



Effect of Phosphate-Solubilizing Bacteria and Phenylalanine on Growth Characteristics, Photosynthetic Pigments, and Essential Oil Content of Meadow Sage (*Salvia virgata* Jacq.)

Sara Farsaraei¹, Mohammad Moghaddam^{1*}, Hossein Nemati¹ and Mohammad Mahmoodi Sarvestani²

1- Department of Horticultural Science and Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

* Corresponding author, Email: m.moghaddam@um.ac.ir

(Received: 7 June 2025; Revised: 8 October 2025; Accepted: 11 October 2025)

Abstract

Background and Objective: Phosphorus plays a crucial role in the growth of medicinal plants. Phosphate-solubilizing bacteria (PSB) improve phosphorus uptake, while phenylalanine positively influences plant metabolic pathways. This study aimed to evaluate the effects of growth-promoting PSB and foliar application of phenylalanine on the growth characteristics, photosynthetic pigments, and essential oil content of meadow sage (*Salvia virgata* Jacq.) under greenhouse conditions.

Methods: The experiment was conducted in a factorial arrangement, based on a completely randomized design with two factors: nine bacterial species (*Pantoea agglomerans*, *Bacillus pumilus*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida*, *Enterobacter cloacae*, *Rhizobium meliloti*) and a control, and three concentrations of foliar-applied phenylalanine (0, 100, and 200 mg L⁻¹), with four replications.

Results: The interaction between bacteria and phenylalanine had a significant effect on all measured traits at the 1% probability level. The highest plant height and fresh and dry root weights were obtained with *P. putida* combined with foliar application of 200 mg L⁻¹ phenylalanine. Application of *B. licheniformis* with 200 mg L⁻¹ phenylalanine increased leaf relative water content (45.6%), chlorophyll a (50.0%), chlorophyll b (39.6%), total chlorophyll (35.9%), and carotenoids (39.4%) compared with the control (no bacteria or phenylalanine). The highest essential oil yield (0.57 %w/w) was observed in the *P. fluorescens* treatment combined with foliar application of 200 mg L⁻¹ phenylalanine.

Conclusion: These findings indicate that application of *B. licheniformis* and *P. fluorescens*, together with foliar application of phenylalanine at 200 mg L⁻¹, can effectively enhance essential oil yield and photosynthetic pigment content, thereby improving the yield and quality of meadow sage.

Keywords: *Bacillus licheniformis*, Growth-promoting, Leaf relative water content, Phosphate, *Pseudomonas fluorescens*.

How to Cite: Farsaraei, S., Moghaddam, M., Nemati, H., Mahmoodi Sarvestani, M., 2025. Effect of phosphate-solubilizing bacteria and phenylalanine on growth characteristics, photosynthetic pigments, and essential oil content of meadow sage (*Salvia virgata* Jacq.). J. Soil Plant Interact. 16(4), 1–16 (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jspi.16.4.21661>





تأثیر باکتری‌های حل‌کننده فسفات و محلول‌پاشی فنیل آلانین بر ویژگی‌های رشدی، رنگیزه‌های فتوسنتزی و میزان اسانس مریم‌گلی ترکه‌ای (*Salvia virgata* Jacq.)

سارا فرسزائی^۱، محمد مقدم^{۱*}، حسین نعمتی^۱ و محمد محمودی سروسستانی^۲

۱- گروه مهندسی علوم باغبانی و فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: m.moghadam@um.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۳/۱۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۱۹)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: فسفر نقش کلیدی در رشد و نمو گیاهان ایفا می‌کند. باکتری‌های حل‌کننده فسفات (PSB) موجب بهبود جذب فسفر می‌شوند. همچنین فنیل آلانین تأثیر مثبتی بر مسیرهای متابولیسمی گیاه دارد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر باکتری‌های حل‌کننده فسفات و محلول‌پاشی فنیل آلانین بر برخی ویژگی‌های رشدی، رنگیزه‌های فتوسنتزی و میزان اسانس گیاه مریم‌گلی ترکه‌ای (*Salvia virgata* Jacq.) در شرایط گلخانه‌ای انجام شد.

روش‌ها: پژوهش حاضر به صورت فاکتوریل دو عاملی در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار اجرا شد. فاکتور اول شامل تلقیح گیاه با ۹ سویه باکتری (*Pantoea agglomerans*, *Bacillus pumilus*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida*, *Enterobacter cloacae*, *Rhizobium meliloti*) و شاهد، و فاکتور دوم محلول‌پاشی سه غلظت فنیل آلانین (۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) در چهار تکرار بود.

نتایج: نتایج نشان داد که اثر برهمکنش باکتری‌ها و فنیل آلانین بر کلیه صفات مورد بررسی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. بیشترین ارتفاع بوته، وزن تازه و خشک ریشه با کاربرد باکتری *P. putida* همراه با محلول‌پاشی فنیل آلانین در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر حاصل شد. همچنین کاربرد باکتری *B. licheniformis* و محلول‌پاشی فنیل آلانین در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ (۴۵/۶ درصد)، کلروفیل a (۵۰ درصد)، کلروفیل b (۳۹/۶ درصد)، کلروفیل کل (۳۵/۹ درصد) و کارتنوئید (۳۹/۴ درصد) نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد باکتری و فنیل آلانین) شد. بیشترین میزان اسانس (۵۷٪ درصد جرمی) نیز در تیمار *P. fluorescens* و محلول‌پاشی فنیل آلانین با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر حاصل شد.

نتیجه‌گیری کلی: به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به اهمیت اسانس و رنگیزه‌های فتوسنتزی در کیفیت و ارزش اقتصادی گیاهان دارویی، کاربرد باکتری‌های *B. licheniformis* و *P. fluorescens* همراه با محلول‌پاشی فنیل آلانین در سطح ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر برای افزایش عملکرد و کیفیت گیاه مریم‌گلی ترکه‌ای پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: فسفات، محتوای نسبی آب برگ، محرک رشد، *Pseudomonas fluorescens*، *Bacillus licheniformis*



مقدمه

استفاده از گیاهان دارویی به دلیل داشتن ترکیبات مؤثر دارویی، در طب سنتی، صنایع داروسازی، صنایع غذایی و بهداشتی افزایش تقاضا برای محصولات گیاهی، پژوهش‌های گسترده‌ای را برای بهبود کیفیت، کمیت و پایداری تولید این گیاهان به همراه داشته است (Shahhoseini et al., 2024). یکی از گیاهان دارویی ارزشمند، مریم‌گلی ترکه‌ای (*Salvia virgata* Jacq.) از خانواده نعناعیان است که به دلیل دارا بودن فلاونوئیدها، ترکیبات فنلی و اسانس‌های معطر، از ارزش دارویی و اقتصادی زیادی برخوردار است (Ben Akacha et al., 2024). اندام‌های مورد استفاده این گیاه، شاخساره شامل برگ‌ها و گل‌ها هستند که به دلیل خواص ضد میکروبی، آنتی‌اکسیدانی، ضد التهابی و تقویت سیستم ایمنی، در صنایع داروسازی و طب سنتی کاربرد گسترده‌ای دارد (Shahhoseini et al., 2019). یکی از اهداف اصلی در کشت این گیاه، افزایش رشد، عملکرد و میزان اسانس آن است. این گیاه به صورت خودرو در مناطق کوهستانی و معتدل ایران از جمله استان‌های فارس، مازندران و البرز رشد می‌کند (Esmaeili et al., 2022). سطح زیر کشت رسمی این گیاه محدود و عمدتاً به صورت پراکنده در مزارع کوچک یا در اطراف مناطق طبیعی آن گزارش شده است، چرا که بیشتر به صورت وحشی و طبیعی در زیستگاه‌های خود یافت می‌شود (Rahimi et al., 2019).

فسفر یکی از عناصر ضروری برای رشد و توسعه گیاهان در سطح سلولی و مولکولی است و در فرآیندهایی مانند فتوسنتز، انتقال انرژی، تقسیم سلولی و تشکیل اندام‌های گیاهی نقش حیاتی ایفا می‌کند (Walpola and Yoon, 2012). با این حال، فسفر موجود در خاک‌های کشاورزی عمدتاً به صورت ترکیبات نامحلول مانند فسفات کلسیم، آهن و آلومینیوم بوده که قابلیت جذب مستقیم توسط ریشه گیاه را ندارد و برای استفاده گیاه باید به شکل محلول تبدیل شود (Richardson, 2001). از این رو، تأمین فسفر مورد نیاز گیاهان معمولاً از راه کاربرد کودهای شیمیایی فسفره انجام می‌شود. با این حال، مصرف بی‌رویه این کودها نه تنها موجب کاهش کارایی جذب فسفر می‌شود، بلکه با

پیامدهای زیست‌محیطی همچون آلودگی منابع آب، تخریب ساختار خاک و کاهش تنوع زیستی میکروبی همراه است (Wei et al., 2018).

