Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Effect of plant growth-promoting rhizobacteria inoculation on soil characteristics, nutrients uptake and growth of bell pepper (*Capsicum annum* L.)

Mohammad Amin Khodabin[1] | Saheb Soodaee Mashaee[2]✉ | Rahim Barzegar[3] Masood Ghasemi Ghahsare[4]

1. Department of Horticulturer Science, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Charmahal-va-Bakhtiari, Iran. E-mail: aminkhodabin1372@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Charmahal-va-Bakhtiari, Iran. E-mail: soodaie@sku.ac.ir
3. Department of Horticulturer Science, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Charmahal-va-Bakhtiari, Iran. E-mail: Barzegar@ sku.ac.ir
4. Department of Horticulturer Science, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Charmahal-va-Bakhtiari, Iran. E-mail: mghasemi1352@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Dec. 17, 2022

Revised: March. 1, 2023

Accepted: March. 1, 2023

Published online: March. 21, 2023

Keywords:
Azotobacter,
Enterobacter,
Nitrogen uptake,
Soil biological properties,
Yield.

ABSTRACT

In order to investigate the effect of growth-promoting bacteria inoculation on soil characteristics, nutrients uptake and growth of bell pepper, a randomized complete block design with five species of growth-promoting bacteria (*Bacillus subtilis*, *Azospirillum lipoferum*, *Azotobacter chroococcum*, *Enterobacter cloacae* and *Pseudomonas putida*) with three repetitions was carried out in Isfahan Wheat Field greenhouse in 2021. The chemical and biological properties of the soil, NPK uptake, and the growth and yield characteristics were investigated. The results showed that the addition of growth-promoting bacteria effects on some soil characteristics and bell pepper growth. The treatments showed a significant difference in terms of total nitrogen, phosphorus and potassium available in soil, respiration and rhizospheric microbial population, NK uptake, yield and fruit number ($p \leq 0.01$). The best soil nitrogen content (0.44%), nitrogen uptake (28.8 g.m-2) and shoot dry weight (0.565 g.m-2) were observed in *Azotobacter chroococcum* treatment. The highest rhizospheric microbial population (7.6×106 cfu.g-1) and R/S ratio was 47.9 in *Enterobacter cloacae* treatment. Fresh weight and dry weight of plant shoot were higher in *Azospirillum lipoferum* treatment, which was not significantly different from *Azotobacter chroococcum* and *Enterobacter cloacae* treatments. In the treatment of *Enterobacter cloacae*, the yield (18.8 kg.m-2) and the fruits number (65.8/m2) were higher. The application of *Enterobacter cloacae*, *Azotobacter chroococcum* and *Azospirillum lipoferum* bacteria was higher effect on the growth indicators of pepper, which can be recommended for the use of these bacteria as biofertilizers in bell pepper cultivation.

Cite this article: Khodabin, M. A., Soodaee Mashaee, S., Barzegar, R. & Ghasemi Ghahsare, M. (2023). Effect of growth-promoting bacteria inoculation on soil characteristics, nutrients uptake and growth of bell pepper (Capsicum annum L.). Iranian Journal of Soil and Water Research, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (1), 1-13. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.352612.669412

© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.352612.669412

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۴، شماره ۱ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

تأثیر تلقیح باکتری‌های محرک رشد گیاه بر ویژگی‌های خاک، جذب عناصر غذایی و رشد فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annum* L.)

محمدامین خدابین[۱] | صاحب سودائی مشائی[۲]✉ | رحیم برزگر[۳] و مسعود قاسمی قهساره[۴]

۱. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران. رایانامه: aminkhodabin1372@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران. رایانامه: soodaie@sku.ac.ir
۳. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران. رایانامه: Barzegar@sku.ac.ir
۴. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران. رایانامه: mghasemi1352@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۲۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱/۱

واژه‌های کلیدی:
ازتوباکتر،
انتروباکتر،
جذب نیتروژن،
خصوصیات زیستی خاک،
عملکرد.

چکیده

به منظور بررسی اثر تلقیح باکتری‌های محرک رشد بر ویژگی‌های خاک، جذب عناصر غذایی و رشد فلفل دلمه‌ای، پژوهشی در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با پنج گونه از باکتری‌های محرک رشد (*Bacillus subtilis*، *Azospirillum lipoferum*، *Azotobacter chroococcum*، *Enterobacter cloacae* و *Pseudomonas putida*) با سه تکرار در سال ۱۴۰۰در گلخانه گندمزار اصفهان انجام شد. خصوصیات شیمیایی و زیستی خاک، جذب نیتروژن، فسفر و پتاسیم و خصوصیات رشد و عملکرد میوه بعد از برداشت بررسی شدند. نتایج نشان داد که افزودن باکتری‌های محرک رشد بر برخی از ویژگی‌های خاک و رشد فلفل دلمه‌ای تاثیر می‌گذارد. تیمارها از نظر نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل جذب خاک، تنفس و جمعیت میکروبی محیط ریشه، جذب نیتروژن و پتاسیم، عملکرد و تعداد میوه ($p\leq0.01$) تفاوت معنی‌داری نشان دادند. بهترین میزان نیتروژن خاک (۰/۴۴ درصد)، میزان جذب نیتروژن (۲۸/۸ گرم بر مترمربع) و وزن خشک اندام هوایی (۵۶۵/۰ گرم بر مترمربع) در تیمار باکتری *Azotobacter chroococcum* مشاهده شد. بیشترین جمعیت میکروبی ریزوسفر (cfu.g-1106×6/7) و نسبت جمعیت محیط ریزوسفر به غیرریزوسفری (R/S) (۴۷/۹) در تیمار *Enterobacter cloacae* بود. وزن تر و وزن خشک اندام هوایی گیاه در تیمار *Azospirillum lipoferum* بیشتر بود که با تیمار *Azotobacter chroococcum* و *Enterobacter cloacae* تفاوت معنی‌داری نداشت. در تیمار *Enterobacter cloacae*، عملکرد (۱۸/۸ کیلوگرم بر مترمربع) و تعداد میوه (۶۵/۸ در مترمربع) بیشتر بود. مصرف زادمایه باکتری‌های *Enterobacter cloacae*، *Azotobacter chroococcum* و *Azospirillum lipoferum* بر شاخص‌های رشدی فلفل بیشتر بود که می‌توان کاربرد این باکتری ها را به عنوان کود زیستی در پرورش فلفل دلمه‌ای توصیه نمود.

استناد: خدابین، محمدامین؛ سودائی مشائی، صاحب؛ برزگر، رحیم و قاسمی قهساره، مسعود (۱۴۰۲). تأثیر تلقیح باکتری‌های محرک رشد بر ویژگی‌های خاک، جذب عناصر غذایی و رشد فلفل دلمه‌ای (Capsicum annum L.)، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۱)، ۱۳-۱.
https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.352612.669412

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.352612.669412

مقدمه

فلفل دلمه‌ای یا فلفل شیرین (*Capsicum annum* L.)، یکی از محبوب‌ترین سبزیجات است که در سراسر جهان کشت می‌شود. فلفل دلمه‌ای بعد از جعفری به‌دلیل بیشترین ویتامین C و خاصیت اشتها آوری، هضم غذا و مقدار ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و کاروتن یکی از بهترین سبزیجات است. این سبزی به‌دلیل خاصیت آنتی اکسیدانی می‌تواند واکنش‌های اکسیداتیو و مضر را در بدن کاهش دهد و از بروز سرطان و بیماری‌های قلبی و عصبی جلوگیری کند (Akram and Ashraf, 2013). در نتیجه، کشت، کاربرد و مصرف آن سالانه در حال افزایش است (Almadhoun, 2021).

