مجله علوم و فنون باغبانی ایران جلد ۲۶ شماره ۲ صفحه‌های ۱۳۵ تا ۱۵۶ (۱۴۰۵)
مقاله پژوهشی

اثر کودهای فسفر و مایه‌زنی باکتریایی بر عملکرد، رشد و فیزیولوژی گوجه‌فرنگی

Effect of Phosphorus Fertilizers and Bacterial Inoculation on Yield, Growth, and Physiology of Tomato

مریم حقیقی*، مهدی جلالی
گروه علوم باغبانی، دانشگاه صنعتی اصفهان
*نویسنده مسئول، پست الکترونیک: (mhaghighi@cc.iut.ac.ir)
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۱۱

چکیده

فسفر یک عنصر غذایی بسیار حیاتی برای رشد گیاهان است و حفظ سطوح کافی آن در خاک برای به حداکثر رساندن رشد و نمو محصولات کشاورزی بسیار اهمیت دارد. استفاده از کودهای زیستی، به‌عنوان جایگزین‌های سازگار با محیط‌زیست و اقتصادی، می‌تواند به‌جای کودهای گران قیمت مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی تأثیر کودهای بیوفسفر و سوپر فسفات تریپل در مقایسه با تیمار بدون فسفر (شاهد) به همراه بررسی برهمکنش باکتری‌های حل‌کننده فسفات (*Pseudomonas putida*) بر ویژگی‌های کمی و کیفی گوجه‌فرنگی است. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل با دو عامل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل استفاده از کودهای فسفر و مایه‌زنی باکتریایی است. تیمار کودی شامل پنج سطح بدون فسفر (شاهد)، سوپر فسفات تریپل با غلظت‌های ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و بیوفسفر به‌صورت پودر گوشت با دو غلظت ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و تیمار باکتری شامل دو سطح عدم مایه‌زنی و مایه‌زنی باکتریایی می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین طول میوه در شرایط مایه‌زنی باکتریایی و با استفاده از پودر گوشت در دو غلظت ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به گروه شاهد مشاهده شد. همچنین، مایه‌زنی باکتریایی به همراه کاربرد پودر گوشت با غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، بیشترین وزن تر و خشک شاخساره، قطر میوه و محتوای نسبی آب برگ را نسبت به شاهد به همراه داشت. سوپر فسفات تریپل با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و همچنین دو غلظت پودر گوشت همراه با مایه‌زنی باکتریایی ، بیشترین وزن تر و خشک ریشه را نشان داد. به‌طورکلی، از میان منابع مختلف فسفر، پودر گوشت با غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در بهبود صفات رشدی گوجه‌فرنگی مؤثرتر بود، درحالی‌که مایه‌زنی باکتریایی تأثیر معنی‌داری در بهبود وزن میوه و عملکرد تک بوته نسبت به عدم مایه‌زنی باکتریایی نداشت.

واژه‌های کلیدی: سوپر فسفات تریپل، عملکرد، کودهای زیستی، ویتامین C.

مقدمه

گوجه‌فرنگی[۱] دومین محصول مهم سبزی در جهان است و تولید آن به مقدار زیادی در مناطق نیمه‌خشک متمرکز است. از نظر سلامت انسان، گوجه‌فرنگی جزء اصلی وعده‌های غذایی روزانه در بسیاری از کشورها است و منبع مهمی از مواد معدنی، ویتامین‌ها و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی از جمله کاروتنوئیدها و لیکوپن است (Rehan *et al.,* 2023; Ilahy *et al.,* 2018). طعم گوجه‌فرنگی و محتوای آنتی‌اکسیدانی آن بر اساس شرایط رشد، روش‌های کشت، ارقام و زمان کشت متفاوت است (Goulet *et al.,* 2015).

فسفر خاک یک ماده مغذی کلیدی شناخته شده برای تولید گوجه‌فرنگی است و حفظ سطوح کافی فسفر در خاک برای به حداکثر رساندن رشد و نمو این محصول مهم است (Zhu *et al.,* 2018).

فسفر (P) یک عنصر پرمصرف ضروری برای گیاهان است، راندمان پایین استفاده از فسفر در محصولات (۲۰-۲۵ درصد) نیاز به افزودن مداوم کودهای فسفر برای تأمین نیاز فسفر آن‌ها دارد. کمبود فسفر یک تنش غیرزیستی عمده است که بهره‌وری

۱- *Solanum lycopersicum* L.

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]

محصول را در ۳۰ تا ۴۰ درصد از زمین‌های قابل کشت جهان محدود می‌کند و نقش مهمی در رشد و نمو ایفا می‌کند، بنابراین تأمین مداوم آن برای دستیابی به امنیت غذایی جهانی حیاتی است (Poirier *et al.,* 2022; Orellana *et al.,* 2022). در خاک، آنیون‌های فسفات موجود ($H_2PO_4^{-1}$، HPO_4^{-2} و PO_4^{-3}) می‌توانند توسط سطوح رسی جذب شده و یا در خاک‌های قلیایی ترکیبات نامحلول مانند CaP و MgP و در خاک‌های اسیدی ترکیبات نامحلول مانند FeP و AlP تشکیل داده (Yadav *et al.,* 2017) و مانع دسترسی گیاه به فسفر شوند. برای برآوردن نیازهای جهانی فسفر، کودهای شیمیایی فسفر با هزینه چهار میلیارد دلار در سال تولید می‌شوند. بااین‌حال، راندمان مصرف فسفر کودهای معدنی تنها در حدود ۱۰ تا ۲۵ درصد در سراسر جهان است (Etesami, 2020)، زیرا مقادیر قابل‌توجهی از فسفر موجود در کودهای شیمیایی یا در اثر فعالیت میکروبی به اشکال آلی تبدیل می‌شود که به آسانی توسط گیاه جذب نمی‌شود و یا آبشویی گردیده و باعث آلودگی خاک و آب می‌شود (Maghsoodi *et al.,* 2020; López-Arredondo *et al.,* 2014). در حال حاضر، غلبه بر کمبود فسفر و افزایش در دسترس بودن فسفر خاک یک مسئله ضروری برای دستیابی به بهره‌وری بالای محصولات کشاورزی است که نیاز به کاربرد مقادیر زیادی کود فسفر آلی در اکوسیستم‌های کشاورزی را برجسته می‌کند (Menezes-Blackburn *et al.,* 2018).

یک راه‌حل امیدوارکننده برای بازیابی و استفاده مجدد از فسفر در سیستم‌های کشاورزی استفاده از محصولات جانبی کشاورزی غنی از فسفر مانند پودر گوشت است. پودر گوشت موجود در بازار، غنی از مواد مغذی است و تا ۸ درصد نیتروژن و ۵ تا ۱۰ درصد فسفر دارد و بنابراین می‌تواند به‌عنوان کود بالقوه حاوی نیتروژن و فسفر استفاده شود (Jatana *et al.,* 2020). نیتروژن موجود در پودر گوشت به شکل پروتئینی است که می‌تواند به راحتی به NH^{+4} و NO^{-3} متصل شود و بیش از ۷۵ درصد فسفر در پودر گوشت متصل به کلسیم (به‌عنوان هیدروکسی آپاتیت) است که موجب فراهمی زیستی کم برای گیاهان می‌شود (Jatana *et al.,* 2020). بنابراین، استفاده از پودر گوشت به‌عنوان یک کود آلی برای تکمیل نیاز فسفر محصولات می‌تواند منجر به تجمع زیستی فسفر در خاک گردد. در همین راستا، نیاز به بهبود جذب فسفر از پودر گوشت برای استفاده پایدار، کارآمد و اقتصادی آن وجود خواهد داشت.

طیف وسیعی از باکتری‌های خاک می‌توانند فسفر را از آپاتیت‌ها و سایر اشکال معدنی فسفر حل کنند (Sánchez-Esteva *et al.,* 2016). باکتری‌های خاک، فسفر قابل‌دسترس گیاه را در خاک از طریق اسیدی شدن یا با آزاد کردن اسیدهای آلی یا آنزیم‌ها افزایش می‌دهند (Zaidi *et al.*, 2009). حلالیت آپاتیت‌ها با کاهش pH خاک به‌واسطه باکتری‌های حل‌کننده فسفات افزایش می‌یابد که به‌طور بالقوه می‌تواند مانع از تجمع فسفر باواسطه اسیدی شدن خاک گردد (Jatana *et al.,* 2020). علاوه بر این باکتری‌های حل‌کننده فسفات با آزاد کردن محرک‌های رشد مانند ایندول استیک اسید، جیبرلین‌ها و سیتوکینین‌ها، در دسترس بودن فسفر و رشد محصول را بهبود می‌بخشند. بنابراین، باکتری‌های حل‌کننده فسفات می‌توانند به‌طور مؤثر به‌عنوان جایگزین‌های سازگار با محیط‌زیست و از نظر اقتصادی مفید برای کودهای فسفر گران قیمت استفاده شوند (Pathan *et al.,* 2018).

به نظر می‌رسد که کاربرد پودر گوشت و باکتری‌های حل‌کننده فسفر به‌عنوان کودهای آلی ممکن است مؤثرتر از کودهای شیمیایی فسفر دار برای بهبود رشد و عملکرد گوجه‌فرنگی عمل کنند. بنابراین، این مطالعه به‌منظور بررسی نقش کودهای آلی در بهبود رشد گوجه‌فرنگی و در دسترس بودن فسفر از منابع مختلف فسفر شامل سوپر فسفات تریپل، پودر گوشت و باکتری‌های حل‌کننده فسفات انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در گلخانه پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان با میانگین دمای روزانه ۲±۲۵ درجه سلسیوس و میانگین دمای شبانه ۲±۱۷ درجه سلسیوس صورت گرفت. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل با دو عامل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. اطلاعات خاک در جدول ۱ آورده شده است. تیمارها شامل استفاده از کودهای فسفر و مایه‌زنی باکتریایی بودند. تیمار کودی شامل پنج سطح بود: بدون فسفر (شاهد)، سوپر فسفات تریپل و بیوفسفر به‌صورت پودر گوشت. غلظت سوپر فسفات تریپل به‌صورت توصیه‌شده توسط آزمون خاک و دو برابر آن (۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ازای هر کیلوگرم خاک) استفاده

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]

شد، درحالی‌که غلظت پودر گوشت نیز مطابق با توصیه‌های آزمون خاک و دو برابر آن (۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ازای هر کیلوگرم خاک) تعیین گردید و تیمار باکتری شامل دو سطح عدم مایه‌زنی و مایه‌زنی باکتریایی بود.

پودر گوشت از شرکت خوراک دام و طیور تهیه گردید که اطلاعات آن در جدول ۲ آورده شده است و مایع مایه‌زنی باکتریایی سودوموناس پوتیدا از موسسه تحقیقات آب و خاک ایران تهیه گردید.

جوانه‌زنی بذور گوجه‌فرنگی[۱] در بستر پیت ماس صورت گرفت. پس از گذشت ۱۹ روز از کاشت، نشاءهای گوجه‌فرنگی آماده شدند و به گلدان‌هایی منتقل شدند که ترکیبی از ۲۰ درصد خاک و ۸۰ درصد ماسه داشتند. این انتقال به‌منظور اعمال تیمار کودی در گلخانه انجام گردید. همان‌طور که گفته شد میزان مصرف تیمار کودی بر اساس مقدار فسفر موجود در آن محاسبه شد که به مقدار ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم (در هر کیلوگرم خاک) به خاک محیط کشت اضافه گردید. ۱۰ روز پس از استقرار کامل گیاهان در شرایط گلخانه‌ای نسبتاً کنترل‌شده، تیمار باکتریایی با گونه سودوموناس پوتیدا[۲] به‌صورت حل‌شده با آب در دو مرحله به بستر اضافه شد. مایع تلقیح حاوی 10^7 باکتری در هر میلی‌لیتر بوده که به نسبت ۱:۱۰ با آب رقیق شد. به‌این‌ترتیب، به ازای هر ۱ میلی‌لیتر مایع تلقیح، ۱۰ میلی‌لیتر آب به آن اضافه گردید. سپس گلدان‌ها با آن آبیاری شدند و تلقیح دوم ۱۰ روز پس از تلقیح اول انجام گرفت. بوته‌های گوجه‌فرنگی هر سه روز یک‌بار با محلول غذایی حاوی ۴۰ گرم نیترات پتاسیم، ۲۰ گرم سولفات منیزیم، ۱۷/۵ گرم نیترات کلسیم، ۱۰ گرم نیترات منیزیم، ۵ گرم آهن، ۰/۳ گرم کلات منگنز، ۰/۱۵ گرم اسید بوریک، ۰/۱ گرم کلات روی، ۰/۰۵ گرم کلات مس، و ۰/۰۰۵ گرم مولیبدات سدیم (در ۱۰۰ لیتر آب) تغذیه و پس از هر دو بار تغذیه با این محلول، یک‌بار با آب بدون محلول غذایی آبیاری می‌شدند.