در این میان، استفاده از باکتری‌های حل‌کننده فسفات از جمله جنس‌هایی مانند *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobacter*، *Pantoea* و *Flavobacterium* به عنوان یک راهکار زیستی مؤثر برای افزایش دسترسی گیاهان به فسفر مورد توجه قرار گرفته است. این باکتری‌ها با تولید اسیدهای آلی مانند اسید سیتریک، اسید گلوکونیک، اسید اگزالیک و اسید لاکتیک، همچنین ترشح سیدروفورها و آنزیم‌های تجزیه‌کننده، ترکیبات فسفوری نامحلول را به شکل قابل جذب تبدیل کرده و جذب فسفر را برای گیاه تسهیل می‌کنند (Khattoon et al., 2020). پژوهش‌های متعددی اثر مثبت این باکتری‌های حل‌کننده فسفات را بر گیاهان دارویی گزارش کرده‌اند. در پژوهشی گزارش شد که تلقیح گیاه نعناع‌فللی با دو باکتری گونه *P. putida* و *P. agglomerans* منجر به بهبود عملکرد، افزایش رشد رویشی، سطح برگ و میزان اسانس آن شد (Seif Sahandi et al., 2019). بررسی‌های مشابه بر روی گیاهانی مانند شوید (Hegazi et al., 2015) با تلقیح با باکتری‌های گونه سودوموناس و همچنین در سه گونه مریم‌گلی (Abbaspour Anbi et al., 2019) تحت تلقیح با باکتری‌های گونه *Pseudomonas* و *Enterobacter* نیز نشان‌دهنده افزایش رشد و میزان اسانس با کاربرد باکتری‌های حل‌کننده فسفات بوده است. پژوهشی دیگر نشان داد که کاربرد باکتری *B. licheniformis* در ذرت موجب بهبود رنگیزه‌های فتوسنتزی و صفات رشدی در این گیاه شد (Galiliya Medison et al., 2023). باکتری گونه *P. fluorescens* نیز در گیاه نخودفرنگی نقش بهبوددهنده رشد در این گیاه را نشان داد (Oteino et al., 2015). در فندق نیز کاربرد ترکیبی سه باکتری *P. putida*، *B. subtilis* و *E. cloaca* تأثیر مثبتی در بهبود رشد این گیاه داشت (Rostamikia et al., 2024).

اسیدهای آمینه به‌عنوان واحدهای سازنده پروتئین‌ها، نقش مهمی در فرآیندهای فیزیولوژیک و متابولیک گیاهان ایفا می‌کنند.

افزایش فراهمی فسفر، رشد و کارایی فیزیولوژیک گیاه را بهبود بخشد. از سوی دیگر، اسید آمینه فنیل آلانین به عنوان پیش ماده مسیر فنیل پروپانویید نقش مهمی در القای تولید اسانس های معطر دارد. تاکنون پژوهش های اندکی اثر هم زمان این دو عامل زیستی را بر رشد، رنگیزه های فتوسنتزی و ترکیبات ثانویه گیاه مریم گلی ترکه ای بررسی کرده اند. از این رو، پژوهش حاضر با هدف تبیین آثار هم افزایی کاربرد باکتری های حل کننده فسفات و محلول پاشی فنیل آلانین بر ویژگی های مورفولوژیک، رنگیزه های فتوسنتزی و میزان اسانس این گیاه دارویی ارزشمند انجام شد.

مواد و روش ها

پژوهش حاضر به صورت فاکتوریل دو عاملی در قالب یک طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در گلخانه دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. در این پژوهش، فاکتور اول شامل تلقیح گیاه با ۹ سویه باکتری حل کننده فسفات:

(Pantoea agglomerans, Bacillus pumilus, Bacillus licheniformis, Bacillus megaterium, Bacillus subtilis, Pseudomonas fluorescens, Pseudomonas putida, Enterobacter cloacae, Rhizobium meliloti, control)

و فاکتور دوم محلول پاشی با اسید آمینه فنیل آلانین با سه غلظت (۵، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر) بود. تیمارهای مختلف به صورت ترکیبی اعمال شدند تا آثار هم زمان باکتری ها و فنیل آلانین بر ویژگی های مورفولوژیک، رنگیزه های فتوسنتزی و میزان اسانس گیاه مریم گلی ترکه ای (*Salvia virgata* Jacq.) مورد بررسی قرار گیرد.

برای اجرای آزمایش، بذرها ی مریم گلی در سینی کشت دارای کوکوپیت و پرلیت به نسبت (۱:۱) برابر کشت شدند. در مرحله چهار برگی، نشاءها به گلدان های ۱۲ کیلویی (قطر دهانه ۳۰ و ارتفاع ۴۰ سانتی متر) دارای مخلوط خاک باغچه، ماسه و خاک برگ به نسبت ۲:۱:۱ منتقل شدند. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی بستر کاشت در جدول ۱ آورده شده است. به منظور اعمال تیمار باکتری، مایه تلقیح باکتری ها از مرکز تحقیقات آب و خاک تهران بخش بیولوژی خاک تهیه شد و سپس تلقیح ریشه

فنیل آلانین یکی از اسیدهای آمینه معطر بوده که به عنوان پیش ساز اصلی در بیوسنتز ترکیبات فنلی و فلاونوئیدها شناخته می شود. این اسید آمینه نه تنها پیش ساز ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی است، بلکه می تواند بر بهبود صفات رشدی و میزان اسانس گیاهان دارویی نیز مؤثر باشد (Khan et al., 2019). پژوهش ها نشان داده اند که محلول پاشی فنیل آلانین در گیاهانی مانند بادرشبویه (Yazdanpanahi et al., 2024)، ریحان (Reham et al., 2016) و آویشن باغی (Naghdhi Badi et al., 2014)، باعث بهبود صفات رشدی، افزایش کلروفیل و میزان اسانس شده است. فنیل آلانین از راه مسیر آنزیم فنیل آلانین آمونیا لیز، در تولید ترکیبات فنلی نقش دارد و عملکرد فتوسنتزی و متابولیسم گیاه را ارتقا می دهد (Feduraev et al., 2020). در پژوهشی دیگر، تأثیر فنیل آلانین بر رنگیزه های فتوسنتزی مریم گلی (*Slavia officinalis*) نیز بررسی شد که نشان دهنده اثر مثبت آن بر افزایش کلروفیل بود (Rahmani Samani et al., 2019). همچنین این اسید آمینه می تواند همراه با تیروزین در مسیرهای متابولیکی وارد شده و روند تولید ترکیبات فنلی را کوتاه تر کند (Feduraev et al., 2020). در پژوهشی بر روی گیاه مریم گلی (*Salvia officinalis* L.) محلول پاشی فنیل آلانین همراه با کودهای زیستی و آبیاری مناسب، افزایش میزان اسانس را به دنبال داشت (Hassanabadi et al., 2024). Deveikyte et al. (2025) نیز نشان دادند که محلول پاشی فنیل آلانین توانسته است میزان اسانس را در گیاه ریحان افزایش دهد. همچنین کاربرد فنیل آلانین در گیاه دارویی زوفا موجب شد تا ویژگی های رشدی، رنگیزه های فتوسنتزی و همچنین مواد مؤثره این گیاه افزایش یابد (Aghaei et al., 2019). در گیاه دارویی نعنای فلفلی نیز محلول پاشی برگ با فنیل آلانین توانست موجب بهبود رشد، میزان و ترکیبات اسانس این گیاه شود (Salehi and Ebadi, 2008).

