J. Soil Plant Interact. 2025; 16(4): 1–16. https://doi.org/10.47176/jspi.16.4.21661

**Journal of Soil and Plant Interactions**

Journal homepage: https://jspi.iut.ac.ir/

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Research Article

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

**Sara Farsaraei[1], Mohammad Moghaddam[1]*, Hossein Nemati[1] and Mohammad Mahmoodi Sarvestani[2]**

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.moghadam@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

Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

روابط خاک و گیاه ۱۴۰۴؛ (۴)۱۶: ۱۶-۱، https://doi.org/10.47176/jspi.16.4.21661

روابط خاک و گیاه

صفحه خانگی فصلنامه: https://jspi.iut.ac.ir/

شاپا: ۲۷۸۳-۵۰۱۴ شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۵۲۸۶

مقاله پژوهشی

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

**سارا فرسرائی[۱]، محمد مقدم[۱*]، حسین نعمتی[۱] و محمد محمودی سروستانی[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 فنیل‌آلانین تأثیر مثبتی بر مسیرهای متابولیکی گیاه دارد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر باکتری‌های حل‌کننده فسفات و محلول‌پاشی فنیل‌آلانین بر برخی ویژگی‌های رشدی، رنگیزه‌های فتوسنتزی و میزان اسانس گیاه مریم‌گلی ترکه‌ای (*Salvia virgata* Jacq.) در شرایط گلخانه‌ای انجام شد.

**روش‌ها:** پژوهش حاضر به‌صورت 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 فنیل‌آلانین (۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) در چهار تکرار بود.

**نتایج:** نتایج نشان داد که اثر برهمکنش باکتری‌ها و فنیل‌آلانین 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 فنیل‌آلانین در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر حاصل شد. همچنین کاربرد باکتری *B. licheniformis* و محلول‌پاشی فنیل‌آلانین 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 فنیل‌آلانین) شد. بیشترین میزان اسانس (۰/۵۷ درصد جرمی) نیز در تیمار *P. fluorescens* و محلول‌پاشی فنیل‌آلانین 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 فنیل‌آلانین 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، *Bacillus licheniformis*، *Pseudomonas fluorescens*.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

**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 به‌دلیل 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 به‌دلیل خواص ضدمیکروبی، 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 این‌حال، فسفر موجود در خاک‌های کشاورزی عمدتاً به‌صورت 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). ازاین‌رو، تأمین فسفر مورد نیاز گیاهان معمولاً از راه کاربرد کودهای شیمیایی فسفره انجام می‌شود. با این حال، مصرف بی‌رویه این کودها نه‌تنها 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 *Bacillus*، *Pseudomonas*، *Enterobacter*، *Pantoea*، *Rhizobacter* 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 فسفری نامحلول را به شکل قابل جذب تبدیل کرده و جذب فسفر را برای گیاه تسهیل می‌کنند (Khatoon et al., 2020). پژوهش‌های متعددی اثر مثبت این باکتری‌های حل‌کننده فسفات را بر گیاهان دارویی گزارش کرده‌اند. در پژوهشی گزارش شد که تلقیح گیاه نعناع‌فلفلی 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.