صفات موردبررسی و نحوه‌ی اندازه‌گیری

در پایان پژوهش (۴ ماه پس از انتقال نشاء به گلدان)، گیاهان با دقت برداشت شده و زیر آب جاری شسته شدند تا گل‌ولای به‌طور کامل از روی ریشه و شاخساره پاک شود. سپس با استفاده از تیغ فولادی، ریشه و شاخساره از یکدیگر جدا گردیدند. طول شاخساره، از پایه گیاه که ساقه به زمین متصل می‌شود تا بالاترین نقطه‌ای که برگ‌ها قرار دارند، با خط‌کش اندازه‌گیری شد (واحد سانتی‌متر). وزن تر ریشه و شاخساره با ترازوی دقیق (با دقت ۰/۰۱ گرم) تعیین گردید و برای تعیین وزن خشک هر دو اندام گیاهی شامل ریشه و شاخساره، این اندام‌ها به مدت دو روز در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. ویژگی‌های فیزیکی میوه‌ها نیز موردبررسی قرار گرفت. وزن میوه‌ها با ترازو اندازه‌گیری شد و قطر آن‌ها تنها در جهت عرض با کولیس ثبت گردید. همچنین طول میوه‌ها از نقطه‌ای که ساقه به میوه متصل می‌شود تا نقطه‌ی انتهایی آن با خط‌کش اندازه‌گیری شد. برای محاسبه عملکرد میوه‌ها، وزن کل میوه‌های یک بوته در تمامی برداشت‌ها در هر یک از تیمارها اندازه‌گیری و ثبت گردید و واحد اندازه‌گیری آن به‌صورت وزن کل میوه‌های تولید شده توسط هر بوته برحسب گرم محاسبه شد.

در زمان برداشت، سفتی میوه‌ها با استفاده از سفتی سنج مدل (OSK-I-10,576, Japan) اندازه‌گیری شد. بدین ترتیب که سر مخروطی آن تا عمق ۱۱ میلی‌متری در میوه نفوذ کرده و با دست در قسمت وسط میوه فشار داده شد. نیروی ایجاد شده در برابر نفوذ به پریکارپ به‌طور دقیق برحسب نیوتن بیان گردید (Pathaveerat *et al.*, 2018).

محتوای اسید اسکوربیک میوه گوجه‌فرنگی بر اساس به روش Njoku و همکاران (۲۰۱۵) با تغییرات جزئی تعیین شد. نمونه‌های تازه میوه (۱ گرم) با ۲۰ میلی‌لیتر اسید اگزالیک (۰/۴ درصد) در هاون چینی مخلوط گردید. سپس ۲۰۰ میکرو لیتر از ۲.۶-دی کلروفنول ایندوفنول (۰/۸ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر) به محلول حاصل اضافه شد و جذب با اسپکتروفتومتر (UV 160A - Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan) در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. برای تعیین محتوای اسید آسکوربیک نمونه‌های میوه، محلول‌های استاندارد اسید آسکوربیک با غلظت‌های مختلف (۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر) تهیه شد. نتایج برحسب میلی‌گرم اسید اسکوربیک به ازای هر کیلوگرم میوه تازه با استفاده از منحنی کالیبراسیون (۰/۹۳۵ = R^2) گزارش شده توسط Idris و همکاران (۲۰۱۹) بیان شد.

۱- *Solanum lycopersicum* var Paradise

۲- *Pseudomonas putida*

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]

جدول ۱- اطلاعات خاک مورداستفاده در آزمایش.

Table 1. Soil information used in the experiment.

هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	پی اچ	نیتروژن کل (٪)	پتاسیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک)	فسفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک)	منگنز (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک)	روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک)	آهن (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک)	مس (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک)	آهک (٪)	کربن آلی (٪)
Electrical conductivity (ds m^{-1})	pH	Total nitrogen (%)	Potassium (mg kg^{-1} DW)	Phosphorus (mg kg^{-1} DW)	Manganese (mg kg^{-1} DW)	Zinc (mg kg^{-1} DW)	Iron (mg kg^{-1} DW)	Copper (mg kg^{-1} DW)	Lime (%)	Organic carbon (%)
1.15	7.58	0.13	676.02	70.21	4.1	1.23	1.6	1.6	40.5	1.35

جدول ۲- اطلاعات پودر گوشت مورداستفاده در آزمایش.

Table 2. Meat powder information used in the experiment.

رطوبت (درصد)	ماده خشک (درصد)	خاکستر (درصد)	خاکستر نامحلول در اسید (درصد)	پروتئین خام (درصد)	پروتئین حقیقی (درصد)	پروتئین غیرقابل‌دسترس (درصد)	اوره (درصد)	کلسیم (درصد)	فسفر کل (درصد)	سدیم (درصد)	عصاره اتر (درصد)
Moisture (%)	Dry matter (%)	Ash (%)	Acid insoluble ash (%)	Crude protein (%)	True protein (%)	Unavailable protein (%)	Urea (%)	Calcium (%)	Total phosphorus (%)	Sodium (%)	Ether extract (%)
0	94.2	22.5	0.25	46.2	30.2	3.58	0	7.84	3.96	0.37	30.00

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]

اجزا کلروفیل a و b به روش Lichtenthaler (۱۹۸۷) اندازه‌گیری شد، برای این منظور ۰/۲ از نمونه‌های برگ در استون ۸۰ درصد همگن شدند، سپس عصاره حاصل شده در دمای اتاق به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ و میزان جذب نور در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۷ و ۴۷۰ نانومتر به ترتیب برای کلروفیل a، b و کاروتنوئید با استفاده از اسپکتروفتومتر UV (160A- Shimadzu Corp., Kyoto, Japan) اندازه‌گیری شد. درنهایت از معادلات Lichtenthaler برای تعیین میزان کلروفیل و کاروتنوئید برحسب میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ استفاده گردید.

جهت سنجش محتوای نسبی آب برگ (RWC)، برگ‌های بالغ و کاملاً توسعه‌یافته با دقت از ساقه گیاه جدا و به‌سرعت وزن شدند (FW)، سپس برگ‌ها را روی سطح آب مقطر قرار داده و به مدت ۱۲ ساعت در دمای اتاق شناور کردند. برگ‌های دارای رطوبت بیش‌ازحد با استفاده از یک حوله کاغذی برای از بین بردن رطوبت سطح خشک شدند و وزنشان به‌عنوان وزن تورژسانس (TW) اندازه‌گیری شد. پس‌ازآن وزن خشک با قرار دادن برگ‌های اشباع شده در آون با دمای ۶۰ درجه سلسیوس به دست آمد (DW) و میزان RWC .با استفاده از فرمول زیر تعیین شد (López -Serrano *et al.,* 2019).

$$RWC=\frac{(FW-DW)}{(TW-DW)}\times 100$$ رابطه ۱

برای اندازه‌گیری میزان فنول از روش فولین سیوکالتو استفاده شد، پودر برگ (۰/۱ گرم) پس از خشک کردن در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس تهیه گردید و سپس با متانول ۸۰ درصد (۱۰ سی‌سی) ترکیب و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط بر روی شیکر با دور ۱۵۰ در دقیقه قرار گرفت تا عصاره برگ به دست آید. سپس ۰/۵ میلی‌لیتر از عصاره تهیه شده به همراه ۲/۵ میلی‌لیتر معرف فولین به نسبت ۱ به ۹ قسمت آب مقطر و به همراه ۲ میلی‌لیتر کربنات سدیم (۷/۵ درصد) ترکیب و در یک لوله آزمایش ریخته شد. سپس، لوله‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در حمام آب با دمای ۴۵ درجه سلسیوس قرار گرفته و بلافاصله میزان جذب با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۷۶۵ نانومتر قرائت شد (Singleton & Rossi, 1965).

به‌منظور تعیین مقدار فلاونوئیدهای کل، از روش رنگ‌سنجی کلرید آلومینیوم استفاده شد. ۰/۵ میلی‌لیتر از عصاره گیاهی (برگ)، ۱/۵ میلی‌لیتر حلال (متانول)، ۰/۱ میلی‌لیتر کلرید آلومینیوم ۱۰ درصد، ۰/۱ میلی‌لیتر استات پتاسیم ۱ مولار و ۲/۸ میلی‌لیتر آب مقطر ترکیب شدند. سپس محلول‌ها در دمای اتاق به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شدند و جذب محلول‌ها در طول‌موج ۴۱۵ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. همچنین، منحنی استاندارد با استفاده از محلول‌های کوئرستین در حلال متانول تهیه گردید (Yazdizadeh *et al.*, 2013).

برای اندازه‌گیری فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاه به شیوه مهار رادیکال‌های آزاد، ابتدا به ۲۰۰ میکرو لیتر از عصاره متانولی استخراج شده از نمونه‌های برگ، ۸۰۰ میکرو لیتر بافر (Tris-HCl) اضافه شد. سپس ۱ میلی‌لیتر محلول DPPH اضافه گردید و در دمای اتاق بدون هیچ نوری قرار داده شد. ۳۰ دقیقه پس از افزودن محلول DPPH، جذب محلول در طول‌موج ۵۱۷ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. میزان جذبی که هنگام معرفی نمونه تحلیلی مشاهده شد، به‌عنوان AS مشخص شد، درحالی‌که میزان جذبی که هنگام معرفی اتانول به‌عنوان کنترل مشاهده شد، به‌عنوان AC مشخص شد (Koleva *et al.,* 1949). درصد بازدارندگی DPPH با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\text{Inhibition ratio (\%)} = (\frac{(Ac-As)}{Ac})\times 100$$ رابطه ۲

برای اندازه‌گیری فسفر برگ و ریشه به روش خاکستر گیری خشک عمل شد، و درنهایت میزان فسفر با دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت گردید (Murillo-Amador *et al.,* 2007).

داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Statistix 8 تجزیه‌وتحلیل شدند و میانگین‌ها با استفاده از آزمون کمترین تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح معنی‌داری ۵ درصد ارزیابی شدند. برای رسم نمودارهای میله‌ای از نرم‌افزار اکسل استفاده شد. تجزیه‌وتحلیل مؤلفه اصلی (PCA) با استفاده از Statgraphics Centurion، نسخه XVI رسم گردید.

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]

نتایج و بحث

تأثیر تیمارهای منابع فسفر و مایه‌زنی باکتریایی بر صفات رشدی گوجه‌فرنگی

نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تیمار باکتری تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد بر وزن تر شاخساره، وزن خشک ریشه، طول شاخساره و میوه داشت، و همچنین تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد بر قطر میوه داشت، درحالی‌که بر وزن خشک شاخساره، وزن تر ریشه، میانگین وزن میوه، عملکرد و سفتی میوه تأثیر معنی‌داری نشان نداد. تیمار منابع فسفر و اثر متقابل باکتری با منابع فسفر بر کلیه‌ی صفات رشدی موردمطالعه تأثیر معنی‌داری را نشان داد (جدول ۳).