با توجه به نقش کلیدی فسفر در رشد، توسعه ریشه، تولید ترکیبات آلی و افزایش عملکرد گیاهان دارویی، فراهمی کم این عنصر در خاک یکی از عوامل محدود کننده تولید محسوب می شود. استفاده از باکتری های حل کننده فسفات می تواند با

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بستر کاشت

Table 1. Physical and chemical characteristics of the planting substrate

پتاسیم	فسفر	نیتروژن	کربن آلی	رسانایی الکتریکی	pH
Potassium (K) (mg kg ⁻¹)	Phosphorus (P) (mg kg ⁻¹)	Nitrogen(N) (mg g ⁻¹)	Organic carbon (%)	Electrical conductivity (EC, dS m ⁻¹)	
120	24.4	0.57	1.5	1.2	7.5

با ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم ثبت شد. نمونه‌ها برای تعیین وزن خشک، ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۲ درجه سلسیوس قرار گرفتند. حجم ریشه نیز با استفاده از اختلاف حجم ایجادشده پس از قراردادن ریشه در حجم مشخصی از آب و با دقت ۰/۱ میلی‌لیتر اندازه‌گیری شد (Akhavan et al., 2012).

محتوای نسبی آب برگ: برای تعیین محتوای نسبی آب برگ، پس از توزین وزن تازه برگ‌ها (FW¹), نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر قرار گرفتند و سپس وزن آماس (TW²) ثبت شد. در ادامه، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سلسیوس خشک شده و وزن خشک (DW³) اندازه‌گیری شد. درصد محتوای نسبی آب برگ (RWC) با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (Sánchez et al., 1998):

$$RWC\% = [(FW-DW)/(TW-DW)] \times 100 \quad (1)$$

رنگی‌های فتوستنتزی: برای اندازه‌گیری رنگی‌های فتوستنتزی، ۰/۲ گرم برگ کاملاً توسعه‌یافته با ۲۰ میلی‌لیتر متانول ۹۹ درصد در هاون چینی عصاره‌گیری شد و عصاره حاصل به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۴۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. جذب نوری عصاره‌ها پس از رقیق‌سازی در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۵۳ و ۶۶۶ نانومتر (A470، A653 و A666) با اسپکتروفتومتر (مدل UK Bio Quest C250 اندازه‌گیری شد. سپس غلظت رنگی‌ها فتوستنتزی با استفاده از روابط زیر محاسبه شد (Arnon, 1949):

$$Chl\ a = (15.65 \times A666) - (7.34 \times A653) \quad (2)$$

$$Chl\ b = (27.05 \times A653) - (11.21 \times A666) \quad (3)$$

$$Cx+c = (1000 \times A470 - 2.860 \times Chl\ a - 129.2 \times Chl\ b) / 245 \quad (4)$$

نشاءها با محیط کشت مایع دارای باکتری (با جمعیت تقریبی 10⁸ CFU ml⁻¹) پیش از انتقال به گلدان انجام شد. مرحله دوم تلقیح، ۱۰ روز پس از انتقال نشاءها، به منظور اطمینان از استقرار باکتری‌ها، انجام گرفت بدین صورت که به هر بوته ۵۰ میلی‌لیتر از محیط کشت مایع (۲۵۰ میلی‌لیتر برای هر گلدان) افزوده شد (Riahi et al., 2020). شرایط گلخانه‌ای شامل دمای ۲۵ ± ۲ درجه سلسیوس در روز، ۱۸ ± ۲ درجه سلسیوس در شب و رطوبت نسبی حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد بود. کلیه عملیات داشت به صورت یکسان برای تمام گیاهان انجام شد. فنیل‌آلانین به صورت محلول در آب مقطر تهیه شد و چهار بار، هر دو هفته یک بار روی برگ و ساقه گیاهان اسپری شد. اولین محلول‌پاشی سه هفته پس از انتقال نشاءها انجام شد و گیاهان شاهد تنها با آب مقطر محلول‌پاشی شدند (Tarasevičienė et al., 2021). در مرحله تمام گل، نمونه‌برداری از گیاهان برای اندازه‌گیری صفات مورد بررسی انجام شد که از زمان کاشت تا این مرحله حدود ۷۰ روز طول کشید. این صفات شامل ارتفاع گیاه، طول شاخه گل‌دهنده، وزن تازه و خشک برگ، ساقه و ریشه، طول و عرض برگ، تعداد برگ، سطح برگ، طول و حجم ریشه، قطر ساقه، محتوای نسبی آب برگ، کلروفیل a، b، کلروفیل کل، کارتنوئید و میزان اسانس بودند.

صفات رشدی: برای ارزیابی صفات رشدی، اندازه‌گیری‌ها با روش‌های استاندارد انجام شد. قطر ساقه با کولیس دیجیتال و ارتفاع بوته، طول ساقه گل‌دهنده و طول ریشه با خط‌کش تعیین گردید. سطح برگ با دستگاه سطح برگ سنج مدل LI-3100C اندازه‌گیری شد و وزن تازه برگ، ساقه و ریشه به صورت جداگانه

3- Dry weight

1- Fresh weight
2- Turgid weight

به شاهد افزایش یافتند (جدول ۴). بیشترین طول و عرض برگ به ترتیب با مقادیر ۹/۲۰ و ۳/۷۵ سانتی متر در تیمار باکتری *B. subtilis* و محلول پاشی فنیل آلانین در غلظت ۲۰۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد (جدول ۴).

علاوه بر این، تیمار ترکیبی باکتری *B. licheniformis* و فنیل آلانین با سطح ۲۰۰ میلی گرم در لیتر، بیشترین محتوای نسبی آب برگ را ایجاد کرد و این مقدار ۴۵/۶ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود (جدول ۵). در بررسی رنگی‌های فتوسنتزی، تیمار شاهد کمترین مقدار کلروفیل *a* (۱/۳۲) میلی گرم در گرم برگ تازه)، کارتنوئید (۰/۳۲۵) میلی گرم در گرم برگ تازه) و کلروفیل کل (۱/۹۵) میلی گرم در گرم برگ تازه) را نشان داد. در حالی که تیمار دارای *B. licheniformis* و محلول پاشی فنیل آلانین در غلظت ۲۰۰ میلی گرم در لیتر بیشترین مقادیر این رنگی‌ها را به ترتیب با مقادیر ۱/۹۸، ۰/۴۵۳ و ۲/۶۵ میلی گرم در گرم برگ تازه ایجاد کرد. سایر تیمارهای باکتریایی نیز در افزایش این رنگی‌ها مؤثر بودند، اما باکتری *B. megaterium* کمترین تأثیر را داشت (جدول ۵). بیشترین مقدار کلروفیل *b* نیز در تیمار *P. agglomerans* با محلول پاشی فنیل آلانین در غلظت ۲۰۰ میلی گرم در لیتر (۰/۷۷) میلی گرم در گرم برگ تازه) به دست آمد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین میزان اسانس نشان داد که کاربرد ۲۰۰ میلی گرم در لیتر فنیل آلانین بیشترین تأثیر را در افزایش این صفت داشت؛ به طوری که تیمار *P. florescens* همراه با محلول پاشی ۲۰۰ میلی گرم در لیتر فنیل آلانین، بیشترین میزان اسانس (۰/۵۶۹ درصد جرمی) را نشان داد که البته این تیمار از نظر آماری تفاوت معنی داری با تیمارهای دارای *B. licheniformis* و *R. meliloti* در سطح مشابه فنیل آلانین نداشت (شکل ۱).

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از باکتری‌های حل کننده فسفات و محلول پاشی فنیل آلانین، هر دو اثر معنی داری بر بهبود ویژگی‌های رشدی، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه مریم گلی

$$\text{Chl } t = \text{Chl } a + \text{Chl } b \quad (۵)$$

که در این روابط، *Chl a* میزان کلروفیل *a*، *Chl b* میزان کلروفیل *b*، *Cx+c* کاروتنوئید کل و *Chl t* کلروفیل کل است.