کود زیستی یک کود طبیعی است که حاوی جمعیت زیادی از ریزجانداران مفید است که با تثبیت نیتروژن اتمسفر، حل کردن فسفر خاک، یا تحریک رشد گیاه از طریق سنتز مواد محرک رشد یا متابولیت‌های ثانویه که فرآیند زیستی را فعال می‌کنند، قابلیت دسترسی عناصر غذایی برای گیاه را بهبود می‌بخشند (Chittora et al. 2020). ریزوسفر یک گیاه یک اکوسیستم بسیار رقابتی است که در آن ریزجانداران برای بدست آوردن مواد مغذی از ریشه گیاه رقابت می‌کنند. از آنجا که آنها در داخل یا اطراف ریشه گیاه زندگی می‌کنند و باعث رشد گیاه می‌شوند، برخی از باکتری‌ها به عنوان ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPRs[1]) شناخته می‌شوند (Vejan et al., 2016). باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد از طریق افزایش سطح تماس ریشه، افزایش قابلیت عناصر غذایی در ناحیه ریزوسفر، تولید تنظیم کننده‌های رشد و هم‌زیستی مفید با گیاه میزبان در مراحل مختلف رشد باعث افزایش عملکرد گیاه می‌شوند (Naiji and Souri, 2018). هم‌چنین این ریزجانداران باعث تولید قابل توجهی از هورمون‌های رشد به ویژه انواع جیبرلین، اکسین و سیتوکنین می‌شوند که باعث افزایش رشد و کارایی جذب آب و عناصر غذایی گیاه و بهبود عملکرد آن می‌شوند (Spence and Bais, 2015). استفاده از قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار (*Rhizophagus irregularis*) و باکتری‌های محرک رشد گیاه (*Azotobacter chroococcum*) در ترکیب با کود شیمیایی نشان دادند که ویژگی‌های مرفولوژیکی و بیوشیمیایی فلفل دلمه‌ای در تیمار مخلوط کود شیمیایی با میکوریزا و باکتری *Azotobacter* sp ثبت شد و مقدار عناصر غذایی گیاه در تیمار ۷۵ درصد کود شیمیایی با میکوریزا و *Azotobacter* sp بیشترین مقدار را داشت که این تیمار برای رشد، عملکرد و صفات مرتبط با عملکرد فلفل بهترین بود (Sharma et al., 2022). باکتری‌های حل‌کننده فسفات، ریزجاندارن خاکزی هستند که نقش مهمی در حل کردن فسفر برای گیاهان و امکان استفاده کارآمدتر از کودهای فسفر دارند. باکتری *Bacillus* به دلیل نقش آن در تبدیل فسفر برای این آزمایش انتخاب شد و مشخص شد که یکی از مهم‌ترین باکترهای حل‌کننده فسفات‌ها است (Mohamed et al., 2018). آزمایش مزرعه‌ای با کودهای زیستی *Bacillus* و سیانوباکتر در گیاه فلفل شیرین با تجزیه و تحلیل تولید هورمون گیاهی و حل‌کنندگی فسفات نشان داد که تلقیح مخلوط *Bacillus* و سیانوباکتر باعث بهبود رشد رویشی، محتویات شیمیایی گیاه و فعالیت میکروبی مثبت در ریزوسفر خاک نسبت به گیاهان تلقیح نشده می‌شود. علاوه بر این، نیتروژن و پتاسیم موجود در خاک، هنگامی که باکتری *Bacillus* با سیانوباکتر ترکیب شدند به طور قابل توجهی افزایش یافت، در حالی که فسفر موجود بیشترین افزایش را با باکتری *Bacillus* داشت (Ashmawi et al., 2022). فعالیت آنزیمی چرخه فسفر به طور معکوس با در دسترس بودن فسفر مرتبط است، و زمانی که فسفر یک ماده غذایی محدود کننده است، تقاضا افزایش می‌یابد و در نتیجه فعالیت فسفاتازی در حضور حل-کننده‌های فسفات افزایش می‌یابد. فعالیت فسفاتازی نیز به دنبال تلقیح باکتری *Bacillus* و قارچ مایکوریزا افزایش یافته که به‌عنوان یک سیستم تلقیح مشترک به خوبی با هم کار می‌کنند (Ju et al., 2020).

استفاده از ریزجاندارن محرک رشد به دلیل جذب مواد غذایی باعث گلدهی زودتر گیاه فلفل دلمه‌ای شده‌اند، این گلدهی زود هنگام احتمالاً به خاطر تأثیر باکتری‌های محرک رشد باشد که باعث افزایش در دسترس بودن مواد غذایی به ویژه نیتروژن و فسفر در خاک و ترشح موادی که روند فیزیولوژیکی کربوهیدارت‌ها را تسریع کرده، بوده است، علاوه بر این تیمار کردن فلفل دلمه‌ای به وسیله باکتری محرک رشد باعث افزایش تعداد میوه‌ها در این آزمایش شد (Kumari, et al., 2019). سه گونه باکتری (*Azotobacter vinelandii*، *Bacillus megaterium* و *Frateuria aurantia*) به عنوان مایه تلقیح در تولید گوجه فرنگی نشان دادند که می‌توانند منجر به افزایش قابل‌توجه در عملکرد و کیفیت میوه، افزایش جذب مواد مغذی توسط گیاهان و افزایش فعالیت آنزیمی در بستر در حال رشد شود (Ruiz and Sanjuan, 2022). سیدشریفی و خاوازی (۱۳۹۰) گزارش کردند تلقیح بذرهای ذرت با باکتری‌های محرک رشد به خصوص باکتری *Azospirillum* منجر به افزایش وزن خشک گیاهچه، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه گردید. استفاده از مایه تلقیح میکروبی موجب افزایش

1 Plant Growth Promoting Rhizobacteria

کربن در خاک شد که می‌تواند در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد گیاه اثر مثبت داشته باشد (عنایتی و همکاران، ۱۳۹۸). در پژوهشی دیگر نشان داده شد که تعداد برگ، درصد جوانه‌زنی و طول و عرض برگ در تیمار تلقیح شده گوجه فرنگی با *Azotobacter chroococcum* نسبت به شاهد افزایش یافت (Mahato, Badoni and Chauhan, 2009). محمودزاده و همکاران (۱۳۹۴) گزارش کردند که کاربرد باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد نقش مفید و موثری در بهبود خصوصیات رشدی و غلظت عناصر غذایی در گیاه دارویی نعناع فلفلی داشت. باکتری *Enterobacter*، یکی از ریزجاندارانی است که به عنوان باکتری حل‌کننده فسفات (با قدرت حل‌کنندگی ۲۵۴ میکروگرم در میلی لیتر فسفر نامحلول) معرفی شده است (Bakhshande et al., 2014).