نتایج حاصل از اثر متقابل تیمارها نشان داد که بیشترین وزن تر شاخساره در تیمار مایه‌زنی باکتریایی با کاربرد پودر گوشت در غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد و کمترین میزان این صفات در تیمار شاهد وجود داشت که بین مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی در این تیمار تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۱، الف). وزن خشک شاخساره در تیمار پودر گوشت در غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بیشترین مقدار را نشان داد، درحالی‌که بین مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی در این تیمار تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. کمترین مقدار وزن خشک شاخساره در تیمار شاهد مشاهده شد (شکل ۱، ب). مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی در تمام منابع فسفر تأثیر معنی‌داری بر وزن تر ریشه نداشت. بااین‌حال از میان منابع فسفر، بیشترین وزن تر ریشه در تیمارهای سوپر فسفات تریپل در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و پودر گوشت در هر دو غلظت ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، چه در شرایط مایه‌زنی و چه در عدم مایه‌زنی باکتریایی مشاهده شد (شکل ۱، پ). همچنین، وزن خشک ریشه در تیمار مایه‌زنی باکتریایی همراه با استفاده از سوپر فسفات تریپل در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و پودر گوشت در هر دو غلظت ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. اما تفاوت معنی‌داری بین سوپر فسفات تریپل در غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و تیمار شاهد در هر دو حالت مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی مشاهده نشد (شکل ۱، ت). طول شاخساره در تمامی منابع فسفر، چه در شرایط مایه‌زنی و چه در شرایط عدم مایه‌زنی باکتریایی، نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. در تیمار پودر گوشت با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، تفاوت معنی‌داری بین مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی مشاهده شد؛ به‌طوری‌که در این تیمار، مایه‌زنی باکتریایی باعث افزایش طول شاخساره شد. اما در سایر تیمارها، هیچ تفاوت معنی‌داری بین مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی مشاهده نشد (شکل ۱، ث). طول میوه در اثر متقابل مایه‌زنی باکتریایی با پودر گوشت در هر دو غلظت ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به سایر منابع فسفر بیشتر بود (شکل ۱، ج). از میان منابع فسفر، بیشترین قطر میوه در تیمار با پودر گوشت در غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد و در این تیمار، تفاوت معنی‌داری بین مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی وجود نداشت. همچنین، کمترین قطر میوه در تیمار شاهد و در شرایط عدم مایه‌زنی باکتریایی ثبت شد. در تیمارهای سوپر فسفات تریپل با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و همچنین در پودر گوشت با هر دو غلظت ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، مایه‌زنی باکتریایی تفاوت معنی‌داری نسبت به عدم مایه‌زنی باکتریایی در قطر میوه نشان نداد (شکل ۱، چ). میانگین وزن میوه در تمامی منابع فسفر نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. بیشترین مقدار وزن میوه در تیمار با پودر گوشت در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در هر دو شرایط مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی و همچنین در تیمار سوپر فسفات تریپل با غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در شرایط مایه‌زنی باکتریایی مشاهده شد. همچنین، بین مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی در هر یک از تیمارهای فسفر تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۱، ح). مقدار عملکرد تک بوته در تمامی تیمارهای فسفر نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت، اما تفاوت معنی‌داری بین مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی در هیچ‌یک از تیمارها مشاهده نشد (شکل ۱، خ). در تمام تیمارهای اعمال شده از نظر سفتی میوه بین مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. در شرایط عدم مایه‌زنی باکتریایی از میان منابع فسفر تیمار پودر گوشت با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به تیمار شاهد افزایش معنی‌داری نشان داد، در حالی‌که سایر منابع فسفر تفاوت معنی‌داری در سفتی میوه در مقایسه با تیمار شاهد در شرایط عدم مایه‌زنی باکتریایی نشان ندادند (شکل ۱، د).

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]

جدول ۳–تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تیمارها بر برخی از ویژگی‌های رشدی گوجه‌فرنگی

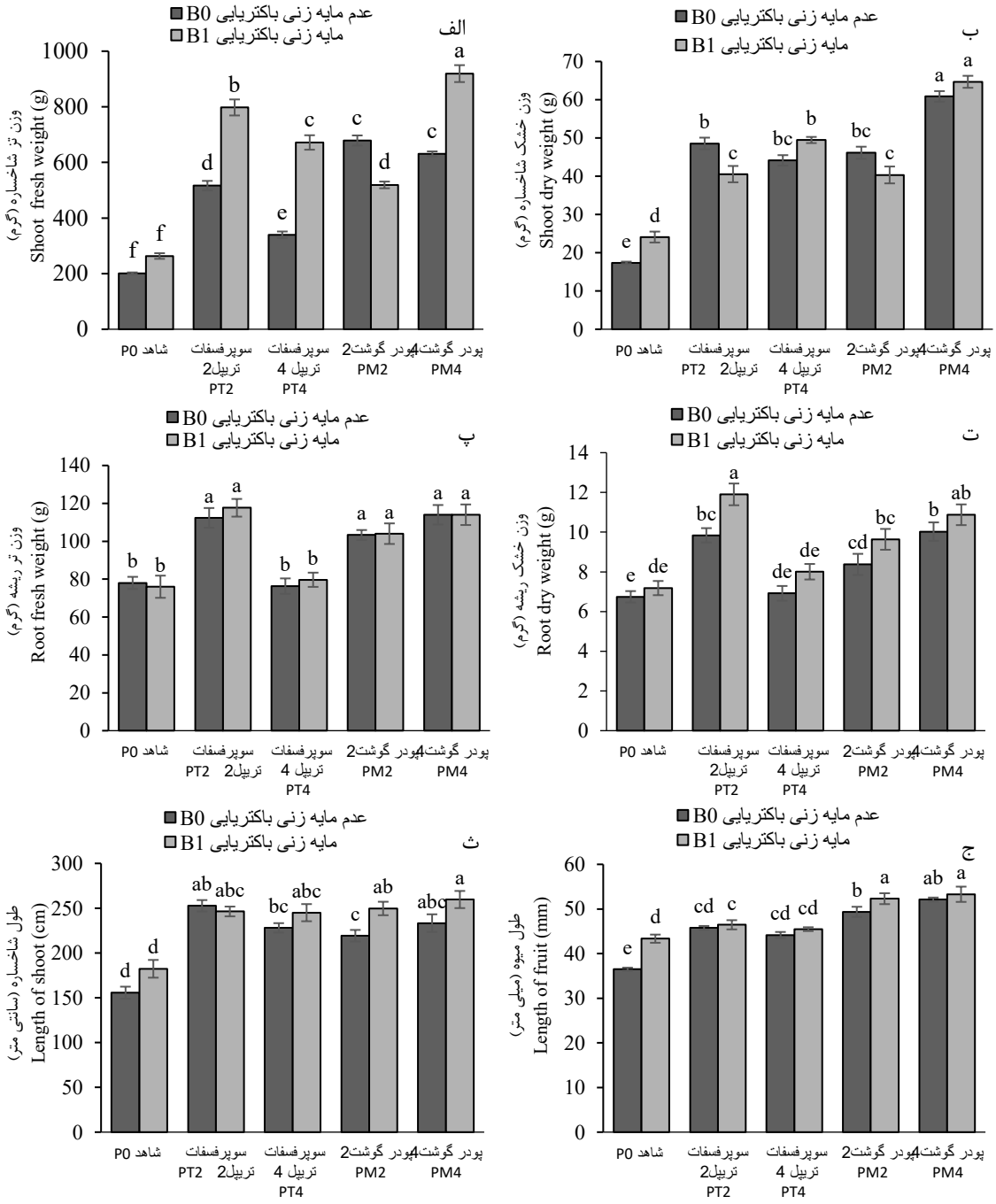
Table 3. Analysis of variance (mean square) of treatments on some growth characteristics of tomato

منابع تغییر	درجه آزادی	وزن تر شاخساره	وزن خشک شاخساره	وزن تر ریشه	وزن خشک ریشه	طول شاخساره	طول میوه	قطر میوه	میانگین وزن میوه	عملکرد در تک بوته	سفتی میوه
S.OV	df	Shoot fresh weight	Shoot dry weight	Root fresh weight	Dry weight of root	Length of shoot	Length of fruit	Diameter of fruit	Mean weight of fruit	Yield	Firmness of fruit
باکتری	1	194247 **	1.310 n.s	16.130 n.s	9.7402 **	2650.800 **	50.570 **	15.180 *	21.880 n.s	811 n.s	0.128 n.s
Bacterial											
منابع فسفر	4	251330 **	1353.300 **	2125.530 *	18.156 **	6595.200 **	154.188 **	219.572 **	7931.440 **	2865267 **	16.678 **
Source of phosphorous											
باکتری×منابع فسفر	4	64662 **	69.470 **	12.470 *	0.542 *	332.470 *	9.536 *	31.321 **	141.310 *	40227 *	2.529 *
Bacterial × Source of phosphorous											
خطا	18	1396	14.840	86.780	0.822	249.840	2.626	2.567	78.540	213156	2.852
Error											
ضریب تغییرات (درصد)		6.75	8.83	9.55	10.13	6.96	3.46	2.96	9.03	28.31	12.8
CV (%)											

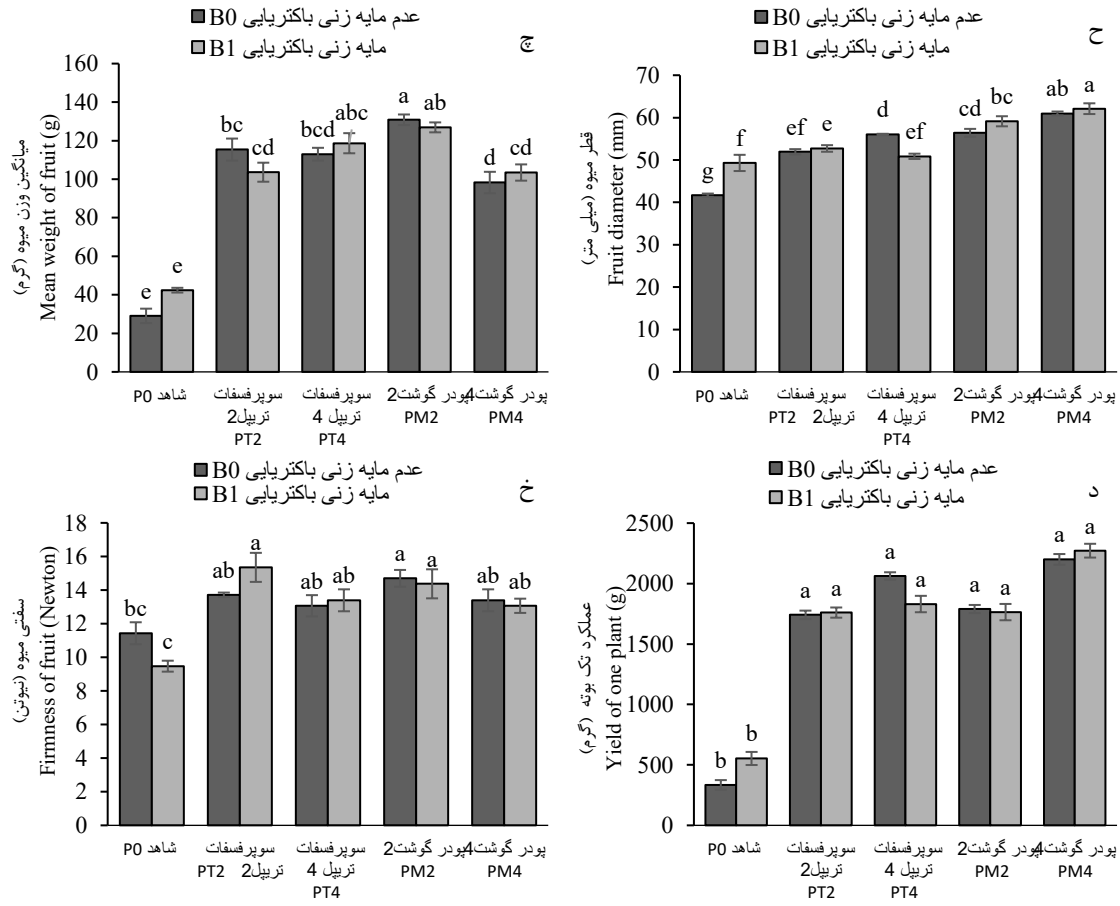
* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد، n.s: غیر معنی‌دار

* and **: Significat at 5 and 1 % probability levels, respectively. ns: non significat

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]



[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]



شکل ۱- اثر متقابل مایه‌زنی باکتریایی و منابع فسفر بر صفات رویشی و صفات میوه‌ای و عملکردی گوجه‌فرنگی. سوپر فسفات تریپل ۲ (سوپر فسفات تریپل در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، سوپر فسفات تریپل ۴ (سوپر فسفات تریپل در غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، پودر گوشت ۲ (پودر گوشت در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، پودر گوشت ۴ (پودر گوشت در غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم).