تعیین میزان اسانس: بیست و پنج گرم از نمونه خشک شده پس از آسیاب، به همراه ۶۰۰ میلی لیتر آب در دستگاه کلونجر به مدت ۳ ساعت جوشانده شد. سپس مقدار اسانس جمع آوری شده قرائت شده و به صورت درصدی از وزن خشک گیاه (حجمی - وزنی) محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل آماری: داده‌های حاصل با استفاده از نرم افزار Minitab 17 تجزیه و تحلیل شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون Tukey در سطح احتمال ۵٪ انجام گرفت. شکل‌ها با نرم افزار اکسل ۲۰۱۶ ترسیم شدند.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر برهمکنش بین باکتری‌های حل کننده فسفات و اسید آمینه فنیل آلانین بر تمامی صفات مورد بررسی در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۲ و ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین ارتفاع بوته (۸۲/۶ سانتی متر)، وزن تازه ریشه (۲۵/۷ گرم در گلدان) و وزن خشک ریشه (۵/۱ گرم در گلدان) در تیمار کاربرد باکتری *P. putida* همراه با محلول پاشی فنیل آلانین با غلظت ۲۰۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد. در مقابل، کمترین مقادیر این صفات به ترتیب برابر با ۴۱/۵ سانتی متر، ۱۴/۲ گرم در گلدان و ۲/۸ گرم در گلدان در تیمار شاهد (بدون استفاده از باکتری‌های حل کننده فسفات و فنیل آلانین) به دست آمد (جدول ۴). همچنین نتایج نشان داد که تیمار شاهد کمترین وزن تازه برگ (۲۷/۷ گرم در گلدان)، وزن خشک برگ (۶/۱ گرم در گلدان) و قطر ساقه (۰/۷ میلی متر) را نشان داد. در مقابل، تیمار دارای باکتری *B. licheniformis* به همراه محلول پاشی فنیل آلانین ۲۰۰ میلی گرم در لیتر موجب افزایش چشم گیر این صفات نسبت به شاهد شد؛ به طوری که وزن تازه برگ (۲۱۴/۶ درصد)، وزن خشک برگ (۲۱۴/۴ درصد) و قطر ساقه (۲۶۹/۳ درصد) نسبت

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر باکتری‌های حل‌کننده فسفات و محلول‌پاشی فنیل‌آلانین بر ارتفاع بوته، وزن تازه و خشک شاخساره، طول و عرض برگ، قطر ساقه و وزن تازه و خشک ریشه مریم‌گلی ترکه‌ای

Table 2. Analysis of variance of the effects of phosphate-solubilization bacteria and foliar application of L-phenylalanine on plant height, shoot fresh and dry weights, leaf length and width, stem diameter and root fresh and dry weights of meadow sage

		Mean squares (میانگین مربعات)					df	
Root dry weight	Root fresh weight	Stem diameter	Leaf width	Leaf length	Shoot dry weight	Shoot fresh weight	Plant height	
وزن خشک ریشه	وزن تازه ریشه	قطر ساقه	عرض برگ	طول برگ	وزن خشک شاخساره	وزن تازه شاخساره	ارتفاع گیاه	
1.54**	37.94**	2.06**	0.67**	4.45**	36.05**	745.03**	409.07**	
1.83**	45.11**	1.17**	0.28*	2.35**	5.69 ^{ns}	117.68 ^{ns}	14.81 ^{ns}	
0.27**	6.86**	0.75**	0.73**	1.83**	17.39**	359.52**	313.55**	
0.07	2.09	0.22	0.07	0.44	2.96	61.09	16.36	
12.97	13.05	27.48	19.62	15.88	24.58	24.59	17.92	
Coefficient of variation							ضریب تغییرات	
Error							خطا	
							60	
Phosphate-solubilizing bacteria							باکتری‌های حل‌کننده فسفات	
							9	
Phenylalanine							فنیل‌آلانین	
							2	
Phosphate-solubilizing bacteria × Phenylalanine							فنیل‌آلانین × باکتری‌های حل‌کننده فسفات	
							18	

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

** به ترتیب بیانگر آثار غیرمعنی دار و معنی دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر باکتری‌های حل‌کننده فسفات و محلول‌پاشی فنیل‌آلانین بر محتوای نسبی آب برگ (RWC)، کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، کاروتنوئید و میزان اسانس مریم‌گلی ترکه‌ای

Table 3. Analysis of variance of the effects of phosphate-solubilization bacteria and foliar application of L-phenylalanine on leaf relative water content (RWC), chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll, carotenoid and essential oil content of meadow sage

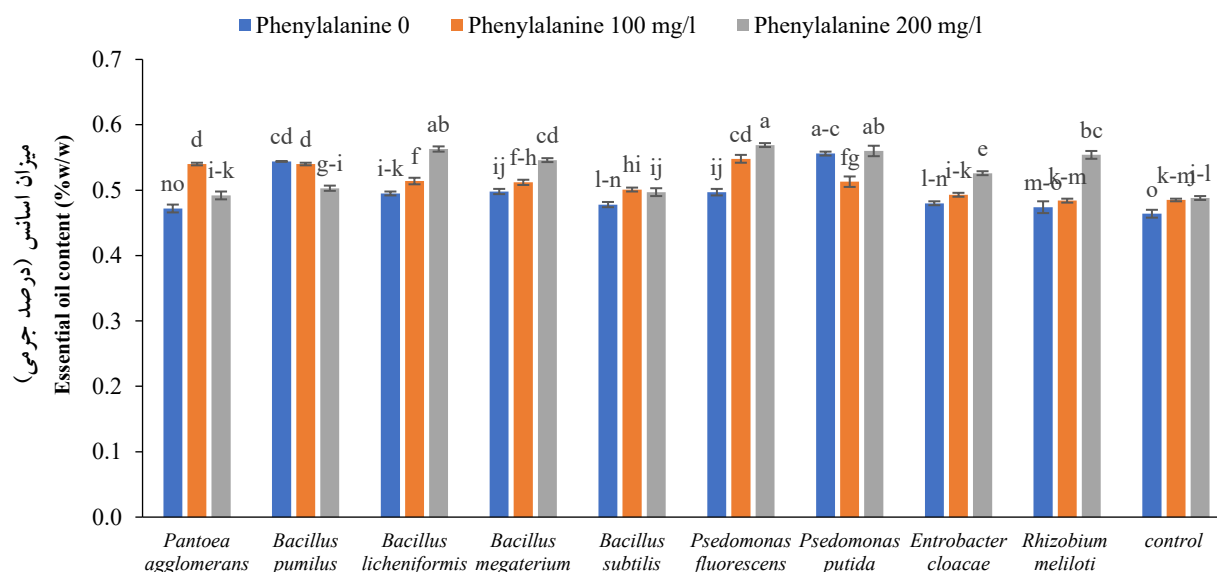
میانگین مربعات (Mean squares)						
Essential oil content میزان اسانس	Carotenoid کاروتنوئید	Total Chlorophyll کلروفیل کل	Chlorophyll b کلروفیل b	Chlorophyll a کلروفیل a	RWC محتوای نسبی آب برگ	df درجه آزادی
0.006**	0.0070**	0.13**	0.05**	0.10**	116.80**	9
0.001**	0.0008**	0.01**	0.02**	0.05**	218.37**	2
0.001**	0.0020**	0.06**	0.02**	0.04**	97.01**	18
0.00001	0.00007	0.002	0.003	0.005	34.44	60
26.74	8.78	7.03	19.36	8.76	11.18	
Coefficient of variation ضریب تغییرات						
Error خطا						
Phosphate-solubilizing bacteria باکتری‌های حل‌کننده فسفات						
Phenylalanine فنیل‌آلانین						
Phosphate-solubilizing bacteria×Phenylalanine باکتری‌های حل‌کننده فسفات × فنیل‌آلانین						

* و ** به ترتیب بیانگر آثار معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.
* and ** stand for significant effects at 5 and 1% probability levels, respectively.

