustainable Agriculture (Food Security and Environmental Management), pp. 129–157.
37. Rego, E.R.D., Rego, M.M.D., Cruz, C.D., Finger, F.L., Casali, V.W.D., 2011. Phenotypic diversity, correlation and importance of variables for fruit quality and yield traits in Brazilian peppers (*Capsicum baccatum*). *Genetic Resources and Crop Evolution* 58(6): 909–918.
38. Rhoades, J.D., 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Tohnston, C.T., Sumner, M.E. (Eds.), Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 417–435.
39. Stewart-Wade, S.M., 2020. Efficacy of organic amendments used in containerized plant production: part 1. Compost-based Amendments. *Scientia Horticulturae* 266. PubMed: 108856. https://doi.org/ 10.1016/j.scienta.2019.108856.
40. Subramanian, K.S., Charest, C., Dwyer, L.M., Hamilton, R.I., 1997. Effects of mycorrhiza on leaf water potential, sugar and P contents during and after recovery of maize. *Canadian Journal of Botany* 75(9): 1582–1591.
41. Tabatabai, S.J., 2009. Principles of Mineral Nutrition of Plants. Publishing the Author, Tabriz, 389 p.

42. Thangavelu, M., Arumugam, P., 2019. Influence of an arbuscular mycorrhizal fungus and phosphate-solubilizing bacterium inoculation at stem cutting stage on P uptake and growth of *Impatiens walleriana* plants in an unsterile field soil. *Journal of Horticultural Research* 27(2): 11–22.
43. Thomas, G.W., 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Tohnston, C.T., Sumner, M.E. (Eds.), Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 475–490.
44. Trimananda, O., Syafruddin, O., Syamsuddin K., 2018. The effect of dosage of mycorrhizal fertilizer on growth and yield of some varieties of chilli (*Capsicum annuum* L.) on inceptisol Krueng Raya Aceh Besar. *International Journal of Agronomy and Agriulture Research* 13: 46–54.
45. Tuomisto, H.L., Scheelbeek, P.F.D., Chalabi, Z., Green, R., Smith, R.D., Haines, A., Dangour, A.D., 2017. Effects of environmental change on population nutrition and health: a comprehensive framework with a focus on fruits and vegetables. *Wellcome Open Research* 2: 21. https://doi.org/10.12688/wellcomeopenres.11190.2.
46. Yilma, G., 2020. The role of mycorrhizal fungi in pepper (*Capsicum annuum*) production. *International Journal of Advanced Research* 6(12): 59–65.
47. Zhang, H., Zhu, J., Gong, Z., Zhu, J.K., 2022. Abiotic stress responses in plants. *Nature Reviews Genetics* 23(2): 104–119.

J. Soil and Plant Interactions, Vol. 13, No. 4, Winter 2023, Isfahan Univ. Technol., Isf., Iran.
https://jspi.iut.ac.ir EISSN: 2783-5286 DOI: 10.47176/jspi.13.4.20821

Mycorrhizal Fungi and *Bacillus* sp. Along With Organic Fertilizer on The Growth and Nutrient Uptake of Bell Pepper (*Capsicum annum* L.)

H. Nejati Sini[1], R. Barzegar[1], S. Soodaee Mashaee[2*] and M. Ghasemi Ghahsare[1]

(Received: 25 January 2023; Accepted: 20 February 2023)

Abstract

Climate changes and agricultural practices such as excessive use of chemical fertilizers and pesticides have intensified the effect of abiotic pressures on crop productivity and have destroyed the ecosystem. One of the strategies to moderate these pressures is the use of organic fertilizers, mycorrhizal symbiosis and microbial inoculation. In order to investigate the effect of organic fertilizer, mycorrhizal fungi and *Bacillus* on the growth characteristics of bell pepper, an experiment was carried out as split plots on a randomized complete block design with the main factor of organic fertilizer at two levels (with and without organic fertilizer) and the secondary factor of biofertilizer treatments at four levels [arbuscular mycorrhizal (*Rhizophagus irregularis* + *Funeliformis mosseae*), *Bacillus* (*B. subtilis* + *B. amyloliquefaciens*)., mycorrhizal + bacteria mixture and control without inoculation] in three replications. Soil biological properties, nutrients uptake and growth characteristics and yield of the fruit were investigated after harvest. The results showed that the organic fertilizer and mycorrhizal fungi application increased the shoot dry weight (10.3% and 17.4%, respectively) and fruit yield (11.5% and 19.9%, respectively) compared to the control. The highest microbial population (1.1×10^7 CFU g^{-1}) and R/S ratio (110.0) were obtained in the organic fertilizer application treatment with mycorrhizal inoculation. Mycorrhizal symbiosis with organic fertilizer application improved the uptake of nitrogen (20.6%), phosphorus (46.8%), iron (35.6%) and zinc (57.2%) compared to the control, and potassium uptake was improved by *Bacillus* treatment as compared to the control, it increased by 22.3%. In general, the combination of organic fertilizer and mycorrhizal fungi seems to be suitable for greenhouse bell pepper cultivation.