Figure 1- The interaction effect of bacterial inoculation and phosphorus sources on growth characteristics, fruit characteristics, and yield of tomato. PT2 (triple superphosphate at a concentration of 20 mg/kg), PT4 (triple superphosphate at a concentration of 40 mg/kg), PM2 (meat powder at a concentration of 20 mg/kg), PM4 (meat powder at a concentration of 40 mg/kg).

خاک کشاورزی دارای ذخایر عظیم فسفر است، اما تمام این فسفر به آسانی در دسترس گیاهان قرار نمی‌گیرد، به‌ویژه در خاک‌های اسیدی و بسیار هوازده که در صورت استفاده از کودهای حاوی فسفات به اکسیدهای آهن و آلومینیوم متصل شده و ترکیبات نامحلول را تشکیل می‌دهد و در خاک‌های قلیایی با کلسیم و منیزیم متصل شده و به دلیل واکنش‌پذیری بالا برای گیاهان غیرقابل استفاده می‌شود (Santos *et al.,* 2012).

نقش فسفر در افزایش رشد گیاهان به‌خوبی مستند شده است. فسفر جزء ساختاری مولکول‌های پرانرژی (ATP و ADP)، اسید استیک، اسیدهای فیتیک و فسفیدها بوده و همچنین در فعالیت‌های فتوسنتزی شرکت می‌کند. از سوی دیگر کمبود فسفر سرعت تقسیم سلولی و گسترش سلولی را کاهش می‌دهد (Alsulaiman & Al-Ansari, 2023). استفاده از کودهای فسفر موجب افزایش رشد و ارتفاع بوته‌های آفتابگردان به دلیل افزایش رشد ریشه می‌گردد (Emam & Eilkaee, 2002). همسو با نتایج فوق، نتایج حاصل از پژوهش حاضر نیز نشان داد که مایه‌زنی باکتریایی به همراه کاربرد پودر گوشت با غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ارتفاع شاخساره گوجه‌فرنگی را ۴۲ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. همچنین وزن تر و خشک ریشه نیز در تیمار مایه‌زنی باکتریایی همراه با

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]

کاربرد سوپر فسفات تریپل با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب ۵۴ و ۶۶ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. افزایش ارتفاع گیاه درنتیجه افزایش فسفر قابل‌دسترس توسط گیاه به دلیل تأثیرات مثبت عنصر فسفر بر رشد سیستم ریشه، جذب آب و عناصر غذایی ضروری به‌ویژه نیتروژن است که باعث بهبود ارتفاع گیاه می‌شود (Dordas, 2009).

در پودر گوشت فسفر به‌صورت آلی وجود دارد که به آسانی در دسترس گیاهان قرار می‌گیرد، اگرچه در دسترس بودن و تحرک فسفر به عوامل محیطی و بیولوژیکی خاک نیز بستگی دارد (Nogalska *et al.,* 2018). آزادسازی بیشتر فسفر از پودر گوشت به‌احتمال‌زیاد به دلیل pH مطلوب بستر است. فسفر حاصل از پودر گوشت در pH اسیدی با سرعت بیشتری آزاد می‌شود، درحالی‌که در pH خنثی و قلیایی کمتر آزاد می‌شود. فسفر ارگانیک موجود در پودر گوشت و استخوان با کانی‌سازی به فسفات معدنی تبدیل می‌شود که برای گیاهان از فسفر موجود در بخش معدنی (استخوان) محلول‌تر و قابل‌دسترس‌تر است (Jeng *et al.,* 2006).

باکتری‌های مفید خاک می‌توانند رشد گیاه را از طریق تولید هورمون‌های گیاهی (مانند اکسین و سیتوکینین)، سیدروفور و اسیدهای آلی بهبود بخشند. سودوموناس یکی از مهم‌ترین میکروارگانیسم‌هایی است که هورمون‌های گیاهی از جمله اکسین را تولید می‌کند. اکسین تولید شده توسط این باکتری‌ها می‌تواند به‌طور مستقیم تقسیم و رشد سلولی را افزایش دهد یا به‌طور غیرمستقیم تولید-ACC دآمیناز را افزایش دهد (Patten & Glick, 2002). درپژوهشی، Shaharroona و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند که مایه‌زنی با باکتری‌های مولد IAA [۱]باعث افزایش وزن، طول، ریشه‌های فرعی و تولید ریشه‌های نازک‌تر می‌شود، درنتیجه جذب آب و مواد مغذی را افزایش می‌دهد. Srinivasan و همکاران (۲۰۱۲) اشاره کردند که مایه‌زنی باکتریایی گیاه سورگوم با *Pseudomonas* sp به‌طور قابل‌توجهی ارتفاع ساقه، بیوماس خشک اندام هوایی و ریشه، کل ماده خشک و جذب کل فسفر را افزایش داد. نتایج حاصل از پژوهش حاضر نیز نشان داد که مایه‌زنی باکتریایی در تیمار شاهد به ترتیب ارتفاع و وزن خشک شاخساره را ۱۷ و ۳۹ درصد نسبت به عدم مایه‌زنی باکتریایی افزایش داد. علاوه بر توانایی باکتری‌ها در حل کردن فسفات، مشخص شد که این باکتری‌ها همچنین می‌تواند رشد گیاه را با سایر ویژگی‌های محرک رشد گیاه مانند IAA، سیدروفور، ACC دآمیناز و غیره افزایش دهند (Etesami & Maheshwari, 2018). مشخصه فعالیت ACC-دآمیناز این است که با سرکوب تولید اتیلن، گیاه را از اثر تنش‌های مختلف محافظت می‌کند که ممکن است علت افزایش رشد گیاه باشد (Glick, 2014).

نتایج حاصل از پژوهش Azarmi-Atajan و Sayyari-Zohan (۲۰۲۲) نشان داد که کاربرد سوپر فسفات تریپل و مایه‌زنی با باکتری‌های حل‌کننده فسفات باعث افزایش وزن خشک اندام هوایی و ریشه به ترتیب ۴۱ درصد و ۵۹ درصد نسبت به شاهد در نهال‌های پسته شد. در پژوهش حاضر، مشاهده شد که استفاده از سوپر فسفات تریپل در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به شاهد وزن تر ریشه افزایش یافت اما بااین‌حال تفاوت معنی‌داری بین وزن تر ریشه با مایه‌زنی باکتریایی و بدون آن وجود نداشت. نتایج حاصل از پژوهش Demba و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان داد که مایه‌زنی با باکتری سودوموناس پوتیدا بر وزن تر ریشه نشاءهای گوجه‌فرنگی نسبت به تیمار شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت، این موضوع می‌تواند به عوامل مختلفی از جمله نوع باکتری‌های استفاده شده و میزان فسفر موجود در خاک مرتبط باشد. در این راستا، می‌توان این احتمال را مدنظر قرار داد که نوع باکتری‌های به کاررفته به دلایل مختلف، نظیر عدم هم‌زیستی مؤثر یا عدم قابلیت استفاده از منابع مغذی در خاک، نتوانسته‌اند تأثیر معنی‌داری بر رشد گیاهان داشته باشند. Saglam و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که مایه‌زنی باکتریایی سودوموناس پوتیدا از سویه KT2440 تعداد و وزن میوه گوجه‌فرنگی در هر بوته را نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. این ممکن است نشان دهد که مایه‌زنی باکتری‌های حل‌کننده فسفات بیان ژن‌های عملکردی گوجه‌فرنگی را القا می‌کند. نتایج حاصل از پژوهش حاضر برخلاف نتایج فوق نشان داد که مایه‌زنی باکتریایی تفاوت معنی‌داری در میانگین وزن میوه و عملکرد گوجه‌فرنگی نسبت به عدم مایه‌زنی باکتریایی در کلیه‌ی منابع فسفر ایجاد نکرد، اما از میان منابع فسفر پودر گوشت با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به سایر منابع فسفر میانگین وزن میوه را بهبود بخشید. این افزایش وزن میوه در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ممکن است به دلیل تعادل مناسب مواد مغذی و عدم سمیت

۱- Indoleacetic acid

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]

باشد، درحالی‌که غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ممکن است منجر به استرس گیاهی و کاهش جذب مواد مغذی گردد. مقدار فسفر در دسترس گیاه با pH خاک، رطوبت و محتوای آلی تعیین می‌شود. در مطالعه Załuszniewska و Nogalska (۲۰۲۲)، فراوانی فسفر قابل‌دسترس در خاک با افزایش pH خاک در تیمارهای پودر گوشت و استخوان افزایش یافت.

نرم شدن یکی از ویژگی‌های میوه‌های برداشت شده در هنگام رسیدن است که بر عمر پس از برداشت تأثیر می‌گذارد. سفتی میوه در طی فرآیند رسیدن کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از پژوهش Pérez-Rodriguez و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که مایه‌زنی باکتریایی گیاهان گوجه‌فرنگی با *Pseudomonas fluorescens* موجب افزایش سفتی میوه‌ها شد. ان‌ها عنوان کردند که این نتایج ممکن است به کاهش فعالیت ژن پلی‌گالاکتوروناز نسبت داده شود که به طور متوسط با سفتی میوه مرتبط است (Pérez-Rodriguez *et al*., 2020). نتایج پژوهش حاضر برخلاف نتایج Pérez-Rodriguez و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که بین مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی تفاوت معنی‌داری در میزان سفتی میوه‌های گوجه‌فرنگی وجود نداشت. با توجه به نتایج تحقیق حاضر، ممکن است عدم تفاوت معنی‌دار در سفتی میوه‌های گوجه‌فرنگی ناشی از عوامل دیگری مانند شرایط محیطی مختلف یا غلظت و نوع باکتری مایه‌زنی‌شده باشد. این عوامل می‌توانند بر واکنش گیاه به مایه‌زنی باکتریایی تأثیر بگذارند و نتایج متفاوتی را به همراه داشته باشند.

تأثیر تیمارهای منابع فسفر و مایه‌زنی باکتریایی بر صفات فیزیولوژیکی گوجه‌فرنگی

نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تیمار باکتری تأثیر معنی‌داری بر ویتامین C، کلروفیل a، کلروفیل b، محتوای نسبی آب و فسفر برگ در سطح احتمال ۱ درصد و بر کاروتنوئید، فلاونوئید و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در سطح احتمال ۵ درصد نشان داد، اما بر فنول و فسفر ریشه تأثیر معنی‌داری نشان نداد. تیمار منابع فسفر و اثر متقابل باکتری با فسفر تأثیر معنی‌داری بر کلیه صفات فیزیولوژیک موردبررسی نشان داد (جدول ۴).