Table 5. Means' comparison of the interactive effect of phosphate-solubilizing bacteria and L-phenylalanine foliar application on relative water content (RWC), chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll, carotenoid and essential oil content of meadow sage

Carotenoids (mg g ⁻¹ FW)	Total Chlorophyll (mg g ⁻¹ FW)	Chlorophyll b (mg g ⁻¹ FW)	Chlorophyll a (mg g ⁻¹ FW)	RWC (%)	Phenylalanine (mg L ⁻¹)	Phosphate-solubilizing bacteria
وزن تازه برگ	وزن تازه برگ	کلروفیل b (میلی گرم بر گرم)	کلروفیل a (میلی گرم بر گرم)	وزن تازه برگ	میلی گرم	بakterی های حل کننده فسفات
0.27±0.00 ^g	2.22±0.01 ^{gk}	0.58±0.06 ^{ef}	1.65±0.00 ^{4ef}	65.9±2.31 ^{a-d}	0	
0.391±0.0002 ^{hi}	2.26±0.0003 ^{ij}	0.61±0.008 ^{de}	1.63±0.00 ^{ef}	64.9±2.02 ^{a-d}	100	<i>Pantoea agglomerans</i>
0.368±0.007 ^{hn}	2.59±0.06 ^{ab}	0.77±0.07 ⁿ	1.81±0.08 ^{af}	72.4±1.73 ^{a-d}	200	
0.395±0.006 ^{dh}	2.28±0.05 ^{ci}	0.70±0.01 ^{ac}	1.57±0.03 ^f	67.7±0.96 ^{a-d}	0	
0.413±0.0006 ^{bd}	2.32±0.04 ^{ci}	0.62±0.01 ^{ac}	1.70±0.06 ^{cf}	67.3±2.74 ^{a-d}	100	<i>Bacillus pumilus</i>
0.425±0.007 ^{bc}	2.51±0.006 ^{ac}	0.59±0.002 ^{af}	1.92±0.004 ^{bc}	71.5±6.28 ^{a-d}	200	
0.431±0.005 ^{ab}	2.36±0.03 ^{ci}	0.66±0.07 nd	1.70±0.008 ^{cf}	71.8±3.62 ^{a-d}	0	
0.409±0.00 ^{be}	2.340±0.002 ^{bi}	0.58±0.009 ^{ef}	1.76±0.00 ^{af}	74.3±1.13 ^{a-d}	100	<i>Bacillus licheniformis</i>
0.453±0.00 ^a	2.65±0.04 ^a	0.67±0.02 nd	1.98±0.09 ^a	79.8±0.09 ^a	200	
0.406±0.005 ^{bf}	2.32±0.001 ^{di}	0.73±0.07 ^{ab}	1.59±0.008 ^{ef}	63.9±6.17 ^{a-d}	0	
0.391±0.004 ^{di}	2.21±0.04 ^{gk}	0.51±0.03 ^{cf}	1.71±0.03 ^{bf}	66.9±0.51 ^{a-d}	100	<i>Bacillus megaterium</i>
0.377±0.00 ^{em}	2.09±0.004 ^{fl}	0.47±0.04 ^{df}	1.61±0.05 ^{df}	76.2±3.26 ^{ac}	200	
0.395±0.003 ^{dh}	2.37±0.02 ^{ch}	0.49±0.006 ^{df}	1.87±0.0007 ^{bd}	67.1±3.03 ^{a-d}	0	
0.383±0.002 ^{ce}	2.40±0.0003 ^{bi}	0.48±0.007 ^{df}	1.93±0.008 ^{bc}	72.4±4.16 ^{a-d}	100	<i>Bacillus subtilis</i>
0.385±0.00 ^{dj}	2.46±0.02 ^{bd}	0.51±0.03 ^{cf}	1.98±0.01 ^a	76.9±3.05 ^{ac}	200	
0.353±0.0003 ^{am}	2.18±0.02 ^{ik}	0.44±0.03 ^{ef}	1.71±0.05 ^{bf}	60.8±7.54 ^{a-d}	0	<i>Pseudomonas fluorescens</i>
0.356±0.0007 ^{an}	2.07±0.00 ^{kl}	0.44±0.02 ^{ef}	1.66±0.09 ^{af}	63.1±1.49 ^{a-d}	100	
0.354±0.003 ^{am}	2.20±0.02 ^{bk}	0.54±0.02 ^{bf}	1.80±0.01 ^{af}	76.2±1.77 ^{ac}	200	
0.388±0.01 ^{dj}	2.19±0.01 ^{kl}	0.54±0.02 ^{bf}	1.80±0.03 ^{af}	66.8±4.86 ^{a-d}	0	
0.367±0.006 ^{an}	2.42±0.04 ^{at}	0.56±0.03 ^{bf}	1.85±0.07 ^{bd}	68.5±1.85 ^{a-d}	100	<i>Pseudomonas putida</i>
0.381±0.004 ^{fl}	2.55±0.007 ^{ab}	0.54±0.006 ^{bf}	1.95±0.06 ^{ab}	78.6±1.71 ^{ab}	200	
0.372±0.00 ^{an}	2.41±0.03 ^{bt}	0.57±0.004 ^{af}	1.84±0.007 ^{bd}	58.1±8.01 ^{cd}	0	
0.363±0.001 ^{an}	2.43±0.03 ^{be}	0.61±0.03 ^{ae}	1.81±0.04 ^{af}	69.2±0.52 ^{a-d}	100	<i>Enterobacter cloacae</i>
0.371±0.001 ^{bn}	2.38±0.0003 ^{ch}	0.61±0.04 ^{ae}	1.77±0.02 ^{bf}	75.9±2.23 ^{ac}	200	
0.402±0.0008 ^{cg}	2.42±0.01 ^{at}	0.70±0.02 ^{ac}	1.72±0.006 ^{bf}	67.9±0.77 ^{a-d}	0	
0.373±0.003 ^{bn}	2.26±0.05 ^{ij}	0.43±0.03 ^{ef}	1.83±0.04 ^{ae}	69.4±2.16 ^{a-d}	100	<i>Rhizobium meliloti</i>
0.361±0.005 ^{an}	2.19±0.03 ^{kl}	0.49±0.05 ^{bf}	1.72±0.04 ^{bf}	72.0±3.18 ^{a-d}	200	
0.325±0.005 ^o	1.95±0.03 ⁱ	0.48±0.004 ^f	1.32±0.00 ^g	54.8±0.82 ⁱ	0	
0.391±0.004 ^{di}	2.30±0.02 ^{bd}	0.48±0.03 ^{df}	1.82±0.008 ^{ae}	59.7±0.47 ^{bd}	100	Control
0.349±0.13 ^{oo}	2.06±0.00 ^{kl}	0.46±0.01 ^f	1.61±0.06 ^f	69.9±2.69 ^{bd}	200	

حروف مشابه در هر ستون به مفهوم نبود تفاوت معنی دار میانگین ها در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون توکی است. اعداد جلوی ارقام برابر خطاهای معیار (SE) است. In each column, means with similar letters are not significantly different (Tukey, P < 0.05). Numbers in front of figures are standard errors (SE).



باکتری‌های حل‌کننده فسفات
Phosphate-solubilizing bacteria

شکل ۱. اثر برهمکنش باکتری‌های حل‌کننده فسفات و محلول‌پاشی فنیل‌آلانیل بر میزان اسانس گیاه مریم‌گلی ترکیه‌ای. حروف مشابه به مفهوم نبود تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون توکی است.

Fig. 1. Interaction effect of phosphate solubilization bacteria and foliar application of L-Phenylalanine on essential oil content of meadow sage. Means with similar letters are not significantly different (Tukey, $P < 0.05$).

باکتری از راه افزایش جذب آب، سبب افزایش طول ریشه و به دنبال آن افزایش وزن تازه ریشه می‌شود که این تغییر در ساختار سیستم ریشه‌ای نیز می‌تواند بر جذب عناصر غذایی مختلف تأثیرگذار باشد.

در این پژوهش، کاربرد *B. licheniformis* بیشترین اثر را بر افزایش وزن تازه و خشک شاخساره داشت (جدول ۴) که این نتایج با پژوهش Dehghani Meshkani et al. (2011) در مورد بابونه شیرازی همسو است. گونه‌های *Bacillus* به‌ویژه *B. licheniformis* با بهبود رشد ریشه و افزایش تولید فیتوهورمون‌ها، جذب آب و عناصر غذایی را تسهیل کرده و در نهایت رشد گیاه را تقویت می‌کنند (Torfi et al., 2022). از سوی دیگر، فنیل‌آلانیل به‌عنوان پیش‌ساز ترکیبات فنلی در تحریک مسیرهای متابولیک افزایش تقسیم سلولی و رشد بافت‌های رویشی نقش دارد (Khan et al., 2019). همچنین فنیل‌آلانیل یکی از اسیدهای آمینه ضروری است که به دلیل ماهیت محلول در آب خود، به آسانی از راه ریشه و برگ گیاه جذب می‌شود. این جذب

ترکیه‌ای داشتند و ترکیب این دو عامل بیشترین تأثیر را در افزایش اغلب صفات مورد بررسی در این پژوهش گذاشتند (جدول ۲ و ۴).