فنیل‌آلانین یکی از اسیدهای آمینه معطر بوده که به عنوان پیش‌ساز اصلی در بیوسنتز ترکیبات فنلی و فلاونوئیدها شناخته می‌شود. این اسید آمینه نه تنها پیش‌ساز ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی است، بلکه می‌تواند بر بهبود صفات رشدی و میزان اسانس گیاهان دارویی نیز مؤثر باشد (Khan et al., 2019). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که محلول‌پاشی فنیل‌آلانین در گیاهانی مانند بادرشبویه (Yazdanpanahi et al., 2024)، ریحان (Reham et al., 2016) و آویشن باغی (Naghdi Badi et al., 2014)، باعث بهبود صفات رشدی، افزایش کلروفیل و میزان اسانس شده است. فنیل‌آلانین از راه مسیر آنزیم فنیل‌آلانین آمونیالیاز، در تولید ترکیبات فنلی نقش دارد و عملکرد فتوسنتزی و متابولیسم گیاه را ارتقا می‌دهد (Feduraev et al., 2020). در پژوهشی دیگر، تأثیر فنیل‌آلانین بر رنگیزه‌های فتوسنتزی مریم‌گلی (*Slavia officinalis*) نیز بررسی شد که نشان‌دهنده اثر مثبت آن بر افزایش کلروفیل بود (Rahmani Samani et at., 2019). همچنین این اسید آمینه می‌تواند همراه با تیروزین در مسیرهای متابولیکی وارد شده و روند تولید ترکیبات فنلی را کوتاه‌تر کند (Feduraev et al., 2020). در پژوهشی بر روی گیاه مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.)، محلول‌پاشی فنیل‌آلانین همراه با کودهای زیستی و آبیاری مناسب، افزایش میزان اسانس را به‌دنبال داشت (Hassanabadi et al., 2024). Deveikyte et al. (2025) نیز نشان دادند که محلول‌پاشی فنیل‌آلانین توانسته است میزان اسانس را در گیاه ریحان افزایش دهد. همچنین کاربرد فنیل‌آلانین در گیاه دارویی زوفا موجب شد تا ویژگی‌های رشدی، رنگیزه‌های فتوسنتزی و همچنین مواد مؤثره این گیاه افزایش یابد (Aghaei et al., 2019). در گیاه دارویی نعناع فلفلی نیز محلول‌پاشی برگی با فنیل‌آلانین 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 محدودکننده تولید محسوب می‌شود. استفاده از باکتری‌های حل‌کننده فسفات می‌تواند با افزایش فراهمی فسفر، رشد و کارایی فیزیولوژیک گیاه را بهبود بخشد. از سوی دیگر، اسید آمینه فنیل‌آلانین به‌عنوان پیش‌ماده مسیر فنیل‌پروپانوئید نقش مهمی در القای تولید اسانس‌های معطر دارد. تاکنون پژوهش‌های اندکی اثر هم‌زمان این دو عامل زیستی را بر رشد، رنگیزه‌های فتوسنتزی و ترکیبات ثانویه گیاه مریم‌گلی ترکه‌ای بررسی کرده‌اند. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف تبیین آثار هم‌افزایی کاربرد باکتری‌های حل‌کننده فسفات و محلول‌پاشی فنیل‌آلانین بر ویژگی‌های مورفولوژیک، رنگیزه‌های فتوسنتزی و میزان اسانس این گیاه دارویی ارزشمند انجام شد.

## مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به‌صورت 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 حل‌کننده فسفات:

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

و فاکتور دوم محلول‌پاشی با اسید آمینه فنیل‌آلانین با سه غلظت (۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) بود. تیمارهای مختلف به‌صورت ترکیبی اعمال شدند تا آثار همزمان باکتری‌ها و فنیل‌آلانین بر ویژگی‌های مورفولوژیک، رنگیزه‌های فتوسنتزی و میزان اسانس گیاه مریم‌گلی ترکه‌ای (*Salvia virgata* Jacq.) مورد بررسی قرار گیرد.

برای اجرای آزمایش، بذرهای 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 سانتی‌متر) دارای مخلوط خاک باغچه، ماسه و خاک‌برگ به نسبت ۲:۱:۱ منتقل شدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بستر کاشت در جدول ۱ آورده شده است. به‌منظور اعمال تیمار باکتری، مایه تلقیح باکتری‌ها از مرکز تحقیقات آب و خاک تهران بخش بیولوژی خاک تهیه شد و سپس تلقیح ریشه