مایه‌زنی باکتریایی در تمامی منابع فسفر استفاده شده مقدار ویتامین C را نسبت به شاهد افزایش داد. در تیمار سوپر فسفات تریپل، در هر دو غلظت، تفاوت معنی‌داری بین مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی بر روی مقدار ویتامین C مشاهده شد، درحالی‌که در سایر منابع فسفر چنین تفاوتی وجود نداشت (شکل ۲، الف). همچنین، در نتیجه مایه‌زنی باکتریایی، مقدار کلروفیل a در تمام منابع فسفر استفاده شده بیشتر از گروه شاهد بود. اما در شرایط عدم مایه‌زنی باکتریایی، تیمارهای سوپر فسفات تریپل با غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و پودر گوشت در هر دو غلظت، کلروفیل a بیشتری نسبت به شاهد داشتند. در تیمارهای سوپر فسفات تریپل در هر دو غلظت، تفاوت معنی‌داری در غلظت کلروفیلa بین تیمار مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی مشاهده شد، درحالی‌که در سایر منابع فسفر این تفاوت وجود نداشت (شکل ۲، ب). به‌طورکلی، مایه‌زنی باکتریایی نسبت به عدم مایه‌زنی باکتریایی در تمامی منابع فسفر، تفاوت معنی‌داری در کلروفیل b نشان داد. بیشترین مقدار کلروفیل b در نتیجه مایه‌زنی باکتریایی در تیمار پودر گوشت با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد، درحالی‌که در شرایط بدون مایه‌زنی باکتریایی، تیمارهای سوپر فسفات تریپل در هر دو غلظت بیشترین کلروفیل b را نسبت به شاهد نشان دادند (شکل ۲، پ). در مورد کاروتنوئید، مایه‌زنی نسبت به عدم مایه‌زنی باکتریایی در تیمارهای شاهد و پودر گوشت با غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تفاوت معنی‌داری داشت، اما در سایر تیمارها این تفاوت مشاهده نشد. در شرایط مایه‌زنی باکتریایی، بیشترین مقدار کاروتنوئید در تیمار پودر گوشت در هر دو غلظت نسبت به گروه شاهد مشاهده شد. در حالی که در شرایط عدم مایه‌زنی باکتریایی، بیشترین مقدار کاروتنوئید در تیمار شاهد و پودر گوشت با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ثبت گردید و کمترین مقدار نیز در تیمار پودر گوشت با غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شد (شکل ۲، ت). مایه‌زنی باکتریایی نسبت به عدم مایه‌زنی در تمام تیمارها، به‌جز پودر گوشت در هر دو غلظت، در محتوای نسبی آب برگ تفاوت معنی‌داری داشت. در تیمار پودر گوشت با غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، بیشترین محتوای نسبی آب برگ نسبت به گروه شاهد در هر دو شرایط مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی مشاهده شد (شکل ۲، ث). مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی تنها در تیمار پودر گوشت با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تفاوت معنی‌داری در محتوای فنول برگ داشت، درحالی‌که در سایر تیمارها این تفاوت مشاهده نشد. در شرایط مایه‌زنی باکتریایی، محتوای فنول در تیمارهای سوپر فسفات تریپل و پودر گوشت هر دو در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به شاهد افزایش یافت، درحالی‌که در شرایط عدم مایه‌زنی باکتریایی، بیشترین محتوای فنول در تیمار

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]

پودر گوشت در غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و نیز سوپر فسفات تریپل در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد (شکل ۲، ج). در مورد فلاونوئید، مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی تفاوت معنی‌داری در تیمارهای شاهد و پودر گوشت با غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نشان داد، اما در سایر تیمارها تفاوتی ایجاد نکرد. محتوای فلاونوئید در تیمار با سوپر فسفات تریپل در هر دو غلظت ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و همچنین پودر گوشت با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بین عدم مایه‌زنی و مایه‌زنی باکتریایی تفاوت معنی‌داری نداشت. در شرایط مایه‌زنی باکتریایی در تیمار پودر گوشت در هر دو غلظت ۲۰ و ۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم نسبت به تیمار شاهد محتوای فلاونوئید کاهش یافت در حالی‌که سوپر فسفات تریپل در هر دو غلظت در شرایط مایه‌زنی باکتریایی تفاوت معنی‌داری در محتوای فلاونوئید نسبت به تیمار شاهد نشان ندادند (شکل ۲، چ). ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در تیمار شاهد و پودر گوشت در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تفاوت معنی‌داری بین مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی داشت. در شرایط مایه‌زنی باکتریایی، بیشترین ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در تیمار سوپر فسفات تریپل در هر دو غلظت و پودر گوشت در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به تیمار شاهد مشاهده شد، درحالی‌که در شرایط عدم مایه‌زنی باکتریایی، کمترین ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در تیمار پودر گوشت با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ثبت گردید و بین سایر تیمارها با شاهد تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۲، ح). میزان فسفر برگ به‌جز در تیمار سوپر فسفات تریپل در غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، در سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری بین مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی نداشت. همه منابع فسفر نسبت به شاهد، غلظت فسفر برگ را در هر دو شرایط مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی افزایش دادند (شکل ۲، خ). در مورد فسفر ریشه، هیچ تفاوت معنی‌داری بین مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی در هیچ‌یک از تیمارها مشاهده نشد و همه منابع فسفر نسبت به شاهد غلظت فسفر ریشه را افزایش دادند (شکل ۲، د).

در پژوهش Hegazi و همکاران (۲۰۱۷) بیشترین مقادیر غلظت ویتامین C و کمترین اسیدیته کل در میوه‌ها با ترکیب با کود دهی مونوآمونیوم فسفات به‌عنوان منبع فسفر به ثبت رسیده است. این پاسخ ممکن است به دلیل عوامل موجود در خاک باشد که بر دسترسی فسفر تأثیر می‌گذارد. مشخص شده است که تأمین فسفر معمولاً با افزایش قابل‌توجه تعداد و وزن ریشه‌ها همراه است که منجر به جذب غلظت بیشتری از عناصر غذایی معدنی از خاک از جمله نیتروژن و درنتیجه افزایش رشد و کلروفیل کل می‌شود. از این نظر، مونوآمونیوم فسفات که با محتوای فسفر بالا و حلالیت زیاد در آب مشخص می‌شود، بیشترین مقدار رنگدانه‌های گیاهی، مواد مغذی، پروتئین و ویتامین C را به همراه داشت. نتایج حاصل از پژوهش حاصل نیز نشان داد که مایه‌زنی باکتریایی همراه با کاربرد سوپر فسفات تریپل با غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم میزان ویتامین C را ۲۶ درصد نسبت به تیمار شاهد همراه با مایه‌زنی باکتریایی افزایش داد.

باکتری‌ها علاوه بر افزایش قابلیت دسترسی به فسفر خاک، جذب فسفر و محتوای کلروفیل در گیاهان را با تأثیر بر مورفولوژی ریشه و توسعه آن در خاک بهبود می‌بخشند. Marathe و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که استفاده از یک گونه باکتری‌های حل‌کننده فسفات می‌تواند مواد مغذی (N, P) را افزایش دهد، از طرفی نیتروژن یکی از اجزای سازنده کلروفیل می‌باشد درنتیجه می‌تواند منجر به بهبود کلروفیل گردد. نتایج حاصل از پژوهش Nieto-Monteros و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که غلظت رنگدانه کلروفیل a و کل به ترتیب ۲۶/۸۵ و ۲۷/۹۳درصد در هنگام استفاده از پودر استخوان در مقایسه با تیمار کنترل بهبود یافت. این نتیجه حاصل از جذب راحت نیتروژن و فسفر بوده که باعث افزایش سطح برگ و افزایش مقادیر نیتروژن و فسفر در برگ‌ها گردید که برای فرآیند فتوسنتز ضروری بوده و درنتیجه اثر هم‌افزایی ناشی از سطح برگی بزرگتر، غلظت مناسب نیتروژن و فسفر در برگ‌ها موجب بهبود رنگدانه‌های کلروفیل گردید. نتایج حاصل از پژوهش حاضر نیز نشان داد که مایه‌زنی باکتریایی همراه با کاربرد پودر گوشت در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کلروفیل a، b و کاروتنوئید را به ترتیب به میزان ۳۶، ۱۵۱ و ۲۹ درصد نسبت به تیمار شاهد همراه با مایه‌زنی باکتریایی افزایش داد.

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]

جدول ۴–تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تیمارها بر برخی از ویژگی‌های فیزیولوژیکی گوجه‌فرنگی

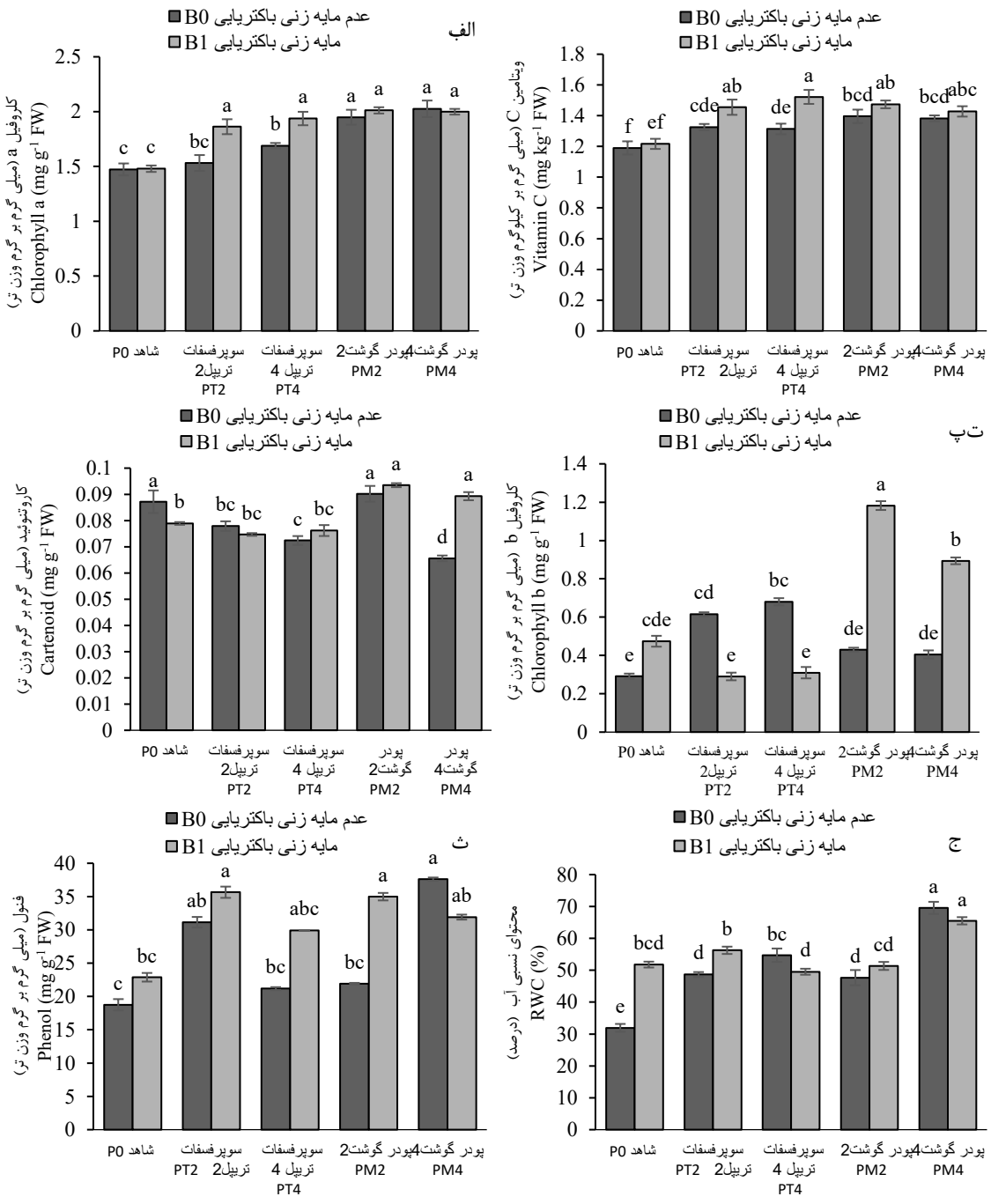
Table 4. Analysis of variance (mean square) of treatments on some physiological characteristics of tomato

منابع تغییر	درجه آزادی	ویتامین C	کلروفیل a	کلروفیل b	کاروتنوئید	محتوای نسبی آب	فنول	فلاونوئید	ظرفیت آنتی‌اکسیدانی	فسفر برگ	فسفر ریشه
S.O.V	df	Vitamin C	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Carotenoid	RWC	Phenol	Flavonoid	DPPH	Phosphorus of leaf	Phosphorus of root
باکتری	1	0.071 **	0.115 **	0.158 **	0.0001 *	143.402 **	183.521 n.s	0.012 *	22.879 *	0.356 **	0.212 n.s
Bacterial	4	0.053 **	0.289 **	0.173 **	0.0003 **	521.981 **	196.459 *	0.047 **	151.377 *	0.692 **	0.538 **
منابع فسفر Source of phosphorus	4	0.008 *	0.037 *	0.365 **	0.0002 **	154.563 **	72.932 *	0.003 *	359.182 **	0.307 *	0.021 *
باکتری×منابع فسفر Bacterial × Source of phosphorus	18	0.004	0.009	0.017	1.410	6.928	44.065	0.001	36.501	0.019	0.056
خطا Error		4.67	5.53	23.79	4.66	5	23.21	14.46	7.94	5.12	8.82
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)											