بیشترین ارتفاع بوته، وزن تازه و خشک ریشه در تیمار *P. putida* همراه با محلول‌پاشی ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر فنیل‌آلانیل حاصل شد (جدول ۴). یافته‌های این پژوهش با نتایج Enayatizamir et al. (2021) در دو گونه ریحان و Karimi Sernawi et al. (2024) در نعناع‌فلفلی همخوانی دارد که تأثیر این باکتری را بر افزایش وزن خشک و طول ریشه گزارش کردند. همچنین Pazoki (2016) رشد تحریک‌شده گیاه دارویی ریحان با استفاده از این باکتری را تأیید نمود. (Khanizadeh et al., 2019) نیز در بررسی گیاه دارویی بادرنجبویه به نتایج مشابه دست یافتند. این اثرگذاری ممکن است در نتیجه تولید سایر متابولیت‌ها توسط باکتری *P. putida* باشد که سبب بهبود جذب آب و عناصر غذایی شده و بر رشد ریشه مؤثر هستند (Abdelaal et al., 2021). همچنین بر اساس گزارش Khanizadeh et al. (2019)، این

اصلی ساختار کلروفیل هستند نقش مهمی در افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی ایفا می‌کند (Park et al., 2017). از سوی دیگر، محلول‌پاشی فنیل‌آلانین در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیز بیشترین اثر را بر افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی و محتوای نسبی آب برگ داشت (جدول ۵). این یافته‌ها با نتایج گزارش شده در مورد گیاهان مورینگا (El-Bassiouny et al., 2021) و خردل (Hassanein et al., 2023) هم‌راستا بود. فنیل‌آلانین به‌عنوان پیش‌ساز اصلی مسیر فنیل‌پروپانوئیدی عمل کرده و با فعال‌سازی آنزیم فنیل‌آلانین آمونیالیاز، ترکیبات فنلی تولید می‌کند. این ترکیبات موجب پایداری غشاء کلروپلاست و حفاظت از رنگیزه‌ها در برابر تخریب اکسیداتیو می‌شوند (Feduraev et al., 2020). علاوه بر این، فنیل‌آلانین با تحریک تولید پروتئین‌های ساختاری، آنزیم‌های مرتبط با فتوسنتز و تولید کلروفیل، بازده فتوسنتزی و تجمع رنگیزه‌ها را افزایش می‌دهد (El-Bassiouny et al., 2021). همچنین این ترکیب با بهبود رشد ریشه و افزایش توان جذب آب از خاک، منجر به افزایش محتوای آب برگ می‌گردد (Khan et al., 2019).

بر اساس نتایج این پژوهش، کاربرد باکتری *P. fluorescens* موجب افزایش محتوای اسانس در گیاه مورد بررسی شد (شکل ۱). این یافته با گزارش‌های پیشین در مورد آویشن خوزستانی (Salehnia Sammak et al., 2021)، شوید (Hegazi et al., 2015) و نعناع فلفلی (Santoro et al., 2015) همخوانی دارد. یکی از سازوکارهای اصلی اثرگذاری این باکتری در افزایش میزان اسانس، ترشح ترکیبات آلی فرار مانند بنزالدئید و استات‌ها است که با تحریک بیان ژن‌های مسیر بیوسنتزی ترپنوئیدها که مؤلفه‌های اصلی اسانس هستند، موجب افزایش تولید آنها می‌گردند (Ryu et al., 2003). همچنین، *P. fluorescens* با افزایش جذب عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن و فسفر، در تقویت تولید متابولیت‌های ثانویه از جمله اسانس‌ها نقش مؤثری ایفا می‌کند (Vacheron et al., 2013). از طرفی دیگر باکتری‌های جنس سودوموناس به‌عنوان ریزجانداران محرک رشد گیاه، قادر به تولید سیدروفورها هستند؛ مولکول‌هایی با تمایل زیاد برای

آسان به دلیل حلالیت فنیل‌آلانین در آب و حرکت همراه جریان آوندهای گیاهی است و اجازه می‌دهد به سرعت در سراسر گیاه منتقل شده و در فرآیندهای متابولیک شرکت کند و نقش مثبتی در بهبود رشد گیاه و افزایش تولید رنگیزه‌های فتوسنتزی داشته باشد (Rahmani Samani et al., 2019). این امر می‌تواند علت احتمالی افزایش صفات رویشی گیاه مورد بررسی در این پژوهش باشد. Ebadi and Salehi (2024) نیز تأثیر مثبت فنیل‌آلانین را بر صفات رشدی نعنادهشتی گزارش کردند. همچنین محلول‌پاشی فنیل‌آلانین در مرزه (Poorghadir et al., 2020) و مریم‌گلی (Hasan Abadi et al., 2022) موجب بهبود رشد گیاه شد. یکی از علل احتمالی دیگر این تأثیر را می‌توان به نقش فنیل‌آلانین در افزایش محتوای پروتئین و فعال‌سازی مسیر بیوسنتز اسید جیبرلیک نسبت داد که با تحریک تقسیم، طول‌شدن و تمایز سلول‌ها، رشد گیاه را افزایش می‌دهد (Gonda et al., 2018).

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد باکتری *B. licheniformis* موجب بیشترین افزایش در محتوای نسبی آب برگ و رنگیزه‌های فتوسنتزی در گیاه مریم‌گلی ترکه‌ای شد (جدول ۵). این یافته با نتایج گزارش شده در مورد گیاهانی از جمله ذرت (Abasi et al., 2014) و گل راعی (Raj et al., 2023) همخوانی دارد. سازوکار احتمالی این تأثیر می‌تواند به توانایی این باکتری در افزایش جذب آب و عناصر غذایی مرتبط باشد. همچنین *B. licheniformis* از راه تولید هورمون‌هایی مانند اکسین، موجب تحریک رشد ریشه و افزایش سطح جذب ریشه شده و در نتیجه، محتوای نسبی آب برگ را افزایش می‌دهد (Akhtar et al., 2020). بهبود رنگیزه‌های فتوسنتزی با کاربرد این باکتری نیز پیش‌تر در گیاهانی مانند عناب (Kwon et al., 2021)، داوودی (Zhou et al., 2017)، و خردل هندی (Prakash Dube et al., 2024) گزارش شده است. این تأثیر به نقش *B. licheniformis* در افزایش ترشح اسیدهای آلی نسبت داده می‌شود که موجب افزایش جذب عناصر ریزمغذی و در نهایت بهبود تولید رنگیزه‌های فتوسنتزی می‌گردد. همچنین توانایی این باکتری در تسهیل جذب فسفر، نیتروژن و منیزیم که از اجزای

باکتری *B. licheniformis* همراه با محلول‌پاشی ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر فنیل‌آلانین مشاهده شد. همچنین کاربرد باکتری *P. fluorescens* نیز به‌تنهایی یا همراه با فنیل‌آلانین نقش مؤثری در افزایش میزان اسانس ایفا کرد. بررسی نتایج نشان داد که استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه به‌ویژه *B. licheniformis* از راه تحریک رشد ریشه، موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ و رنگیزه‌های فتوسنتزی شد. همچنین فنیل‌آلانین به‌عنوان پیش‌ساز مسیر فنیل‌پروپانوئیدی، با تأثیر بر تولید ترکیبات فنلی و آروماتیک و بهبود فعالیت فتوسنتزی، موجب افزایش رنگیزه‌ها و اسانس گیاه شد. در مجموع، کاربرد تلفیقی باکتری‌های حل‌کننده فسفات و محلول‌پاشی اسید آمینه فنیل‌آلانین، می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود صفات فیزیولوژیک و افزایش کیفیت گیاه مریم‌گلی ترکه‌ای مورد توجه قرار گیرد. با توجه به اهمیت اسانس و رنگیزه‌های فتوسنتزی در کیفیت و ارزش اقتصادی گیاهان دارویی، پیشنهاد می‌شود از ترکیب باکتری‌های *B. licheniformis* و *P. fluorescens* همراه با محلول‌پاشی فنیل‌آلانین در سطح ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر استفاده شود.