کمبود مواد غذایی گیاه می‌تواند رشد و نمو و عملکرد محصول را کاهش دهد و به ویژه در سیستم‌های تولید فشرده محصولات کشاورزی با عملکرد بالا و زمانی که در شرایط گلخانه‌ای انجام شود، می‌تواند مشکل‌ساز باشد. در محصولاتی که نیاز به مواد غذایی بالایی دارند، اغلب از کوددهی به طور مداوم برای اطمینان از در دسترس بودن مواد مغذی استفاده می‌شود که می‌تواند ضمن آلوده کردن محیط و محصول، افزایش هزینه تولید را برای بهره‌بردار به‌همراه داشته باشد. استفاده از کودهای زیستی روشی نوین برای کاهش مصرف کودهای شیمیایی و ترمیم خاک بستر از لحاظ تنوع میکروبی در راستای کشاورزی پایدار می‌باشد. مطالعه حاضر با هدف بررسی تلقیح باکتری‌های محرک رشد با گیاه فلفل دلمه‌ای و تاثیر آنها بر خصوصیات شیمیایی و زیستی خاک بستر، وضعیت عناصر غذایی گیاه، عملکرد محصول و فعالیت میکروبی در بستر تحت کشت فلفل دلمه‌ای در شرایط گلخانه انجام شده است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه تجاری مزرعه گندم‌زار واقع در منطقه برآن جنوبی استان اصفهان (عرض جغرافیایی: ۳۲/۴۸۳۲۳۹۶ و طول جغرافیایی: ۵۱/۹۰۰۳۲۴۹) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۰ انجام شد. تیمارها شامل پنج گونه باکتری محرک رشد (*Bacillus amyloliquefaciens*، *Azospirillum lipoferum*، *Azotobacter chroococcum*، *Enterobacter cloacae* و *Pseudomonas putida*) و تیمار شاهد بدون تلقیح میکروبی را شامل شد. مایه تلقیح آماده باکتری‌ها (به شکل مایع) از آزمایشگاه بیولوژی خاک موسسه تحقیقات خاک و آب کشور تهیه گردید. بوته‌های فلفل قبل از انتقال و کاشت در گلخانه در دو لیتر سوسپانسیون حاوی باکتری محرک رشد بطور جداگانه (بطور متوسط حاوی 10^7 سلول باکتری در میلی‌لیتر) به مدت ۲۵ دقیقه خوابانده شده و سپس در بستر گلخانه نشا شدند، و بعد از نشا مایه تلقیح موجود به طور جداگانه و مساوی پای بوته‌های تیمار اضافه شدند. قبل از اجرای آزمایش، یک نمونه خاک مرکب از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر گلخانه محل اجرای تحقیق تهیه و براساس روش‌های رایج در آزمایشگاه (علی‌احیایی و بهبهانی‌زاده، ۱۳۷۲) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و مقدار قابل دسترس عناصر غذایی اندازه‌گیری شد. این خاک دارای بافت لوم، قابلیت هدایت الکتریکی ۲/۵۸ دسی‌زیمنس بر متر (کمی شور) و pH برابر ۷/۳۴ بود. مقدار کربن آلی اندازه‌گیری شده معادل ۱/۹۵ درصد بود. اندازه‌گیری مقدار فسفر قابل دسترس خاک برابر۶۵/۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، مقدار پتاسیم قابل دسترس ۵۸۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و مقدار نیتروژن کل خاک ۰/۱۱ درصد بود (همایی، ۱۳۸۱). بر مبنای آزمایش خاک و برای جلوگیری از کمبود احتمالی عناصر غذایی، نسبت به مصرف ۵ تن در هکتار کود گاوی پوسیده، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم اقدام شده و این کودها با خاک بستر بطور کامل مخلوط شدند. کوددهی و تغذیه تکمیلی گیاه فلفل طبق برنامه به روش کود آبیاری و محلولپاشی در طول دوره رشد تامین گردید. بذور رقم استارلک (starlec) پس از سبز شدن در سینی نشا و در مرحله ظهور ۴ برگ حقیقی در ۲۰ شهریور۱۴۰۰ به گلخانه جهت کشت منتقل گردید. هر تیمار شامل ۶ بوته فلفل دلمه‌ای می‌باشد که مجموعا ۱۲۶ عدد نشاء استفاده شد، که در مقابل هم کشت شدند، فاصله بین دو ردیف کشت ۷۰ سانتی‌متر، فاصله بین بوته‌ها ۵۰ سانتی‌متر، فاصله بین تیمارها ۸۰ سانتی‌متر و فاصله بین هر بلوک یک متر درنظر گرفته شد. سپس مراقبت‌های زراعی معمول در حین دوره کشت در گلخانه شامل کنترل دما و رطوبت نسبی، آبیاری (روش قطره‌ای)، هرس بوته و مبارزه با علف‌های هرز به صورت فیزیکی انجام شد. شروع برداشت از چهارم آذرماه و پایان آزمایش در گلخانه ۲۸ اسفندماه ۱۴۰۰ بود که کل دوره برداشت ۱۱۴ روز بود. پس از رسیدن و رنگ گرفتن میوه‌ها، برداشت به‌صورت هفتگی صورت گرفت و برای بررسی شاخص‌های رشد، تعداد میوه، عملکرد بوته و وزن تر و خشک اندام هوایی و اثر تلقیح میکروبی (MIE) برابر است با تفاوت وزن خشک گیاه تلقیح شده با گیاه تلقیح نشده بر وزن خشک گیاه تلقیح شده) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (Bagyaraj, 1992). ویژگی‌های خاک از قبیل قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۵ به ۱ آب به خاک (Rhoades, 1996)، pH در سوسپانسیون ۵ به ۱ آب به خاک (Thomas, 1996)، نیتروژن کل در خاک و گیاه به روش کلدال (Bremner and Mulvaney,

1982)، فسفر در خاک و گیاه به روش اسپکتوفتومتری و پتاسیم به روش طیف سنجی شعله‌ای (امامی، ۱۳۷۵)، کربن آلی کل خاک و محلول در آب (سرد و داغ) براساس روش والکلی بلاک (Nelson and Sommers, 1996) و همچنین تنفس میکروبی پایه و ناشی از سوبسترا به روش آلف و نانی‌پیری (Alef and Nannipieri, 1995) اندازه‌گیری شد. جمعیت میکروبی ریزوسفر (R) براساس سری رقت ۱۰ تایی، با روش کشت روی محیط جامد (spread plate) انجام شد (Pandey and palni, 2007) و بر اساس واحدهای تشکیل دهنده کلنی (CFU) بعد از پنج روز انکوباسیون در دمای ۲۸ درجه سلسیوس گزارش شد. نسبت جمعیت میکروبی در خاک ریزوسفری به خاک غیر ریزوسفری (R/S) هم محاسبه گردید (Katznelson, 1946). مقدار جذب عناصر غذایی از طریق حاصلضرب غلظت عنصر غذایی اندام هوایی در میزان وزن خشک اندام هوایی گیاه محاسبه شد. پس از بررسی فرضیات تجزیه واریانس شامل همگنی واریانس‌ها و نرمال بودن باقیمانده‌ها، اثر عوامل تغییرات تیمار محرک رشد بر شاخص‌های رشد و عملکرد فلفل دلمه‌ای با استفاده از تجزیه واریانس بررسی شد. همچنین مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش دانکن در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از نرم‌افزار SPSS (v. 23) انجام شد.

یافته‌های پژوهش

اثر تیمارها بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

نتایج تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده در کشت گلخانه‌ای فلفل تحت تاثیر تیمار باکتری‌های محرک رشد گیاه در جدول ۱ نشان داده شد. از بین عوامل شیمیایی و زیستی خاک اندازه‌گیری شده نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل دسترس خاک، تنفس خاک ناشی از سوبسترا، جمعیت میکروبی محیط ریشه و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در سطح احتمال یک درصد و ویژگی‌های تنفس پایه میکروبی و نسبت R/S در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری را نشان دادند. ویژگی‌های کربن آلی و کربن محلول (آب سرد و داغ) از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری را بین تیمارها نشان ندادند.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات اندازه‌گیری شده در کشت گلخانه‌ای فلفل دکمه‌ای تلقیح شده با باکتری‌ها

متغیرها	بلوک	تیمارهای آزمایشی	خطا آزمایشی	C.V. (درصد)	R^2 مدل (درصد)
درجه آزادی (df)	۲	۶	۱۲	–	–
نیتروژن کل خاک	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲**	۰/۰۰۰۱	۵/۰۹	۰/۷۷
فسفر قابل جذب خاک	۸۶/۱۳	۲۲۱۴/۴**	۲۹۰/۴	۹/۴	۰/۷۹
پتاسیم قابل جذب خاک	۲۲۴۵۱	۲۳۷۳۷۶**	۱۹۸۳۶	۱۸/۱	۰/۸۹
کربن آلی	۰/۲۰۸	۰/۴۱۷$^{n.s}$	۰/۱۷۳	۱۳/۱	۰/۶۸
کربن آلی محلول در آب سرد	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱ $^{n.s}$	۰/۰۰۱	۱۴/۳	۰/۷۵
کربن الی محلول در آب داغ	۰/۰۰۳	۰/۰۰۶ $^{n.s}$	۰/۰۰۸	۱۲/۰	۰/۶۱
تنفس پایه خاک	۱۳۸۹	۸۸۵۲/۷*	۲۳۵۷/۶	۱۶/۳	۰/۶۹
تنفس ناشی از سوبسترای خاک	۶۴۳/۸	۱۲۸۹۶**	۲۰۴۰/۹	۱۲/۶	۰/۷۸
pH	۰/۰۰۳	۰/۰۴۶ $^{n.s}$	۰/۰۳۲	۲/۲۸	۰/۸۲
EC (قابلیت هدایت الکتریکی)	۰/۰۰۱	۱/۱۷**	۰/۰۱۶	۱۰/۰	۰/۹۷
جمعیت میکروبی محیط ریشه	۰/۰۷۱	۰/۹۵۸**	۰/۱۱۰	۵/۲	۰/۸۸
نسبت R/S	۰/۱۱۶	۰/۴۵۷*	۰/۱۱۶	۱۷/۶	۰/۷۸
جذب نیتروژن اندام هوایی	۹/۲۱*	۲۳/۱**	۰/۶۵	۵/۱	۰/۹۶
جذب فسفر اندام هوایی	۲/۶۳*	۰/۸۹*	۰/۲۵	۱۴/۲	۰/۷۸
جذب پتاسیم اندام هوایی	۴/۹۵	۴۸/۶۵**	۲/۲۸	۸/۲	۰/۹۳
عملکرد میوه در بوته	۰/۱۸۲	۲۲/۸۸**	۲/۳۰	۹/۷	۰/۸۷
وزن تر اندام هوایی	۱۹۶۶۱	۲۵۱۲۸۱**	۱۱۳۸۰	۵/۶	۰/۹۴
وزن خشک اندام هوایی	۱۴۰/۱	۱۵۴۷/۱**	۸۹/۸۳	۷/۱	۰/۹۲
تعداد میوه در بوته	۲۵/۹	۱۹۹/۶**	۲۵/۷۰	۹/۴	۰/۸۸
اثر تلقیح میکروبی (MIE)	۴/۷۸	۵۹/۹۲**	۳/۵۱	۱۷/۵	۰/۹۱