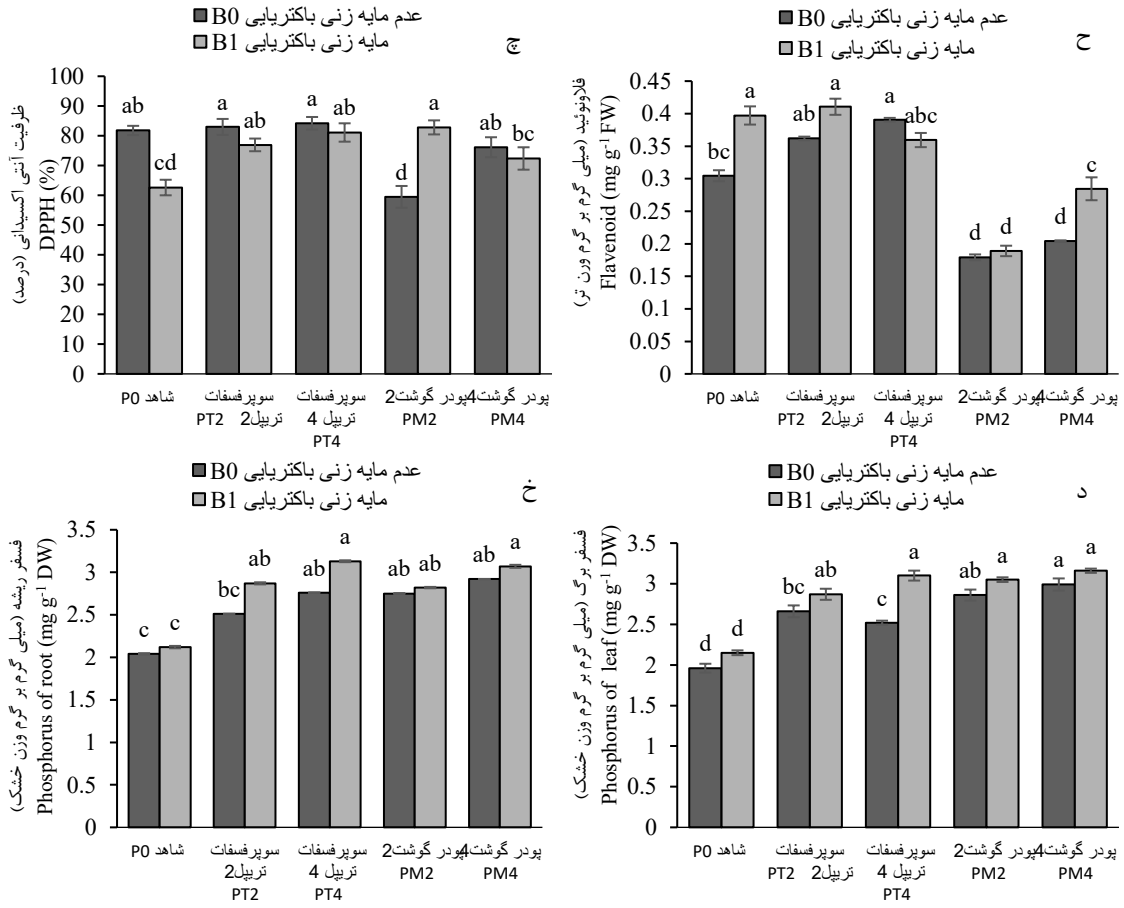
* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد، n.s: غیر معنی‌دار

* and **: Significat at 5 and 1 % probability levels, respectively. ns: non significant

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]



[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]



شکل ۲- اثر متقابل مایه‌زنی باکتریایی و منابع فسفر بر صفات فیزیولوژیکی گوجه‌فرنگی. سوپر فسفات تریپل ۲ (سوپر فسفات تریپل در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، سوپر فسفات تریپل ۴ (سوپر فسفات تریپل در غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، پودر گوشت ۲ (پودر گوشت در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، پودر گوشت ۴ (پودر گوشت در غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم).

Fig. 2. The interaction effect of bacterial inoculation and phosphorus sources on some physiological characteristics of tomato. PT2 (triple superphosphate at a concentration of 20 mg/kg), PT4 (triple superphosphate at a concentration of 40 mg/kg), PM2 (meat powder at a concentration of 20 mg/kg), PM4 (meat powder at a concentration of 40 mg/kg).

همچنین گزارش شده است که مایه‌زنی ریزوباکترهای محرک رشد در مقایسه با عدم مایه‌زنی، RWC گیاهان ذرت را افزایش داد (Kumar *et al.,* 2019). گونه‌های ریزوباکتری اگزوپلی ساکاریدها را تولید می‌کنند که با افزایش ظرفیت نگهداری آب، خاک را هیدراته نگه‌داشته و درنتیجه از ریشه‌های گیاه در برابر خشک شدن محافظت می‌کند (Ahmad *et al.,* 2022). بنابراین، این ریزوباکترها ممکن است توانایی خاک را برای تنظیم پتانسیل آبی و حفظ رطوبت افزایش دهند، که درنتیجه باعث بهبود جذب مواد مغذی و رشد بهتر گیاهان می‌شود (Ahmad *et al.,* 2022). نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که عدم مایه‌زنی و مایه‌زنی باکتریایی تفاوت معنی‌داری در تیمار شاهد و سوپر فسفات تریپل در هر دو غلظت نسبت به سایر تیمارها نشان داد و از بین منابع فسفر پودر گوشت با غلظت ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نسبت به سایر منابع فسفر محتوای نسبی آب برگ را بهبود بخشید.

در مطالعه‌ای که توسط Tavarini و همکاران (۲۰۲۰) انجام شد، مشخص شد که کاربرد فسفر بهترین نتایج را از نظر محتوای فیتوشیمیایی، از جمله فنول کل و فلاونوئید کل، به همراه حداکثر فعالیت آنتی‌اکسیدانی در شرایط آزمایشگاهی بر روی گیاهان استویا داشت. مشخص شده است که گیاهان برای بیوسنتز متابولیت‌های اولیه و ثانویه به مقدار نسبتاً زیادی فسفر نیاز دارند، زیرا

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]

فسفر به‌عنوان ترکیبی از اسیدهای نوکلئیک و فسفولیپیدها وظایف اساسی دارد و نقش کلیدی در متابولیسم انرژی سلول ها ایفا می‌کند (Nell *et al.,* 2009).

عطار زاده و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کرد که کود فسفر نقشی در تبدیل اسید کافئیک با تأثیر بر ژن‌های کلیدی برای بیان در مسیر بیوسنتزی فنیل پروپانوئید ایفا می‌کند. بنابراین می‌توان ادعا کرد که فسفر در تنظیم میزان ترکیبات فنیل پروپانوئیدی و اکیناکوزیدی در گیاه نقش دارد و فعالیت این آنزیم‌ها در سطح رونویسی کنترل می‌شود (Liu *et al.,* 2016). محققان گزارش دادند که کودهای زیستی با افزایش جذب عناصر غذایی و بیوسنتز فیتوهورمون‌ها باعث بهبود رشد گیاه و افزایش ترکیبات فنولی در گیاهان می‌شوند (Etesami & Maheshwari, 2018)، که این یافته‌ها با نتایج این مطالعه همخوانی دارد به‌طوری‌که کاربرد پودر گوشت با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم همراه با مایه‌زنی نسبت به عدم مایه‌زنی باکتریایی محتوای فنول را ۵۹ درصد افزایش داد. مایه‌زنی سودوموناس پوتیدا باعث افزایش فلاونوئیدها و فنول‌ها در پونه[۱] شد (Asghari *et al.,* 2020). گونه‌های سودوموناس پوتیدا محتوای فنولی گوجه‌فرنگی را ۱۴/۰۷-۱۸/۷۸ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم افزایش دادند (Issifu *et al.,* 2023). در پژوهش حاضر، سوپر فسفات تریپل در هر دو غلظت ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و پودر گوشت در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در شرایط مایه‌زنی باکتریایی باعث افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی نسبت به گروه شاهد همراه با مایه‌زنی باکتریایی شدند. محتوای فنول در تیمار پودر گوشت با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در تیمار شاهد و پودر گوشت با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، تفاوت معنی‌داری بین مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی نشان داد. اما در سایر تیمارها، تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد.

نتایج حاصل از پژوهش Azarmi-Atajan و Sayyari-Zohan (۲۰۲۲) نشان داد که مایه‌زنی باکتریایی با کاهش pH خاک موجب آزادسازی پروتون‌ها و/یا اسیدهای آلی با تولید فسفاتازهای اسیدی می‌شود که در دسترس بودن فسفر خاک را افزایش می‌دهد (Alori *et al.,* 2017). انحلال و در دسترس بودن فسفر خاک توسط جمعیت میکروبی به نوع منبع فسفات (آلی یا معدنی)، نوع گیاه میزبان و جمعیت میکروبی بستگی دارد (Niu *et al.,* 2010). نتایج حاصل از پژوهشی نشان داد که مایه‌زنی باکتریایی سودوموناس (سویه لوتئولا BN0834) باعث افزایش طول کل ساقه و مقدار فسفر، پتاسیم و کلسیم در برگ درختان سیب شد (Kurek *et al.,* 2013). Załuszniewska و Nogalska (۲۰۲۲) نیز نشان دادند که میزان فسفر موجود در خاک با کاربرد پودر گوشت و استخوان افزایش یافت، آن‌ها کاهش pH خاک پس از کاربرد پودر گوشت و استخوان را مؤثر بر افزایش جذب فسفر از خاک دانستند.

نتایج نمودار PCA داده‌ها نشان می‌دهد که تیمار پودر گوشت با غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم با عدم مایه‌زنی یا مایه‌زنی باکتریایی صفات رشدی از جمله وزن تر شاخساره و ریشه، طول، قطر، میانگین وزن میوه و ویتامین C گوجه‌فرنگی را بهبود بخشید و مؤثرترین تیمار بوده است. در تیمارهایی که سوپر فسفات تریپل با عدم مایه‌زنی یا مایه‌زنی باکتریایی استفاده شد، هرچند صفات فلاونوئید و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی افزایش یافتند، اما گیاهان در شرایط مایه‌زنی باکتریایی، از فاکتورهای تنش دورتر شدند و وضعیت بهتری پیدا کردند. همچنین در شرایط مایه‌زنی باکتریایی، پودر گوشت در غلظت پایین نسبت به غلظت بالا تأثیر کمتری بر وزن تر و خشک شاخساره و محتوای نسبی آب برگ داشت. در شرایطی که فسفر وجود نداشت، هم در شرایط عدم مایه‌زنی و هم در شرایط مایه‌زنی باکتریایی، تیمارها از صفات مطلوب فاصله بیشتری گرفتند و اثرات منفی بیشتری را نشان دادند. همچنین، در شرایطی که مایه‌زنی باکتریایی داشتیم، پودر گوشت در غلظت بالا باعث افزایش طول، قطر و میانگین وزن میوه شد که به نظر می‌رسد روی اندازه تک میوه مؤثر بوده است، اما در شرایطی که عدم مایه‌زنی باکتریایی داشتیم، موجب تأثیرگذاری بیشتر بر روی فنول، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و محتوای نسبی آب برگ گردید (شکل ۳).