تشکر و سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول مقاله در رشته فیزیولوژی تولید و پس از برداشت گیاهان دارویی از دانشگاه فردوسی مشهد است. بدین‌وسیله نویسندگان از حمایت‌های علمی و پژوهشی دانشگاه مذکور صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

اتصال و انتقال آهن (Fe^{3+}) به محیط پیرامون خود آهن را به صورت کمپلکس محلول درمی‌آورند و فراهمی آن برای ریشه‌های گیاه را افزایش می‌دهند. این امر باعث بهبود فرآیندهای متابولیک گیاه، از جمله تولید کلروفیل و فعالیت آنزیم‌های وابسته به آهن، می‌شود و در نهایت رشد و سلامت گیاه را تقویت می‌کند و به دنبال آن موجب افزایش متابولیت‌های ثانویه در گیاه نیز می‌شوند (Klopper et al., 1980). از سوی دیگر، فنیل‌آلانین نیز در این پژوهش موجب افزایش محتوای اسانس شد. یکی از دلایل اصلی این اثر، نقش فنیل‌آلانین به‌عنوان پیش‌ساز مسیر فنیل‌پروپانوئیدی است؛ این مسیر یکی از مهم‌ترین مسیرهای تولید ترکیبات فنلی و آروماتیک در گیاهان به‌شمار می‌رود که در نهایت منجر به افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه از جمله ترپنوئیدها می‌شود (Khan et al., 2019). افزون بر این، فنیل‌آلانین با بهبود وضعیت تغذیه‌ای و فتوسنتزی گیاه، شرایط مناسبی برای تولید بیشتر متابولیت‌های ثانویه فراهم می‌سازد (Khan et al., 2019). پژوهش‌های پیشین نیز افزایش محتوای اسانس در پاسخ به کاربرد فنیل‌آلانین را در گیاهانی مانند بادرنجبویه (Baharlou et al., 2020) و مریم‌گلی (Rahmani Samani et al., 2019) گزارش کرده‌اند که تأییدی بر نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی و مقایسه اثر کاربرد انواع مختلف باکتری‌های حل‌کننده فسفات و محلول‌پاشی سطوح مختلف فنیل‌آلانین بر ویژگی‌های رشدی، رنگیزه‌های فتوسنتزی و میزان اسانس گیاه مریم‌گلی پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، b و کاروتنوئید)، محتوای نسبی آب برگ و میزان اسانس در تیمار

منابع مورد استفاده

References

1. Abasi, R., Siadat, S.A., Bakhshandeh, A., Mosavi, Y., 2014. Effect of plant growth-promoting bacteria on quantitative and qualitative yield of forage maize. *Crop Prod. Process.* 6(21), 133–145. (In Persian with English abstract)
2. Abbaspour Anbi, A., Mirshekari, B., Eivazi, A., Yarnia, M., Khalilvand Behrouzfar, E., 2019. PGPRs affected

- photosynthetic capacity and nutrient uptake in different *Salvia* species. *J. Plant Nutr.* 43(1), 108–121. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659342>.
3. Abdelaal, K.H., Alkahtani, M., Attia, K., Hafez, Y., Kiraly, L., 2021. The role of plant growth-promoting bacteria in alleviating the adverse effects of drought on plants. *Biology* 10, 2–23. <https://doi.org/10.3390/biology10060520>.
 4. Akhavan, S., Shabanpour, M., Esfahani, S., 2012. Soil compaction and texture effects on the growth of roots and shoots of wheat. *Water Soil.* 26(3), 727–735. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.14941>. (In Persian with English abstract)
 5. Akhtar, S.S., Buchvaldt Amby, D., Hegelund, J.N., Fimognari, L., Muller, R., Roitsch, T., 2020. *Bacillus licheniformis* FMCH001 increases water use efficiency via growth stimulation in both normal and drought conditions. *Front. Plant Sci.* 11, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00297>.
 6. Arnon, D.I., 1949. Copper enzymes in isolated chloroplast. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.* 24, 1–15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>.
 7. Baharlou, M., Ghasemi Pirbalouti, A., Malekpoor, F., 2020. Effect of different concentrations of L-phenylalanine on chemical compositions and yield of essential oil of lemon balm (*Melissa officinalis*). *J. Herb Med.* 10(4), 183–191. (In Persian with English abstract)
 8. Ben Akacha, B., Kačániová, M., Generalić, I., Kukula-Koch, W., Koch, W., Erdogan, I., Taglieri, I., Venturi, F., Taieb Bouteraa, M., 2024. Sage (*Salvia officinalis* L.): A botanical marvel with versatile pharmacological properties and sustainable applications in functional foods. *S. Afr. J. Bot.* 169, 361–382. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.04.044>.
 9. Dehghani Meshkani, M., Naghdi Badi, H., Darrehi, M. T., Mehrafrin, A., Rezazadeh, S., Kadkhoda, Z., 2011. The effect of bio and chemical fertilizers on the quantitative and qualitative yield of Shiraz chamomile (*Matricaria recutita* L.). *J. Med. Plants.* 10(2), 35–48. (In Persian with English abstract)
 10. Deveikyte, J., Blinstrubienė, A., Burbulis, N., Baltušnikienė, A., 2025. Foliar application of amino acids increases sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) resistance to high-temperature stress. *Plants* 14(5), 739. <https://doi.org/10.3390/plants14050739>.
 11. Enayatizamir, N., Mahmoodi Sourestani, M., Momeni Monfared, M., 2021. The impact of *Pseudomonas putida* and chemical phosphorus fertilizer on some vegetative, reproductive and biochemical characteristics of two species of basil (*O. sanctum* L. and *O. basilicum* var. thyriflora). *Plant Product.* 44(2), 235–246. <https://doi.org/10.22055/ppd.2020.31636.1844>. (In Persian with English abstract)
 12. Esmaceli, G., Fatemi, H., Baghani Avval, M., Azizi, M., Arouiee, H., Vaezi, J., Fujii, Y., 2022. Diversity of chemical composition and morphological traits of eight Iranian wild *Salvia* species during the first step of domestication. *Agronomy.* 12(10), 2455. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102455>.
 13. Feduraev, P., Skrypnik, L., Riabova, A., Pungin, A., Tokupova, E., Maslennikov, P., Chupakhina, G., 2020. Phenylalanine and tyrosine as exogenous precursors of wheat (*Triticum aestivum* L.) secondary metabolism through PAL-associated pathways. *Plants.* 9(476), 2–19. <https://doi.org/10.3390/plants9040476>.
 14. Galileya Medison, R., Jiang, J., Medison, M. B., Tan, L.T., Kayange, C., Sun, Z., Zhou, Y., 2023. Evaluating the potential of *Bacillus licheniformis* YZCUO202005 isolated from lichens in maize growth promotion and biocontrol. *Heliyon* 9(10), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20204>.
 15. Hegazi, M.A., Salem, M., Belal, M., 2015. Influence of plant growth-promoting bacteria (PGPR) on coriander (*Coriandrum sativum* L.) and dill (*Anethum graveolens* L.) plants. *J. Plant Prod.* 6(2), 205–218. <https://doi.org/10.21608/jpp.2015.49299>.
 16. Karimi Sernawi, M., Rezaei Nejad, A., Mousavi-Fard, S., Mirzai Najafgholi, H., Beiranvand, F., 2024. Effect of growth promoting bacteria *Pseudomonas putida* and *Curtobacterium* sp. strain WLU on the growth and essential oil of peppermint plants (*Mentha piperita* L.) under water deficit stress conditions. *Plant Process. Funct.* 13(63), 24. <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-2014-fa.html>. (In Persian with English abstract)
 17. Khan, S., Yu, H., Li, Q., Gao, Y., Sallam, B. N., Wang, H., Liu, P., Jiang, W., 2019. Exogenous application of amino acids improves the growth and yield of lettuce by enhancing photosynthetic assimilation and nutrient availability. *Agronomy* 9(5), 266. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050266>.
 18. Khatoon, Z., Huang, S., Rafique, M., Fakhar, A., Kamran, M. A., Santoyo, G., 2020. Unlocking the potential of plant growth-promoting rhizobacteria on soil health and the sustainability of agricultural systems. *J. Environ. Manage.* 273, 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111118>.
 19. Khanizadeh, P., Hatami, M., Abtahi, F. S., Hosseini, N., 2019. Stimulatory effect of *Pseudomonas fluorescens* and *P. putida* bacteria on germination features and growth of lemon balm (*Melissa officinalis*). *J. Plant Res.* 32(3), 558–569. 20.1001.1.23832592.1398.32.3.18.5. (In Persian with English abstract)
 20. Kloepper, J.W., Leong, J., Teintze, M., Schhroth, M.N., 1980. Enhanced plant growth by siderophores produced by plant growth-promoting rhizobacteria. *Nature* 286(5776), 885–886. <https://doi.org/10.1038/286885a0>.
 21. Kwon, J.H., Won, S.J., Moon, J.H., Lee, U., Park, Y.S., Ahn, Y.S., 2021. *Bacillus licheniformis* PR2 controls fungal diseases and increases production of jujube fruit under field conditions. *Horticulturae* 7(3), 49. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030049>.