ns، *، ** به ترتیب، غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

نتایج مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر ویژگی‌های شیمیایی خاک بستر گلخانه در جدول ۲ نشان داده شد. بیشترین میزان نیتروژن کل خاک در بستر تلقیح شده با *Azotobacter chroococcum* (۰/۴۴۷ درصد) مشاهده شد که ۱۸/۸ درصد نسبت به خاک بدون کشت افزایش نشان داده است و از لحاظ آماری با تیمار *Bacillus subtilis* در یک گروه معناداری قرار دارند. مقدار فسفر قابل جذب خاک در تیمار *Bacillus subtilis* (۱۰۶/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیشتر بود که با بقیه تیمارهای تلقیح باکتریایی تفاوت معنی‌داری نداشت. پتاسیم قابل جذب خاک در خاک بستر بدون کشت (۱۰۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیشتر بود که با بقیه تیمارها از این لحاظ تفاوت معنی‌داری (سطح ۵ درصد) نشان داد. کربن آلی در تیمارهای تلقیح شده با باکتری‌ها نسبت به خاک بدون کشت تفاوت معنی‌داری نشان داد. میزان pH و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در خاک بدون کشت نسبت به بقیه تیمارها بیشتر بود که تفاوت معنی‌داری با آنها در سطح احتمال ۵ درصد نشان داد.

جدول ۲- نتایج مقایسه میانگین اثر ریزجانداران محرک رشد بر ویژگی‌های شیمیایی خاک در پایان کشت فلفل دلمه‌ای

تیمارهای آزمایشی	نیتروژن کل خاک (درصد)	فسفر قابل جذب خاک ($mg.kg^{-1}$)	پتاسیم قابل جذب خاک ($mg.kg^{-1}$)	کربن آلی (درصد)	کربن آلی محلول در آب سرد (د)	کربن آلی محلول در آب داغ (٪)	pH (1:5)	EC ($dS.m^{-1}$)
Bacillus subtilis	۰/۴۳۰ab	۱۰۶/۸a	۵۴۷/۰bc	۳/۱۹a	۰/۲۲۳a	۰/۲۶۰a	۷/۸۰ab	۱/۰۹c
Azospirillum lipoferum	۰/۳۹۷bcd	۱۰۶/۲a	۲۴۹/۱d	۳/۰۷a	۰/۲۲۰a	۰/۲۲۳a	۷/۶۴b	۰/۶۹۳d
Azotobacter chroococcum	۰/۴۴۷a	۹۰/۷ab	۵۷۲/۰b	۳/۱۱a	۰/۲۵۳a	۰/۲۹۷a	۷/۷۹ab	۱/۳۵b
Enterobacter cloacae	۰/۳۸۴d	۹۱/۸ab	۳۴۷/۳bcd	۲/۹۰ab	۰/۱۹۳a	۰/۳۳۱a	۷/۷۶ab	۱/۰۲c
Pseudomonas putida	۰/۳۹۲cd	۸۹/۲ab	۲۹۷/۳cd	۲/۹۰ab	/۲۴۰a	۰/۳۳۰a	۷/۷۱ab	۰/۷۹۷d
شاهد بدون تلقیح	۰/۴۱۵abc	۶۶/۰b	۴۷۲/۱bcd	۳/۴۴a	۰/۲۴۶a	۰/۲۶۰a	۷/۷۲ab	۱/۱۶bc
خاک بستر بدون کشت	۰/۳۷۶d	۵۴/۷c	۱۰۲۵/۶a	۲/۱۰b	۰/۲۰۱a	۰/۲۱۱a	۷/۸۹a	۲/۷۱a

*میانگین‌ها با حروف مشابه در هر ستون، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد هستند.

اثر تیمارها بر ویژگی‌های زیستی خاک

نتایج مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف تلقیح ریزجاندارن خاکزی بر ویژگی‌های زیستی خاک بستر گلخانه در پایان کشت در جدول ۳ نشان داده شد. تنفس پایه میکروبی خاک در تیمار *Pseudomonas putida* (۲۷۲/۴ میکروگرم CO_2 بر گرم خاک در روز) بیشتر بود که با تیمار *Enterobacter cloacae*، شاهد بدون تلقیح و خاک بدون کشت تفاوت معنی‌داری (۵ درصد) نشان داد. تنفس ناشی از سوبسترا (گلوکز) در تیمار شاهد بدون تلقیح (۴۷۱/۴) میکروگرم CO_2 بر گرم خاک در روز) بیشتر بود که با بقیه تیمارها بجز تیمار *Enterobacter cloacae* از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری (۵ درصد) نشان داد. بین تیمارهای باکتریایی از نظر جمعیت میکروبی ریزوسفر تفاوت معنی‌داری وجود نداشت، اما با تیمار شاهد بدون تلقیح و خاک بدون کشت در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری نشان دادند. نسبت جمعیت میکروبی محیط ریزوسفر به جمعیت میکروبی خاک غیرریزوسفری (R/S) در تیمار *Enterobacter cloacae* بیشتر بود که با بقیه تیمارهای میکروبی از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نداشت اما با تیمار شاهد بدون تلقیح تفاوت معنی‌دار بود.

جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین اثر باکتری‌های محرک رشد بر ویژگی‌های زیستی خاک درکشت فلفل دلمه‌ای

تیمارهای آزمایشی	تنفس پایه خاک ($\mu gCO_2.day^{-1}.g^{-1}$ soil)	تنفس ناشی از سوبسترا ($\mu gCO_2.day^{-1}.g^{-1}$ soil)	جمعیت میکروبی ریزوسفر ($cfu.g^{-1}$)	نسبت R/S
Bacillus subtilis	۲۴۲/۸ab	۳۴۰/۵bcd	۳/۶×۱۰^{۶}a	۲۲/۹a
Azospirillum lipoferum	۱۸۳/۳abc	۲۸۹/۱cd	۷/۰×۱۰^{۶}a	۴۳/۸a
Azotobacter chroococcum	۲۱۶/۶abc	۳۴۰/۴bcd	۵/۶×۱۰^{۶}a	۳۵/۴a
Enterobacter cloacae	۱۳۹/۹c	۴۱۹/۱ab	۷/۶×۱۰^{۶}a	۴۷/۹a
Pseudomonas putida	۲۷۲/۴a	۳۶۶/۷bc	۲/۴×۱۰^{۶}ab	۱۵/۴ab
شاهد بدون تلقیح	۱۵۷/۱bc	۴۷۱/۴a	۰/۵×۱۰^{۶}bc	۳/۱b
خاک بستر بدون کشت	۱۳۷/۶c	۲۶۹/۱d	۰/۱۶×۱۰^{۶}c	–

*میانگین‌ها با حروف مشابه در هر ستون، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد هستند.