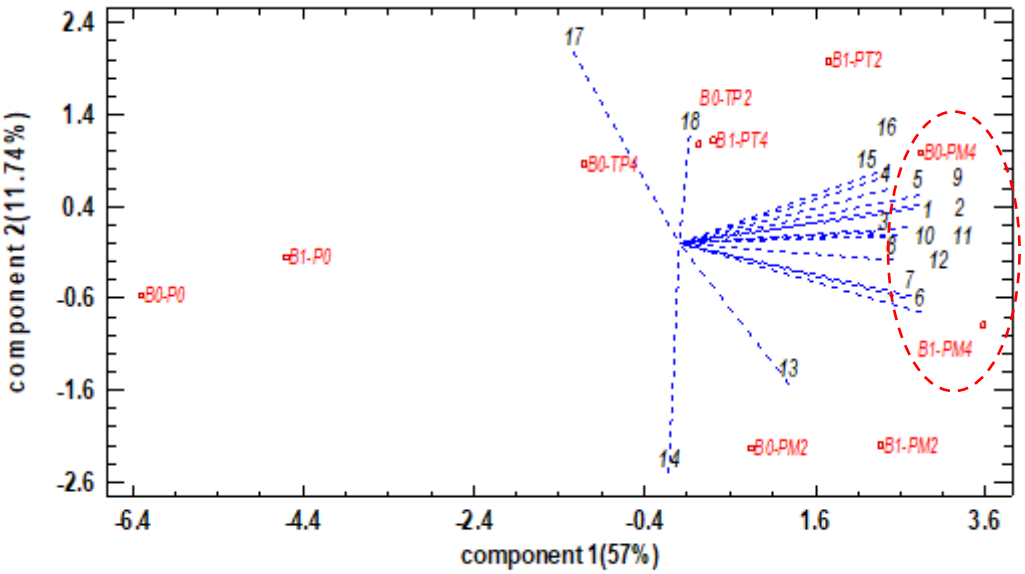
تحقیقات نشان داده‌اند که مایه‌زنی باکتریایی می‌تواند به طور قابل توجهی بر مسیر ISR[۲] تأثیر بگذارد. به عنوان مثال، در مطالعه‌ای که توسط Kisiel و همکاران (2024)انجام شده، مایه‌زنی با باکتری *Paenibacillus borealis* KK4 باعث افزایش ترکیبات فنولی در *Medicago truncatula* می‌شود. ترکیبات فنولی به عنوان خط اول دفاع گیاه در برابر پاتوژن‌ها عمل می‌کنند و فعالیت

۱- *Mentha pulegium* L.

۲- Induced systemic resistance

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]

آنزیم phenylalanine ammonia-lyase (PAL) در این مسیر بیوسنتزی نقش کلیدی دارد. همچنین، در پژوهش Chandrasekaran و همکاران(2019) ، باکتری *Bacillus subtilis* CBR05 تأثیر مثبت بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی گوجه‌فرنگی داشته و به عنوان یک تنظیم‌کننده در سنتز ترکیبات آنتی‌اکسیدانی عمل کرده است. این نتایج نشان می‌دهد که باکتری‌ها می‌توانند به افزایش فعالیت آنزیم‌های دفاعی کمک کنند، که در نهایت منجر به تقویت مقاومت سیستمیک گیاه در برابر پاتوژن‌ها می‌شود. با این حال، نتایج ما ممکن است با یافته‌های پیشین در تضاد باشد، زیرا در شرایط عدم مایه‌زنی باکتریایی، تأثیر بیشتری بر روی فنول‌ها و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی مشاهده شد. این تناقض می‌تواند ناشی از تفاوت در شرایط گلخانه، نوع باکتری‌های مورد استفاده و تأثیرات محیطی باشد که بر روی مسیرهای بیوسنتزی و فعالیت آنزیم‌ها تأثیر می‌گذارد. به عبارت دیگر، در غیاب باکتری‌های مفید، گیاه ممکن است به طور طبیعی به افزایش تولید ترکیبات دفاعی و آنتی‌اکسیدانی پاسخ دهد، که این امر می‌تواند توضیح‌دهنده نتایج متناقض ما باشد.



شکل ۳- نمودار PCA اثر متقابل تیمارها بر صفات رشدی و فیزیولوژی گوجه‌فرنگی. وزن تر شاخساره (۱)، وزن خشک شاخساره (۲)، وزن تر ریشه (۳)، وزن خشک ریشه (۴)، طول شاخساره (۵)، طول میوه (۶)، قطر میوه (۷)، میانگین وزن میوه (۸)، عملکرد (۹)، سفتی میوه (۱۰)، ویتامین C میوه (۱۱)، کلروفیل a (۱۲)، کلروفیل b (۱۳)، کاروتنوئید (۱۴)، محتوای نسبی آب برگ (۱۵)، فنول (۱۶)، فلاونوئید (۱۷)، ظرفیت آنتی¬اکسیدانی (۱۸). عدم مایه‌زنی باکتریایی × عدم فسفر (B0-P0)، عدم مایه‌زنی باکتریایی × سوپر فسفات تریپل ۲۰ (B0-TP2)، عدم مایه‌زنی باکتریایی × سوپر فسفات تریپل ۴۰ (B0-TP4)، عدم مایه‌زنی باکتریایی × پودر گوشت ۲۰ (B0-PM2)، عدم مایه‌زنی باکتریایی × پودر گوشت ۴۰ (B0-PM4). مایه‌زنی باکتریایی × عدم فسفر (B1-P0)، مایه‌زنی باکتریایی × سوپر فسفات تریپل ۲۰ (B1-TP2)، مایه‌زنی باکتریایی × سوپر فسفات تریپل ۴۰ (B1-TP4)، مایه‌زنی باکتریایی × پودر گوشت ۲۰ (B1-PM2)، مایه‌زنی باکتریایی × پودر گوشت ۴۰ (B1-PM4).

Fig. 3. The PCA analysis of interaction effect of treatments on growth traits and physiology of tomato. Shoot fresh weight (1), shoot dry weight (2), root fresh weight (3), root dry weight (4), shoot length (5), fruit length (6), fruit diameter (7), average fruit weight (8), yield (9), fruit firmness (10), fruit vitamin C (11), chlorophyll a (12), chlorophyll b (13), carotenoid (14), relative leaf water content (15), phenol (16) , flavonoid (17), antioxidant capacity (18). No bacterial inoculation × no phosphorus (B0-P0), no bacterial inoculation × triple superphosphate 20 (B0-TP2), no bacterial inoculation × triple superphosphate 40 (B0-TP4), no bacterial inoculation × meat powder 20 (B0-PM2), no bacterial inoculation × meat powder 40 (B0-PM4). Inoculation of bacteria × lack of phosphorus (B1-P0), inoculation of bacteria × superphosphate triple 20 (B1-TP2), inoculation of bacteria × superphosphate triple 40 (B1-TP4), inoculation of bacteria × meat powder 20 (B1-PM2), inoculation of bacteria × Meat powder 40 (B1-PM4).

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که در بررسی صفات موردمطالعه، تفاوت معنی‌داری بین مایه‌زنی و عدم مایه‌زنی باکتریایی در صفات رشدی و عملکردی مانند وزن تر ریشه، میانگین وزن میوه، عملکرد تک بوته و سفتی میوه وجود نداشت. بااین‌حال، در سایر صفات، تفاوت‌های معنی‌داری مشاهده شد. در شرایط مایه‌زنی باکتریایی، طول شاخساره، عملکرد تک بوته، ویتامین C ، کلروفیل a ، فنول و فسفر در برگ و ریشه در تمامی منابع فسفر نسبت به گروه شاهد افزایش یافت، و تفاوت معنی‌داری بین منابع فسفر مشاهده نشد. همچنین، کاربرد پودر گوشت در هر دو غلظت ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بیشترین طول میوه، کلروفیل b و کاروتنوئید را نسبت به شاهد نشان داد. درنهایت، مایه‌زنی باکتریایی همراه با کاربرد ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم پودر گوشت باعث افزایش وزن تر و خشک شاخساره، قطر میوه و محتوای نسبی آب برگ نسبت به گروه شاهد شد. به‌طورکلی، نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت مایه‌زنی باکتریایی و کاربرد پودر گوشت بر برخی صفات رشدی و عملکردی گیاهان است. استفاده از پودر گوشت برای تولید محصولات ارگانیک که هزینه بیشتری دارند، از نظر صرفه اقتصادی قابل توجیه هست، اما ممکن است برای تولید محصولات در مزرعه به دلیل هزینه‌ها و منابع موردنیاز، مقرون‌به‌صرفه نباشند.

منابع References

Ahmad, H. M., Fiaz, S., Hafeez, S., Zahra, S., Shah, A. N., Gul, B., Aziz, O., Ur-Rahman, M., Fakhar, A., Rafique, M., Chen, Y., Yang, S. H., and Wang, X. (2022). Plant growth-promoting rhizobacteria eliminate the effect of drought stress in plants: A review. *Frontiers in Plant Science, 13,* 875774.

Alori, E. T., Glick, B. R., and Babalola, O. O. (2017). Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiolgy, 8,* 971.

Alsulaiman, M. A., and Al-Ansari, A. S. (2023). Response of some wheat (*Triticum aestivum* L.) growth parameters to nano phosphate fertilizer compared to superphosphate fertilizer. *Basrah Journal of Agricultural Sciences, 36*(2), 215-225.

Asghari, B., Khademian, R., and Sedaghati, B. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) confer drought resistance and stimulate biosynthesis of secondary metabolites in pennyroyal (*Mentha pulegium* L.) under water shortage conditions, *Scientia Horticulturae, 26,* 109132.

Azarmi-Atajan, F., and Sayyari-Zohan, M. H. (2022). Effect of phosphate solubilizing bacteria and triple superphosphate on the growth, physiological parameters and phosphorus uptake of pistachio seedlings. *Journal of Horticulture and Postharvest Research*, *5*(1), 69-78.

Chandrasekaran, M., Chun, S. C., Oh, J. W., Paramasivan, M., Saini, R. K., and Sahayarayan, J. J. (2019). *Bacillus subtilis* CBR05 for tomato (*Solanum lycopersicum*) fruits in South Korea as a novel plant probiotic bacterium (PPB): implications from total phenolics, flavonoids, and carotenoids content for fruit quality. *Agronomy, 9*, 838.

Demba, D., Ndiogou, G., Carras, S. I., Adiouma, D., and Abdoulaye, D. T. (2019). Study of the effect of pseudomonas putida and funneliformis mosseae on the growth and productivity of tomato (*Solanum Lycopersicum* L.) in senegal. *European Scientific Journal, 15*, 857-7881.

Dordas, C. (2009). Dry matter, nitrogen and phosphorus accumulation: partitioning and remobilization as affected by N and P fertilization and source-sink relation. *European Journal of Agronomy*, *30,* 129–139.

Emam, Y., and Eilkaee, M. N. (2002). Effects of plant density and chlormequat chloride (CCC) on morphological characteristics and grain yield of winter oilseed rape cv, Talayeh. *Journal of Agronomy and Crop Science, 1,* 1–8. (In Farsi).

Etesami, H. (2020). Enhanced phosphorus fertilizer use efficiency with microorganisms. In: Nutrient dynamics for sustainable crop production. Springer. p. 215-245.

Etesami, H., and Maheshwari, D. K. (2018). Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: action mechanisms and future prospects. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 156,* 225–246.

Glick, B. R. (2014). Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiological Research, 169*(1), 30–39.

Goulet, C., Kamiyoshihara, Y., Lam, N. B., Richard, T., Taylor, M. G., Tieman, D. M., and Klee, H. J. (2015). Divergence in the enzymatic activities of a tomato and Solanum pennellii alcohol acyltransferase impacts fruit volatile ester composition. *Molecular Plant, 8,* 153–162.

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]

Hegazi, A. M., El-Shraiy, A. M., and Ghoname, A. A. (2017). Growth, yield and nutritional quality of sweet pepper plants as affected by potassium and phosphate fertilizers varying in source and solubility. *Current Science International, 6*(2), 445-457.

Idris, O. A., Wintola, O. A., and Afolayan, A. J. (2019). Comparison of the proximate composition, vitamins (ascorbic acid, α-tocopherol and retinol), anti-nutrients (phytate and oxalate) and the GC-MS analysis of the essential oil of the root and leaf of *Rumex crispus* L. *Plants, 8*(3), 51.