Keywords: Fruit yield, Growth promoting bacteria, Pepper, Phosphorus, Mycorrhizal symbiosis.

Background and Objective: Global agriculture faces various problems such as producing food for about 8 billion people by the middle of the 21st century. At the same time, people are struggling with economic conditions and malnutrition, as well as fierce competition for natural resources and climate change (4). Use of chemical fertilizers and pesticides has led to various environmental problems around the world. Organic

1- Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Chaharmahal Bakhtiari, Iran.
2- Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Chaharmahal Bakhtiari, Iran.
* Corresponding author, Email: soodaie@sku.ac.ir

farming (and the use of organic and bio-fertilizers) is a holistic development method that improves environmental sustainability, habitats, biogeochemical cycles and soil biological activity without the use of conventional fertilizers or pesticides (2). Mycorrhizal fungi have a significant environmental impact by improving soil quality such as soil biomass, structure and aggregation (1). Beneficial rhizosphere microorganisms that play a role in promoting plant growth can directly or indirectly promote plant growth. In this research, bell pepper plant was used, which is one of the most important fruit vegetables, that plantation area and its consumption are increasing (3). This research seeks to understand the relationship between mycorrhizal fungi and *Bacillus* bacteria with or without the use of organic fertilizers and their effect on the bell peppergrowth and nutrients uptake under greenhouse conditions.

Methods: This research was carried out as split plots on a randomized complete block design with the main factor of organic fertilizer at two levels (with and without organic fertilizer) and the secondary factor of biofertilizer treatments at four levels [arbuscular mycorrhizal (*Rhizophagus irregularis* + *Funeliformis mosseae*), *Bacillus* (*B. amyloliquefaciens* + *B. subtilis*), mycorrhizal + bacteria mixture and control without inoculation] in three replications. Organic fertilizer with the origin of decomposed animal manure was added in the rate of 3 kg m^{-2} to the bed soil in the main plots. Arbuscular mycorrhizal inoculum was prepared from Pishtaz Varian Biotechnology Company, and was added to planting hole in 10 grams (20 spores per gram) during seedling plantation. Pepper seedlings were placed in a suspension containing *Bacillus* bacteria (two liters containing 10^8 bacteria cells per liter) for 25 minutes and then planted in the greenhouse bed (1). Soil biological properties, nutrients uptake, growth characteristics and yield of the fruit were investigated after harvest.

Results: The results showed that the organic fertilizer and mycorrhizal fungi application increased the shoot dry weight (10.3% and 17.4%, respectively) and fruit yield (11.5% and 19.9%, respectively). The highest microbial population (1.1×10^7 CFU g^{-1}) and R/S ratio (110.0) were obtained in the organic fertilizer application treatment with mycorrhizal inoculation. Plants inoculated with mycorrhizal fungi and without organic fertilizer had the highest microbial inoculation efficiency (22.73%), which showed a significant difference with the plants inoculated with *Bacillus* bacteria (2.23%). Mycorrhizal symbiosis with organic fertilizer application improved the uptake of nitrogen (20.6%), phosphorus (46.8%), iron (35.6%) and zinc (57.2%) compared to the control. The potassium uptake was improved by *Bacillus* treatment as compared to the control (i.e., it increased by 22.3%). In general, the combination of organic fertilizer and mycorrhizal fungi seems to be suitable for greenhouse bell pepper cultivation.

Conclusions: Arbuscular mycorrhizal fungi symbiosis with plant is the best biological relationship that improves the growth and productivity of plants. It plays a significant role in increasing yield and improving fruit ripening in bell pepper production. Overall, the effect of organic fertilizer and microbial inoculation with mycorrhizal fungi and *Bacillus* bacteria on the growth of bell pepper showed that the application of these treatments had a significant effect on the most of the measured characteristics and increased these traits except for plant height.

References:

1. Kumari, R., Bhatnagar, S., Deepali, N, Mehla, N, Vashistha, A. 2022. Potential of organic amendments (AM fungi, PGPR, vermicompost and seaweeds) in combating salt stress- a review. *Plant Stress* 6: 100111. https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100111.

2. Lobley, M., Butler, A., Reed, M. 2009. The contribution of organic farming to rural development: an exploration of the socio-economic linkages of organic and non-organic farms in England. *Land Use Policy* 263: 723–735.

3. Prasad, M., Srinivasan, R., Chaudhary, M., Choudhary, M., Jat, L.K., 2019. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) for sustainable agriculture: perspectives and challenges. In: Singh, A.K., Kumar, A., Singh, P.K. (Eds.), PGPR Amelioration in Sustainable Agriculture (Food Security and Environmental Management), pp. 129–157.

4. Zhang, H., Zhu, J., Gong, Z., Zhu, J.K., 2022. Abiotic stress responses in plants. *Nature Reviews Genetics* 23(2): 104–119.