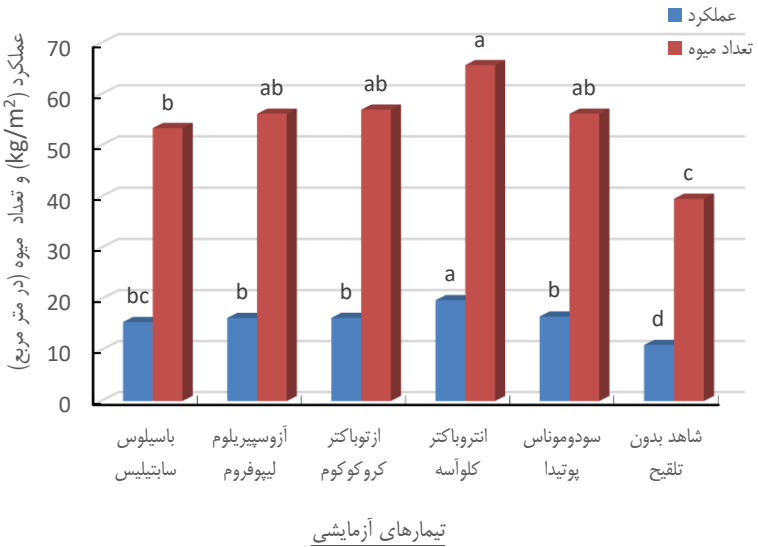
اثر تیمارها بر جذب عناصر غذایی و شاخص‌های رشد و عملکرد

نتایج مقایسه میانگین اثر تیمارهای تلقیح میکروبی بر میزان جذب عناصر غذایی گیاه و شاخص‌های رشد در جدول ۴ نشان داده شد. بیشترین جذب نیتروژن در اندام هوایی در تیمار تلقیح باکتری *Azotobacter chroococcum* (۲۸/۷ گرم بر متر مربع) حاصل شد که با بقیه تیمارها تفاوت معنی‌داری (۵ درصد) نشان داد که ۳۹ درصد بیشتر از تیمار شاهد بدون تلقیح بود. جذب فسفر اندام هوایی در تیمار *Enterobacter cloacae* (۴/۴۸ گرم بر مترمربع) بیشتر بود که با تیمار *Azospirillum lipoferum* و *Pseudomonas putida* از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نداشت. بیشترین جذب پتاسیم اندام هوایی در تیمار *Enterobacter cloacae* حاصل شد که با بقیه تیمارها تفاوت معنی‌داری داشت که نسبت به تیمار شاهد بدون تلقیح ۵۱ درصد پتاسیم بیشتری جذب کرده است. وزن تر و وزن خشک اندام هوایی فلفل در تیمار *Azospirillum lipoferum* بیشتر بود که با تیمار *Azotobacter chroococcum* و *Enterobacter cloacae* تفاوت معنی‌داری نداشت. اثر تلقیح میکروبی (Microbial Inoculation effect) در تیمار *Azospirillum lipoferum* و *Azotobacter chroococcum* نسبت به بقیه تیمارها بیشتر بوده که نسبت به تیمار *Bacillus subtilis* و *Pseudomonas putida* تفاوت معنی‌داری (۵ درصد) نشان داد. عملکرد میوه و تعداد میوه در متر مربع (شکل ۱) در تیمار *Enterobacter cloacae* (به ترتیب ۱۸/۸ کیلوگرم بر مترمربع و تعداد ۶۵/۸ در مترمربع) بیشتر بود، برای تعداد میوه این تیمار با تیمار *Azotobacter chroococcum*، *Azospirillum lipoferum* و *Pseudomonas putida* تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری نداشت و اینکه نسبت به تیمار بدون تلقیح ۶۴ درصد تعداد میوه در متر مربع افزایش یافت. عملکرد میوه نیز در تیمار *Enterobacter cloacae* نسبت به تیمار شاهد بدون تلقیح ۷۰ درصد افزایش نشان داد.

جدول ٤- نتایج اثر باکتری‌های محرک رشد (مقایسه میانگین تیمارهای آزمایشی) بر جذب عناصر غذایی و عملکرد فلفل دلمه‌ای

تیمارهای آزمایشی	جذب نیتروژن اندام هوایی ($g.m^{-2}$)	جذب فسفر اندام هوایی ($g.m^{-2}$)	جذب پتاسیم اندام هوایی ($g.m^{-2}$)	وزن تر اندام هوایی ($g.m^{-2}$)	وزن خشک اندام هوایی ($g.m^{-2}$)	اثر تلقیح میکروبی (MIE) (درصد)
Bacillus subtilis	۲۶/۴۱b	۳/۰۴bc	۲۵/۵۱cd	۱۶۸۳b	۵۳۳/۳cd	۴/۸۱cd
Azospirillum lipoferum	۲۷/۴۲b	۳/۵۹abc	۳۰/۴۷b	۲۱۷۷a	۵۶۵/۸a	۱۰/۱۶a
Azotobacter chroococcum	۲۸/۷۶a	۳/۳۴bc	۳۰/۸۶b	۲۱۵۹a	۵۶۵/۰a	۱۰/۰۱a
Enterobacter cloacae	۲۷/۲۰b	۴/۴۸a	۳۶/۰۴a	۲۱۲۲a	۵۶۰/۰ab	۹/۲۱ab
Pseudomonas putida	۲۶/۷۰b	۳/۹۴ab	۲۹/۴۷bc	۱۹۹۹a	۵۴۶/۶bc	۶/۹۷bc
شاهد بدون تلقیح	۲۰/۵۵c	۲/۸۷c	۲۳/۸۱d	۱۴۹۵b	۵۰۸/۳e	–

*میانگین‌ها با حروف مشابه در هر ستون، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد هستند.



شکل ۱: اثرات تیمارهای باکتریایی تلقیح شده بر تعداد میوه و عملکرد بوته فلفل در متر مربع در کشت گلخانه‌ای

همبستگی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

همبستگی خطی (پیرسون) بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در جدول ۵ نشان داده شد. مقدار عملکرد میوه با وزن خشک اندام هوایی (r=۰/۷۹**)، تعداد میوه (r=۰/۹۷**)، میزان جذب نیتروژن (r=۰/۷۱**)، فسفر (r=۰/۵۶*) و پتاسیم (r=۰/۸۱**) همبستگی مثبت معنی‌دار داشت. نیتروژن خاک با پتاسیم خاک (r=۰/۵۸**) و قابلیت هدایت الکتریکی خاک (r=۰/۵۶**) همبستگی مثبت و با عملکرد (r=-۰/۵۸**)، وزن خشک اندام هوایی (r=-۰/۴۸*)، جذب نیتروژن (r=-۰/۴۳*)، فسفر (r=-۰/۷۳**) و پتاسیم گیاه (r=-۰/۶۱**) همبستگی منفی معنی‌دار نشان داد. تنفس پایه خاک فقط با میزان فسفر خاک (r=-۰/۴۷*) همبستگی منفی معنی‌دار نشان داد.

جدول ۵- ضرایب همبستگی پیرسون ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در تاثیر تلقیح باکتری‌های محرک رشد درگیاه فلفل گلخانه‌ای

ضرایب	نیتروژن خاک	فسفر خاک	پتاسیم خاک	تنفس پایه	EC خاک	R/S	عملکرد	وزن خشک	تعداد میوه	جذب نیتروژن	جذب فسفر	جذب پتاسیم
نیتروژن خاک	۱/۰											
فسفر خاک	-۰/۲۸	۱/۰										
پتاسیم خاک	۰/۵۸**	-۰/۰۸	۱/۰									
تنفس‌پایه	-۰/۰۰۲	-۰/۴۷*	۰/۲۲	۱/۰								
EC خاک	۰/۵۶**	-۰/۱۷	۰/۵۸**	-۰/۱۱	۱/۰							
R/S	-۰/۲۲	۰/۳۵	-۰/۱۸	-۰/۰۹	-۰/۱۸	۱/۰						
عملکرد	-۰/۵۸**	۰/۵۱*	-۰/۱۹	۰/۱۳	-۰/۲۵	۰/۴۴	۱/۰					
وزن خشک	-۰/۴۸*	۰/۵۸**	-۰/۱۲	۰/۱۶	-۰/۲۸	۰/۳۸	۰/۷۹**	۱/۰				
تعداد میوه	-۰/۵۱*	۰/۴۸*	-۰/۱۴	۰/۱۱	-۰/۲۳	۰/۳۳	۰/۹۷**	۰/۸۱**	۱/۰			
جذب نیتروژن	-۰/۴۳*	۰/۶۷**	-۰/۰۵	۰/۲۷	-۰/۱۴	۰/۴۱	۰/۷۱**	۰/۸۵**	۰/۶۸**	۱/۰		
جذب فسفر	-۰/۷۳**	۰/۱۶	-۰/۴۲	-۰/۰۴	-۰/۲۶	۰/۲۲	۰/۵۶*	۰/۳۸	۰/۴۶*	۰/۴۷*	۱/۰	
جذب پتاسیم	-۰/۶۱**	۰/۳۱	-۰/۲۸	-۰/۰۸	-۰/۱۴	۰/۴۷*	۰/۸۱**	۰/۷۲**	۰/۷۵**	۰/۶۴**	۰/۵۵*	۱/۰

ns، *، ** به ترتیب، غیر معنی‌دار و معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