22. Naghdi Badi, H., Labbafi, M.R., Qavami, N., Qaderi, A., Abdossi, V., Agharebparast, M.R., Mehrafarin, A., 2014. Responses of quality and quantity yield of Garden Thyme (*Thymus vulgaris* L.) to foliar application of bio-stimulator based on amino acids and methanol. *J. Med. Plants*. 14(2), 146–158. <https://Sid.ir/paper/15817/en>. (In Persian with English abstract)
23. Oteino, N.D., Lally, R., Kiwanuka, S., Ryan, D., Dowling, D.N., 2015. Plant growth promoting induced by phosphate solubilizing endophytic *Pseudomonas* isolates. *Frontiers*. 22(6), 745. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00745>.
24. Park, H.G., Lee, Y.S., Kim, K.Y., Park, Y.S., Han, T.H., Park, C.M., Ahn, Y.S., 2017. Inoculation with *Bacillus licheniformis* MH48 promotes nutrient uptake in seedlings of the ornamental plant *Camellia japonica* grown in Korean reclaimed coastal lands. *Hortic Sci*. 28, 11–20. <https://doi.org/10.12972/kjst.20170002>.
25. Pazoki, A.R., 2016. Effects of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and humic acid on yield and components of Basil (*Ocimum basilicum* L.) under drought stress in Qom region. *J. Agroecol*. 6(1), 60–80.
26. Prakash Dube, S., Dey, R., Devi, S., Raghuwanshi, R., 2024. Seed quality, chlorophyll and carotene content in *Brassica juncea* L. leaves at two growth stages in response to rhizospheric bacteria. *Curr. Agric. Res. J.* 12(2), 820–835. <http://dx.doi.org/10.12944/CARJ.12.2.25>.
27. Poorghadir, M., Mohammadi Torkashvand, A., Mirjalili, S.A. Moradi, P., 2020. Interactions of amino acids (proline and phenylalanine) and biostimulants (salicylic acid and chitosan) on the growth and essential oil components of savory (*Satureja hortensis* L.). *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101815>.
28. Rahmani Samani, M., Ghasemi Pirbalouti, A., Moattar, F., Golparvar, A.R., 2019. L-Phenylalanine and bio-fertilizers interaction effects on growth, yield and chemical compositions and content of essential oil from the sage (*Salvia officinalis* L.) leaves. *Ind. Crops Prod.* 137, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.019>.
29. Raj, Y., Kumar, A., Kumari, S., Kumar, R., 2023. Comparative genomics and physiological investigations supported multifaceted plant growth-promoting activities in two *Hypericum perforatum* L.-associated plant growth-promoting rhizobacteria for microbe-assisted cultivation. *Microbiol. Spectr.* 11(3), 1–19. <https://doi.org/10.1128/spectrum.00607-23>.
30. Reham, M.S., Khatlab, M.E., Ahmed, S.S., Kandil, M.A.M., 2016. Influence of foliar spray with phenylalanine and nickel on growth, yield, quality, and chemical composition of Genovese basil plant. *J. Agric. Res.* 11(16), 1398–1410. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.10699>.
31. Riahi, L., Cherif, H., Miladi, S., Neifar, M., Bejaoui, B., Chouchane, H., Slaheddine Masmoudi, A., Cherif, A., 2020. Use of plant growth promoting bacteria as an efficient biotechnological tool to enhance the biomass and secondary metabolites production of the industrial crop *Pelargonium graveolens* L'Hér. under semi-controlled conditions. *Ind. Crops Prod.* 154, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112721>.
32. Richardson, A.E., 2001. Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. *Funct. Plant Biol.* 28(9), 897–906. <https://doi.org/10.1071/PP01072>.
33. Rostamikia, Y., Rahmani, A., Teimouri, M., 2024. The effect of inoculation of growth-stimulating bacteria on some leaf growth traits and nutritional elements of hazelnut seedlings under field conditions. *J. Soil Plant Intract.* 15(1), 1–15. (In Persian with English abstract)
34. Salehi, M.K., Ebadi, M.T., 2024. Effects of L-phenylalanine or L-tyrosine foliar application on growth characteristics, yield, and essential oil of spearmint. *Iran. J. Hort Sci.* 56(1), 81–101. <https://doi.org/10.22059/ijhs.2024.371335.2149>. (In Persian with English abstract)
35. Salehnia Sammak, A., Anvari, M., Matinizadeh, M., Mirza, M., 2021. Evaluation of inoculation *Pseudomonas fluorescens* and arbuscular mycorrhizal fungus on growth, morphological characteristics and essential oil percentage of *Thymus kotschyanus*. *J. Med. Plant Byprod.* 11(2), 181–189. [10.22092/jmpb.2021.352625.1298](https://doi.org/10.22092/jmpb.2021.352625.1298).
36. Sánchez, F.J., Manzanares, M., de Andres, E.F., Tenorio, J.L. Ayerbe, L., 1998. Turgor maintenance, osmotic adjustment and soluble sugar and proline accumulation in 49 pea cultivars in response to water stress. *Field Crops Res.* 59(3), 225–235. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00125-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00125-7).
37. Santoro, M.V., Cappellari, L.R., Giordano, W., Banchio, E., 2015. Plant growth-promoting effects of native *Pseudomonas* strains on *Mentha piperita* (peppermint): an in vitro study. *Plant Biol.* 17(6), 18–26. <https://doi.org/10.1111/plb.12351>.
38. Seif Sahandi, M., Mehrafarin, A., Naghdi Badi, H., Khalighi-Sigaroodi, F., Sharifi, M., 2019. Improving growth, phytochemical, and antioxidant characteristics of peppermint by phosphate-solubilizing bacteria along with reducing phosphorus fertilizer use. *Ind. Crops Prod.* 141, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111777>.
39. Shahhoseini, R., Hossaini, S.M., Nikjouyan, M.J., 2024. Investigation of the growth and phytochemical variations for different *Salvia* species in terms of their transfer and adaptation in Iran. *J. Appl. Res. Med. Aromat. Plants.* <https://doi.org/10.1016/j.jarmp.2023.100526>.
40. Taraseviciene, Z., Velicka, A., Paulauskiene, A., 2021. Impact of foliar application of amino acids on total phenols, phenolic acids content of different mints varieties under the field condition. *Plants*. 10, 20–16. <https://doi.org/10.3390/plants10030599>.

41. Torfī, V., Danesh Shahraki, A., Ghobadinea, M., Saeidi, K., 2022. Effect of water deficit stress and separate, dual and triple combined inoculation of some growth promoting bacteria on agromorphological traits of Lemon balm. *Environ. Stress. Crop Sci.* 16(2), 487–500. <http://dx.doi.org/10.22077/escs.2023.4769.2066>. (In Persian with English abstract)
42. Walpola, B.C., Yoon, M., 2012. Prospectus of phosphate solubilizing microorganisms and phosphorus availability in agricultural soils: a review. *Afr. J. Microbiol. Res.* 6, 6600–6605. <http://dx.doi.org/10.5897/AJMR12.889>.
43. Wei, Y., Zhao, Y., Shi, M., Cao, Z., Lu, Q., Yang, T., Fan, Y., Wei, Z., 2018. Effect of organic acids production and bacterial community on the possible mechanism of phosphorus solubilization during composting with enriched phosphate-solubilizing bacteria inoculation. *Bioresour. Technol.* 247, 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.092>.
44. Yazdanpanahi, F., Sanikhani, M., Kheiry, A., Rabbi Angourani, H., 2024. Effect of phenylalanine and gamma-aminobutyric acids on morphophysiological characteristics of *Dracocephalum moldavica* L. under salinity stress. *Plant Process. Function.* 13(62), 33–50. <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-2025-en.html>. (In Persian with English abstract)
45. Zhou, C., Chu, L., Xie, Y., Li, F., Xiao, X., Ma, Z., Wang, J., 2017. *Bacillus licheniformis* SA03 confers increased saline–alkaline tolerance in chrysanthemum plants by induction of abscisic acid accumulation. *Front. Plant Sci.* 29(8), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01143>.