Ilahy, R., Siddiqui, M. W., Tlili, I., Montefusco, A., Piro, G., Hdider, C., and Lenucci, M. S. (2018).When color really matters: horticultural performance and functional quality of high-lycopene tomatoes. CRC Crit. Rev. *Plant Science, 37,* 15–53.

Issifu, M., Naitchede, L. H. S., Ateka, E. M., Onguso, J., and Ngumi, V. W. (2023). Synergistic effects of substrate inoculation with Pseudomonas strains on tomato phenology, yield, and selected human health-related phytochemical compounds. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, *6*(4), e20435.

Jatana, B. S., Kitchens, C., Ray, C., and Tharayil, N. (2020). Regulating the nutrient release rates from proteinaceous agricultural byproducts using organic amendments and its effect on soil chemical and microbiological properties. *Biology and Fertility of Soils, 56,* 747–58.

Jeng, A. S., Haraldsen, T. K., Grønlund, A., and Pedersen, P. A. (2006). Meat and bone meal as nitrogen and phosphorus fertilizer to cereals and ryegrass. Nutr. Cycl. *Agroecosystems, 76,* 183–191.

Kisiel, A., Miller, T., Łobodzińska, A., and Rybak, K. (2024). Biosynthesis of phenolic compounds of *Medicago truncatula* after inoculation with selected pgpr strains. *International Journal of Molecular Sciences, 25*, 12684.

Koleva, I. I., Van Beek, T. A., Linssen, J. P. H., de Groot, A., and Evstatieva, L. N. (2002). Screening of plant extracts for antioxidant activity: a comparative study on three testing methods. *Phytochemical Analysis, 13,* 8-17.

Kumar, S., Diksha Sindhu, S. S., Sindhu, S. S., and Kumar, R. (2022). Biofertilizers: an ecofriendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability. *Current Research in Microbial Sciences, 3,* 100094–100126.

Kumar, A., Patel, J. S., Meena, V. S., and Srivastava, R. (2019). Recent advances of PGPR based approaches for stress tolerance in plants for sustainable agriculture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 20,* 101271.

Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology, 148,* 350-382.

López-Arredondo, D. L., Leyva-González, M. A., González-Morales, S. I., López-Bucio, J., and Herrera-Estrella, L. (2014). Phosphate nutrition: improving low-phosphate tolerance in crops. *Annual Review of Plant Biology, 65,* 95–123.

López-Serrano, L., Canet-Sanchis, G., Vuletin Selak, G., Penella, C., San Bautista, A., López-Galarza, S., and Calatayud, Á. (2019). Pepper rootstock and scion physiological responses under drought stress. *Frontiers in Plant Science, 10,* 38.

Maghsoodi, M. R., Ghodszad, L., ans Lajayer, B. A. (2020). Dilemma of hydroxyapatite nanoparticles as phosphorus fertilizer: Potentials, challenges and effects on plants. *Environmental Technology & Innovation, 19,* 100869.

Marathe, R., Phatake, Y., Shaikh, A., Shinde, B., and Gajbhiye, M. (2017). Effect of IAA produced by Pseudomonas aeruginosa 6a (bc4) on seed germination and plant growth of Glycin max. *Journal Experimental Biology and Agriculture Sciences, 5,* 351-358.

Menezes-Blackburn, D., Giles, C., Darch, T., George, T. S., Blackwell, M., Stutter, M., Shand, C., Lumsdon, D., Cooper, P., Wendler, R., Brown, L., Almeida, D. S., Wearing, C., Zhang, H., and Haygarth, P. M. (2018). Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review. *Plant and Soil*, 427, 5-16.

Murillo-Amador, B., Yamada, S., Yamaguchi, T., Rueda-Puente, E., Ávila-Serrano, N., García-Hernández, J. L., and Nieto-Garibay, A. (2007). Influence of calcium silicate on growth, physiological parameters and mineral nutrition in two legume species under salt stress. *Journal of Agronomy and Crop Science, 193,* 413-421.

Nell, M., Vötsch, M., Vierheilig, H., Steinkellner, S., Zitterl-Eglseer, K., Franz, C., and Novak, J. (2009). Effect of phosphorus uptake on growth and secondary metabolites of garden sage (*Salvia officinalis*, L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture, 89,* 1090–1096.

Nieto-Monteros, D. A., de Oliveira Penha, R., and Soccol, C. R. (2023). Foliar supplementation of recycled phosphorus from cattle bone meal improves soybean growth characteristics, nutrient content, and chlorophyll pigment concentration. *Sustainability, 15*(8), 6582.

Niu, S., Wu, M., Han, Y. I., Xia, J., Zhang, Z., Yang, H., and Wan, S. (2010). Nitrogen effects on net ecosystem carbon exchange in a temperate steppe. *Global Change Biology, 16,* 144-155.

Njoku, N. E., Ubbaonu, C. N., Alagbaoso, S. O., Eluchie, C. N., and Umelo, M. C. (2015). Amino acid profile and oxidizable vitamin content of *Synsepalum dulcificum* berry (miracle fruit) pulp. *Food Science & Nutrition Journal*, *3*(3), 252–256.

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]

Nogalska, A., Skwierawska, M., and Załuszniewska, A. (2018). Effect of meat and bone meal (MBM) and Bacillus subtilis on the content of nitrogen and phosphorus in soil and white mustard biomass. *Agricultural and Food Science*, *27,* 275–282.

Orellana, D., Machuca, D., Ibeas, M. A., Estevez, J. M., and Poupin, M. J. (2022). Plant-growth promotion by proteobacterial strains depends on the availability of phosphorus and iron in Arabidopsis thaliana plants. *Frontiers in Microbiology*, *13*, 1083270.

Pathan, S. I., Vetrovsky, T., Giagnoni, L., Datta, R., Baldrian, P., Nannipieri, P., and Renella, G. (2018). Microbial expression profiles in the rhizosphere of two maize lines differing in N use efficiency. *Plant and Soil, 433,* 401–413.

Pathaveerat, S., Jantra, D. C., and Slaughter, A. (2018). Roach, development of a hand held precision penetrometer system for fruit firmness measurement. *Postharvest Biology and Technology*, *144,* 1-8.

Patten, C. L., and Glick, B. R. (2002). Role of Pseudomonas putida indole acetic acid in development of the host plant root system. *Applied Environmental Microbiology*, *68,* 3795-3801.

Pérez-Rodriguez, M. M., Pontin, M., Lipinski, V., Bottini, R., Piccoli, P., and Cohen, A. C. (2020). *Pseudomonas fluorescens* and *Azospirillum brasilense* increase yield and fruit quality of tomato under field conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 20*, 1614-1624.

Poirier, Y., Jaskolowski, A., and Clúa, J. (2022). Phosphate acquisition and metabolism in plants. *Current Biology*, *32,* 623–629.

Rehan, M., Al-Turki, A., Abdelmageed, A. H. A., Abdelhameid, N. M., and Omar, A. F. (2023). Performance of plant-growth-promoting rhizobacteria (pgpr) isolated from sandy soil on growth of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Plants*, *12*(8), 1588.

Saglam, A., Demiralay, M., Colak, D. N., Gedik, N. P., Basok, O., and Kadioglu, A. (2022). *Pseudomonas putida* KT2440 induces drought tolerance during fruit ripening in tomato. *Bioagro, 34*, 139-150.

Sánchez-Esteva, S., Gómez-Muñoz, B., Jensen, L. S., de Neergaard, A., and Magid, J. (2016). The effect of *Penicillium bilaii* on wheat growth and phosphorus uptake as affected by soil pH, soil P and application of sewage sludge. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 3,* 21.

Santos, I. B., Lima, D. R. M., Barbosa, J. G., Oliveira, J. T. C., Freire, F. J., and Kuklinsky-Sobral, J. (2012). Diazotrophic bacteria associated to roots of sugarcane: inorganic phosphate solubilization and the salinity tolerance. *Journal of Biosciences*, *28,* 142–149.

Shaharroona, B., Arshad, M., Zahir, Z. A., and Khalid, A. (2006). Performance of pseudomonas spp. containing acc-deaminase for improving growth and yield of maize (*Zea mays* L.) in the presence of nitrogenous fertilizer. *Soil Biology and Biochemistry, 38,* 2971-2975.

Singleton, V. L., and Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture, 16,* 144-158.

Srinivasan, R., Alagawadi, A. R., Yandigeri, M. S., Meena, K. K., and Saxena, A. K. (2012). Characterization of phosphate-solubilizing microorganisms from salt-afected soils of India and their efect on growth of sorghum plants [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Annals of Microbiology, 62*(1), 93–105.

Tavarini, S., Clemente, C., Bender, C., and Angelini, L. G. (2020). Health-promoting compounds in stevia: the effect of mycorrhizal symbiosis, phosphorus supply and harvest time. *Molecules*, *25*(22), 5399.

Yadav, H., Fatima, R., Sharma, A., and Mathur, S. (2017). Enhancement of applicability of rock phosphate in alkaline soils by organic compost. *Applied Soil Ecology, 113,* 80–85.

Yazdizadeh Shotorbani, N., Jamei, R., and Heidari, R. (2013). Antioxidant activities of two sweet pepper *Capsicum annuum* L cultivars phenolic extracts and the efects of thermal treatment. *American Physiological Society Journal, 3,* 25–34.

Zaidi, A., Khan, S M., and Ahemad, M. (2009). Recent advances in plant growth promotion by phosphate-solubilizing microbes. In: Khan, M. S. editor. Microbial strategies for crop improvement. New York, NY: Springer. p 325–51.

Załuszniewska, A., and Nogalska, A. (2022). The effect of meat and bone meal (MBM) on phosphorus (P) content and uptake by crops, and soil available P balance in a six-year field experiment. *Sustainability*, *14*(5), 2855.

Zhu, Q., Ozores-Hampton, M., Li, Y. C., Morgan, K. T., Liu, G., and Mylavarapu, R. S. (2018). Effect of phosphorus rates on growth, yield, and postharvest quality of tomato in a calcareous soil. *HortScience, 52,* 1406–1412.

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]

Iranian Journal of Horticultural Science and Technology 27 (2):135-156 (2026)
Research article

Effect of Phosphorus Fertilizers and Bacterial Inoculation on Yield, Growth, and Physiology of Tomato

Maryam Haghighi*, Mehdi Jalali
Isfahan University of Technology
Corresponding Author, Email: (mhaghighi@cc.iut.ac.ir)

Phosphorus is a vital nutrient for plant growth, and maintaining adequate levels in the soil is crucial for maximizing agricultural productivity. The use of biofertilizers serves as an environmentally friendly and cost-effective alternative to expensive chemical fertilizers. Therefore, this study aimed to investigate the effects of bio-phosphorus fertilizers and triple superphosphate compared to a phosphorus-free control (the control group), along with examining the interaction of phosphate-solubilizing bacteria (*Pseudomonas putida*) on the quantitative and qualitative traits of tomatoes. The experiment was conducted as a factorial design with two factors in a completely randomized layout with three replications. The treatments included the use of phosphorus fertilizers and bacterial inoculation. The fertilizer treatments consisted of five levels: a phosphorus-free control, triple superphosphate at concentrations of 20 and 40 mg/kg, and bio-phosphorus in the form of meat powder at two concentrations of 20 and 40 mg/kg. The bacterial treatment included two levels: non-inoculated and inoculated. The highest fruit length was observed during bacterial inoculation with meat powder at both 20 and 40 mg/kg compared to the control group. Additionally, bacterial inoculation combined with meat powder at 40 mg/kg resulted in the highest fresh and dry weight of the shoot, fruit diameter, and relative leaf water content compared to the control. Triple superphosphate at 20 mg/kg, along with both concentrations of meat powder during bacterial inoculation, showed the highest fresh and dry root weight. Overall, among various phosphorus sources, meat powder at 40 mg/kg had a more significant effect on improving the growth traits of tomatoes, while bacterial inoculation did not significantly enhance fruit weight and single-plant yield compared to non-inoculation.

Keywords: Biofertilizer, Triple superphosphate, Vitamin C, Yield.

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-09-07]