بحث

سیستم کشاورزی پایدار نیازمند نهاده‌های تجدیدپذیر است که در عین به حداقل رساندن خطرات زیست‌محیطی، مزایای زیست‌محیطی را به حداکثر می‌رساند. استفاده از ریزوباکتری‌های محرک رشد در کشاورزی در حال افزایش است و شاید سازوکارهای جذابی را برای جایگزینی نهاده‌های شیمیایی ارائه دهد. نتایج این مطالعه به وضوح نشان داد که افزودن کودهای میکروبی بر برخی از ویژگی‌های خاک و رشد فلفل دلمه‌ای در گلخانه تاثیر می‌گذارد. میزان نیتروژن خاک (۰/۴۴ درصد)، میزان جذب نیتروژن (۲۸/۸ گرم بر مترمربع) و وزن خشک اندام هوایی (۵۶۵/۰ گرم بر مترمربع) فلفل با تیمار باکتری *Azotobacter chroococcum* ، بهترین وضعیت را داشتند. تلقیح گیاهان مختلف با *Azotobacter chroococcum* موجب افزایش رشد و نمو گیاهان شده است که این افزایش در رشد به دلیل تثبیت نیتروژن، تولید هورمون یا سیدروفور توسط باکتری بوده است (Jagnow et al., 1991) و همچنین سبب افزایش مقدار عناصر نیتروژن و فسفر و انتقال آنها از ریشه به بخش هوایی گیاه می‌شوند ولی سازوکارهای اصلی دخیل در این افزایش هنوز به‌طور کامل مشخص نشده است (Ademola and Agele, 2015). یافته‌های این پژوهش با یافته‌های Ruiz and Sanjuan (2022) و Ademola and Agele (2015) هم‌خوانی دارد.

تنفس میکروبی خاک یکی از مشخصه‌های مهم برای پی بردن به فعالیت جمعیت عمومی میکروبی خاک است. این مشخصه، شاخصی از وضعیت و فعالیت میکروب‌های خاک و بیان‌گر روند و چگونگی تجزیه مواد آلی، فعالیت آنزیمی و چرخه برخی عناصر غذایی خاک می‌باشد و تنفس ناشی از سوبسترا جمعیت جوان، فعال و زنده میکروبی خاک را نشان می‌دهد (Zhang et al., 2018). میزان تنفس خاک در تیمار تلقیح با *Pseudomonas putida* و *Bacillus subtilis* بیشتر از بقیه تیمارها بود که نشان از فعالیت بیشتر میکروبی خاک دارد، میزان کربن محلول هم در این خاک‌ها نسبتاً بیشتر از بقیه بود. بیشترین جمعیت میکروبی ریزوسفر و نسبت جمعیت محیط ریزوسفر به غیر ریزوسفری (R/S) در تیمارهای کاربرد باکتری‌های محرک رشد مشاهده شد که با تیمار شاهد بدون تلقیح تفاوت معنی‌دار را نشان دادند و در بین آنها *Enterobacter cloacae* (R/S :۴۷/۹) بیشتر بود. در شرایط طبیعی شمارش جمعیت میکروبی ریزوسفر فلفل دلمه‌ای

بین $cfu.g^{-1}$ ۱۰^۶×۸/۴۳–۹/۴۶ در گرم خاک برآورد کردند که بطور معنی‌داری بین مناطق مختلف متفاوت بود (Gupta et al., 2022). ریشه‌های گیاه تأثیر زیادی بر جمعیت میکروبی خاک دارند. بزرگی اثر ریزوسفری عمدتاً به ماهیت و مقدار تراوشات و ته‌نشست‌های ریشه‌ای بستگی دارد که به نظر می‌رسد تحت تأثیر سن گیاه، نوع گونه‌ها و عوامل خاکی و اقلیمی باشد. تأثیر گیاهان منفرد در ریزوسفر به صورت R:S (نسبت ریزوسفر به غیر ریزوسفر) منعکس می‌شود که مبتنی بر تحرک جمعیت‌های میکروبی نسبتاً شدید در ناحیه ریزوسفر در مقابل توده خاک است، برای باکتری‌ها، این مقادیر معمولاً از ۵ تا ۲۰ و گاهی تا ۱۰۰ (برای باکتری‌های استراتژی r) متغیر است (Pinton et al., 2001). علاوه بر این، تغییر در نسبت R/S، که معیاری برای ارزیابی سلامت کلی گیاهان است، که به طور 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 (Thangavelu and Arumugam, 2019). در حالیکه در این پژوهش، افزایش نسبت R/S تیمار *Enterobacter cloacae* با افزایش جذب عناصر غذایی و عملکرد گیاه توام بود.

تیمار تلقیح باکتری *Enterobacter cloacae* در بسیاری از صفات اندازه‌گیری شده تاثیر مثبت و معنی‌داری داشت. این باکتری از جمله باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه است که در نظام‌های تولید گیاهی به عنوان کود زیستی مورد استفاده قرار گرفته است (ساریخانی و همکاران، ۲۰۱۹). جذب فسفر و پتاسیم فلفل با تلقیح *Enterobacter cloacae* بیشترین میزان را داشت که نشان می‌دهد این باکتری در جذب عناصر غذایی تاثیرگذار است. صفیرزاده و همکاران (۱۳۹۸) تأثیر *Enterobacter cloacae* بر جذب پتاسیم در گیاه را نشان دادند که دلیل آن را طول ریشه و جریان ورودی پتاسیم بیشتر و ترشح ترکیبات آلی ریشه بیان نمودند. ریزجانداران محرک رشد می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر دسترسی به فسفر در خاک داشته باشند. هنگامی که ریزجانداران حل‌کننده فسفات مثل *Enterobacter cloacae* و *Bacillus subtilis* (جدول ۴) وجود دارند، گیاه فسفر بیشتری مصرف می‌کند (Kumar and Ram, 2007). تاثیر تلقیح باکتری *Enterobacter cloacae* بر عملکرد فلفل و تعداد میوه قابل توجه بود که باعث افزایش ۷۰ درصدی عملکرد میوه نسبت به شاهد بدون تلقیح شده است. باکتری *Enterobacter cloacae* با تثبیت نیتروژن و انتقال آن به سیستم رشد گیاه موجب ایجاد تعادل در جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه شده و همچنین با حل کردن فسفر نامحلول و در نتیجه قابل جذب شدن آن برای گیاه و با ترشح هورمون اکسین، باعث گسترش بیشتر و بهتر سیستم ریشه‌ای شده و موجب جذب بهتر عناصر و در نتیجه رشد بهتر گیاه و افزایش عملکرد گیاه می‌شود (Sajedi et al., 2011). پژوهش‌های مشابهی نیز گزارش دادند که مصرف توام باکتری‌های حل‌کننده فسفات با کودهای فسفاته (سنگ فسفات) منجربه افزایش رشد گیاه، افزایش جذب عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم و افزایش قابلیت دسترسی این عناصر در خاک شده است (Wang et al., 2020). اثر تلقیح میکروبی (MIE) در تیمار *Azospirillum lipoferum*، *Azotobacter chroococcum* و *Enterobacter cloacae* بیشتر از بقیه تیمارها بود که نشان از تاثیرگذاری تلقیح این باکتری‌ها بر رشد گیاه دارد. در گیاه سویا تیمار شده با باکتری *Paenibacillus* اثر تلقیح میکروبی ۱۰/۶ درصد و در ترکیب با قارچ مایکوریزا برابر ۱۸/۸ درصد بود (Bidondo et al., 2011). نتایج مشابه از افزایش در صفات رشدی گیاه و جمعیت باکتری‌های ریزوسفری در گیاه فلفل (Sharma et al., 2022; Gupta et al., 2022;Kumar et al., 2019) و در گوجه فرنگی (Qessaoui et al., 2019;Ruiz & Sanjuan, 2019) گزارش شده است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این مطالعه نشان داد که تلقیح باکتری‌های محرک رشد پتانسیل افزایش رشد و جذب عناصر غذایی گیاه فلفل دلمه‌ای و تأثیر بر خصوصیات زیستی خاک تحت کشت را دارند. این افزایش رشد و عملکرد گیاه با افزایش جذب عناصر غذایی در اندام هوایی و تا حدی با اثر تلقیح میکروبی همبستگی مثبت داشت. کاربرد زادمایه باکتری‌های *Enterobacter cloacae*، *Azotobacter chroococcum* و *Azospirillum lipoferum* نه تنها در دسترس بودن و جذب نیتروژن و فسفر را افزایش دادند، بلکه جمعیت و فعالیت میکروبی ریشه را نیز افزایش دادند و در نتیجه رشد و عملکرد فلفل دلمه‌ای را در شرایط گلخانه‌ای افزایش دادند. بنابراین می‌توان مصرف این باکتری‌های محرک رشد را به عنوان کود زیستی در پرورش فلفل دلمه‌ای توصیه نمود تا ضمن افزایش کارایی مصرف نهاده‌ها با به‌کارگیری مکانیسم-های جذب بهتر نهاده در تولید این قبیل گیاهان، باعث بالا بردن عملکرد نیز شوند. ارزیابی قابلیت سازگاری ریزجاندارن تلقیح شده با این شرایط کشت در جهت دستیابی به حداکثر سود ناشی از کاربرد آنها، مهم است. نتایج این مطالعه می‌تواند در سیستم‌های تولید گیاهان سالم و ارگانیک اهمیت داشته باشد. مطالعات بیشتر در این راستا نیاز هست تا تأثیر مدیریت متفاوت تغذیه‌ای در شرایط مزرعه‌ای در مقایسه با شرایط گلخانه‌ای بر این اثرات مطالعه شده مورد بررسی قرار گیرد.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

امامی، عاکفه (۱۳۷۵). *روش‌های تجزیه گیاهی*، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، موسسه تحقیقات خاک و آب، تهران. نشریه ۹۸۲. جلد ۱: ۱۲۸.

سیدشریفی، رنوف و خاوازی، کاظم (۱۳۹۰). تأثیر باکتریهای محرک رشد گیاه بر مؤلفه‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه ذرت (*Zea mays* L.)، *نشریه بوم شناسی کشاورزی*. ۳(۴):۵۰۶-۵۱۳.

شیرانی، مائده و فیاض، نجمه‌السادات (۱۳۹۰) ، *کاشت انواع فلفل و خواص آن‌ها*، اصفهان، انتشارات نصوح، ص. ۱۳۲.

صادقی، سامان؛ حیدری، غلامرضا و سهرابی، یوسف (۱۳۹۴). تأثیر کودهای زیستی و مدیریت حاصلخیزی بر برخی شاخص‌های رشدی دو رقم ذرت دانه‌ای، *دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۲۵ (۳): ۴۳-۶۰

علی احیای، مریم و بهبهانی‌زاده، علی اصغر (۱۳۷۲). *شرح روش‌های تجزیه شیمیایی خاک*. نشریه فنی شماره ۸۹۳، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، تهران، ۱۲۹ ص.

عنایتی‌ضمیر، نعیمه؛ نوروزی، مجتبی و قدم‌خانی، اکبر (۱۳۹۸). تأثیر باکتریهای محرک رشد بر برخی ویژگیهای بیولوژیکی و شکلهای آلی کربن خاک زیر کشت گندم. *نشریه علوم آب و خاک*.۲۳(۴):۱۷۱-۱۸۱.

محمودزاده، مهدی؛ رسولی صدقیانی، میرحسن و عسگری لجایر، حمایت (۱۳۹۴). تأثیر باکتریهای ریزوسفری محرک رشد گیاه و قارچهای آربوسکولار میکوریزا بر خصوصیات ریخت‌شناسی و غلظت عناصر پُرمصرف گیاه دارویی نعناع فلفل (Mentha piperita L.) در شرایط گلخانه. *علوم و فنون کشتهای گلخانه‌ای* .۲۴(۶): ۱۵۵-۱۶۷.

همایی، مهدی (۱۳۸۱). *واکنش گیاهان به شوری*. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، تهران، ص. ۱۱۲.

REFERENCES

Ademola, O. & Agele, OS. (2015). Effects of nutrient sources and variety on the growth and yield of three cultivars of pepper (*Capsicum annuum* L.) in Southwestern Nigeria. *New York Science Journal*. 8(10):21-29.

Adesemoye, AO. & Egamberdieva, D. (2013). Beneficial effects of plant growth- promoting rhizobacteria on improved crop production: Prospects for Developing Economies. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 45-63.

Akram, NA. & Ashraf, M. (2013). Regulation in plant stress tolerance by a potential plant growth regulator, 5-aminolevulinic acid (ALA). *Journal of Plant Growth Regulation*, 32, 663–679.

Alef, K. & Nannipieri, P. (1995). *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press. pp. 214–216.

Ali-Ehyayi, M. & Behbahanizadeh, AA. (1993). *Description of soil chemical analysis methods*. Technical Journal No. 893, Soil and Water Research Institute, Tehran, 129 p. (*InPersian*).

Almadhoun, HR. (2021). Bell pepper classification using deep learning. *International Journal of Academic Engineering Research*, 5(1): 75-79.

Ashmawi, AE., Salem, GM., Ghazal, MF. & El-Emshaty, A. (2022). Effect of Some indigenous *Bacilli* and *Cyanobacteria* Strains inoculants on Growth Characteristics and Productivity of Sweet Pepper (*Capsicum frutescens*). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 16(6): 1-11. DOI: 10.22587/ajbas.2022.16.6.1.

Bagyaraj, DJ. (1992). Vesicular-arbuscular mycorrhiza: application in agriculture. In: Norris, JR., Read, DJ., Varma, AK. (Eds.), *Methods in Microbiology*. Academic Press, London, pp. 819e833.

Bakhshande, E., Rahimian, H., Pirdashti, H. & Nematzadeh GA. (2014). Phosphate solubilization potentail and modeling of stress tolerace of rhizobacteria from rice paddy soil in northen Iran. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 30: 2437-2447.

Bidondo, LF., 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.

Bremner, JM. & Mulvaney, CS. (1982). Nitrogen total. In: Page A.L. Miller R.H. and Keeney D.R. (Eds). *Methods of Soil Analysis*, Part 2. *Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy. pp. 595–624.

Chittora, D., Meena, M., Barupal, T., Swapnil, P. & Sharma, K. (2020). Cyanobacteria as a source of biofertilizers for sustainable agriculture, *Biochemistry and biophysics reports*, 22:100737.

Emami, A. (1996). *Plant analysis methods*, Soil and Water Research Organization. Publication 982. Vol. 1: 128. (*InPersian*).

Enayatizamir, N., Noruzi-masir, M. & Ghadamkhanii, A. (2020). Effect of plant growth promoting bacteria on some biological indicators and soil organic carbon forms under wheat cultivation. *Journal of Water and Soil Science*, 23 (4):171-181 (*InPersian*).

Gupta, S., Kaushal, R., Sood, G., Bhardwaj, S. & Chauhan, A. (2021). Indigenous Plant Growth Promoting Rhizobacteria and Chemical Fertilizers: Impact on Soil Health and Productivity of Capsicum (*Capsicum Annuum* L.) in North Western Himalayan Region, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(9): 948-963.

Homayi, M. (2002). *Plants reaction to salinity*. National Irrigation and Drainage Committee of Iran, Tehran, 97 p. (*InPersian*).

Jagnow, G., Hoeflich G. & Hoffmann, K.H. (1991). Inoculation of non-symbiotic rhizosphere bacteria: Possibilities of increasing and stabilizing yield. *Angewandte Bottani*,. 65: 97-126.

Ju, W., Jin, X., Liu, L., Shen, G., Zhao, W., Duan, C. & Fang, L., (2020). Rhizobacteria inoculation benefits nutrient availability for phytostabilization in copper contaminated soil: drivers from bacterial community structures in rhizosphere. *Applied Soil Ecology*, 150:103-150.

Katznelson, H. (1946). The rhizosphere effect of mangels on certain groups of microorganisms. *Soil Science*, 62: 343-354.

Kumar, A., Kumar, J. & Ram, B. (2007). Effect of inorganic and bio-fertilizers on growth, yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Progressive Agriculture*, 7 (1and2):151-152.

Kumari, S., Bharat, N., Thakur, A. & Kaushal, R. (2019). Effect of PGPR and BCA on Quality Seed Production of Bell Pepper (*Capsicum annuum* L.) under Open Field Conditions. *International Journal of Economic Plants*, 6(4):172-180.

Mahato, P., Badoni, A. & Chauhan, JS. (2009). Effect of Azotobacter and nitrogen on seed germination and early seedling growth in tomato. *Researcher*, 1(4), http://www.sciencepub.net, sciencepub@gmail.com.

Mahmoudzadeh, M.; Sedqiani, M. & Askari Lejair, h. (2016). Effect of plant growth promoting rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi on growth characteristics and concentration of macronutrients in peppermint (*Mentha pipperita* L.) under greenhouse conditions. *Journal of Soil and Plant Interactions*, 6 (4) :155-168. (*InPersian*).

Mohamed, EA., Farag, AG. & Youssef, SA. (2018). Phosphate solubilization by *Bacillus subtilis* and *Serratia marcescens* isolated from tomato plant rhizosphere. *Journal of Environmental Protection*, 9 (03):266.

Naiji, M. & Souri, MK. (2018). Nutritional value and mineral concentrations of sweet basil under organic compared to chemical fertilization. *Acta Scientiarum Polonorum: Hortorum Cultus* (Ogrodnictwo), 17(2), 167-175.

Nelson, DW. & Sommers, LE. (1996). Carbon, organic carbon and organic matter. In: Sparks, DL. (ed.) *Methods of Soil Analysis*. SSSA, Madison. pp. 961-1010.

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.

Pinton, R., Varanini, Z. & Nannipieri, P. (2001): The Rhizosphere. Marcel Dekker, Inc. New York, Basel.

Qessaoui, R., Bouharroud, R., Furze, JN., Aalaoui, ME., Akroud, H., Amarraque, A., Vaerenbergh, JV., Tahzima, R., Mayad, EH. & Chebli, B. (2019). Applications of new rhizobacteria *Pseudomonas* isolates in agroecology via fundamental processes complementing plant growth. *Scientific Reports*, 9:12832. doi:10.1038/s41598-019-49216-8.

Rhoades, JD. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks, D.L. (ed.) *Methods of Soil Analysis*. SSSA, Madison. pp. 417-435.

Ruiz JL. & Sanjuan, MCS. (2022). The use of plant growth promoting bacteria for biofertigation; effects on concentrations of nutrients in inoculated aqueous vermicompost extract and on the yield and quality of tomatoes. *Biological Agriculture and Horticulture*, 38(3): 145–161. https://doi.org/10.1080/01448765.2021.2010596.

Sadeghi, S, Heidari, G. & Sohrabi, Y. (2015). Effect of biological fertilizer and fertilization management on some growth indices of two maize varieties. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 25(3): 43-60. (*InPersian*).

Safirzadeh, S., Chorom, M. & Enayatizamir, N. (2019). Effect of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria

(*Enterobacter cloacae*) on Uptake and Uptake Efficiency of Potassium in Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(7): 1689-1699. (*InPersian*).

Sajedi, N., Madani, H., & Naderi, A. (2011). Effect of microelements and selenium on superoxide dismutase enzyme, malondialdehyde activity and grain yield maize (*Zea mays* L.) under water deficit stress. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 39, 153–159.

Sarikhani, M.R., Khoshru, B. & Greiner, R. (2019). Isolation and identifcation of temperature tolerant phosphate solubilizing bacteria as a potential microbial fertilizer. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35:126.

Seyed-Sharifi, R. & Khavazi, K. (2011). Effect of seed inoculation with plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on germination components and seedling growth of corn (*Zea mays* L.). *Journal of Agroecology(Quarterly)*, 4(3):513-506. (*InPersian*).

Sharma, M., Sharma, V., Delta, AK. & Kaushik, P. (2022). *Rhizophagus irregularis* and nitrogen Fixing *Azotobacter* with a reduced rate of chemical fertilizer application enhances pepper growth along with fruits biochemical and mineral composition. *Sustainability*, 14, 5653. https://doi.org/10.3390/su14095653.

Spence, C. & Bais, H. (2015). Role of plant growth regulators as chemical signals in plant-microbe interactions: a double edged sword. *Current Opinion Plant Biology*, 27:52–58.

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.

Thomas, GW. (1996). Soil pH and soil acidity. In: Sparks, D.L. (ed.) *Methods of Soil Analysis*. SSSA, Madison. pp. 475-490.

Vejan, P., Abdullah, R., Khadiran, T., Ismail, S., Nasrulha, Q. & Boyce A. (2016). Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability- a review. *Molecules*, 21 (5):573.

Wang, J., Li, R., Zhang, H., Wei, G. & Li, Z. (2020). Beneficial bacteria activate nutrients and promote wheat growth under conditions of reduced fertilizer application. *BMC Microbiology*, 20. doi:10.1186/s12866-020-1708-z.

Zhang, L., Jing, Y., Xiang, Y., Zhang, R. & Luc, H. (2018). Responses of soil microbial community structure changes and activities to biochar addition: a meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 643, 926–935.

Effect of plant growth-promoting rhizobacteria inoculation on soil characteristics, nutrients uptake and growth of bell pepper (*Capsicum annum* L.)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) are associated with plant roots, with metabolism and metabolic processes to increase plant efficacy and augment plant productivity and immunity by reducing fertilizer application rates and nutrient runoff. Studies were conducted to evaluate bell pepper transplants amended with some PGPR isolates in terms of soil characteristics, nutrients uptake and growth.

Materials and Methods

This research was conducted in a greenhouse in Isfahan, in form of a randomized complete block design with three replications in year 1400. The treatments included five genera of growth stimulating bacteria (*Bacillus subtilis*, *Azospirillum lipoferum*, *Azotobacter chroococcum*, *Enterobacter cloacae* and *Pseudomonas putida*) and control treatment without microbial inoculation. Chemical and biological properties of the soil, nitrogen, phosphorus and potassium uptake, and growth and fruit yield characteristics were investigated after harvest.

Results and Discussion

Results showed that addition of growth-promoting bacteria affects some soil characteristics and bell pepper growth. Treatments showed a significant difference in terms of total nitrogen, available phosphorus and potassium of soil, respiration and microbial population of rhizosphere, nitrogen and potassium uptake, yield and number of fruits ($p\leq0.01$). The best soil nitrogen content (0.44%), nitrogen uptake (28.8 g/m^2) and shoot dry weight (0.565 g/m^2) were observed in *Azotobacter crococcum* treatment. Soil basic microbial respiration was higher in *Pseudomonas putida* treatment (272.4 $\mu g\ CO_2\ .g^{-1}.day^{-1}$), which showed a significant difference ($p\leq0.05$) with *Enterobacter cloacae* and control (without inoculation). The highest rhizosphere microbial population and rhizosphere to non-rhizosphere population ratio (R/S) was in *Enterobacter cloacae* treatment (47.9). The shoot fresh and dry weight of the plant were higher in the *Azospirillum* treatment, which was not significantly different from the *Azotobacter* and *Enterobacter* treatments. Microbial inoculation effect (MIE) in *Azospirillum* and *Azotobacter* treatments were higher than the other treatments, which showed a significant difference ($p\leq0.05$) compared to *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas* treatments. Yield (18.8 kg/m^2) and fruits number (65.8/m^2) were higher in *Enterobacter cloacae* treatment.

Conclusion

Results of this study showed that inoculation of plant growth-promoting bacteria has the potential to increase the growth and nutrients uptake of bell pepper and affect biochemical characteristics of cultivated soil. This increase in growth and yield of the plant was positively correlated with the increase in nutrients uptake in plant shoot and to some extent with microbial inoculation effect. The effect of using strains of *Enterobacter cloacea*, *Azotobacter crococcum* and *Azospirillum lipophrum* on growth indicators of bell pepper in greenhouse conditions has been greater than the other strains, which can be recommended as bio-fertilizers in bell pepper cultivation. It is important to evaluate the adaptability of inoculated microorganisms to these culture conditions in order to achieve the maximum benefit from their application. Results of this study can be important in plant healthy and organic production systems.

Keywords: Azotobacter, Enterobacter, Nitrogen uptake, Soil biological properties, Yield.