**جدول ۱.** ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بستر کاشت

**Table 1.** Physical and chemical characteristics of the planting substrate

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

نشاءها با محیط کشت مایع دارای باکتری (با جمعیت تقریبی $10^8$ $CFU\ ml^{-1}$) پیش از انتقال به گلدان انجام شد. مرحله دوم تلقیح، ۱۰ روز پس از انتقال نشاءها، به‌منظور 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 ۲± ۲۵ درجه سلسیوس در روز، ۲± ۱۸ درجه سلسیوس در شب و رطوبت نسبی حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد بود. کلیه عملیات داشت به‌صورت یکسان برای تمام گیاهان انجام شد. فنیل‌آلانین به‌صورت 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 (Tarasevi˘ciene 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 به‌صورت جداگانه 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 ($FW^1$)، نمونه‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر قرار گرفتند و سپس وزن آماس ($TW^2$) ثبت شد. در ادامه، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سلسیوس خشک شده و وزن خشک ($DW^3$) اندازه‌گیری شد. درصد محتوای نسبی آب برگ (RWC) با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (Sánchez et al., 1998):

$$RWC\% = [(FW-DW)/(TW-DW)]\times 100 \quad (۱)$$

رنگیزه‌های فتوسنتزی: برای اندازه‌گیری رنگیزه‌های فتوسنتزی، 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 موج های ۴۷۰، ۶۵۳ و ۶۶۶ نانومتر (A470، A653 و A666) با اسپکتروفتومتر (مدل UK Bio Quest C250) اندازه‌گیری شد. سپس غلظت رنگیزه‌ها فتوسنتزی با استفاده از روابط زیر محاسبه شد (Arnon, 1949):

$$Chl\ a = (15.65\times A666) - (7.34\times A653) \quad (۲)$$

$$Chl\ b = (27.05\times A653) - (11.21\times A666) \quad (۳)$$

$$Cx+c = (1000\times A470 - 2.860\times Chl\ a - 129.2\times Chl\ b)/245 \quad (۴)$$

1- Fresh weight
2- Turgid weight
3- Dry weight

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

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 خشک‌شده پس از آسیاب، به همراه ۶۰۰ میلی‌لیتر آب در دستگاه کلونجر به مدت ۳ ساعت جوشانده شد. سپس مقدار اسانس جمع‌آوری‌شده قرائت شده و به‌صورت درصدی از وزن خشک گیاه (حجمی-وزنی) محاسبه شد.

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

## نتایج

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر برهمکنش بین باکتری‌های حل‌کننده فسفات و اسید آمینه فنیل‌آلانین بر تمامی صفات مورد بررسی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جداول ۲ و ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین ارتفاع بوته (۸۲/۶ سانتی‌متر)، 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 محلول‌پاشی فنیل‌آلانین با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. در مقابل، کمترین مقادیر این صفات به‌ترتیب برابر با ۴۱/۵ سانتی‌متر، ۱۴/۲ گرم در گلدان و ۲/۸ گرم در گلدان در تیمار شاهد (بدون استفاده از باکتری‌های حل‌کننده فسفات و فنیل‌آلانین) بدست 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 میلی‌متر) را نشان داد. در مقابل، تیمار دارای باکتری *B. licheniformis* به همراه محلول‌پاشی فنیل‌آلانین ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر موجب افزایش چشم‌گیر این صفات نسبت به شاهد شد؛ به‌طوری که وزن تازه برگ (۲۱۴/۶ درصد)، وزن خشک برگ (۲۱۴/۴ درصد) و قطر ساقه (۲۶۹/۳ درصد) نسبت به شاهد افزایش یافتند (جدول ۴). بیشترین طول و عرض برگ به‌ترتیب با مقادیر ۹/۲۰ و ۳/۷۵ سانتی‌متر در تیمار باکتری *B. subtilis* و محلول‌پاشی فنیل‌آلانین در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد (جدول ۴).

علاوه بر این، تیمار ترکیبی باکتری *B. licheniformis* و فنیل‌آلانین با سطح ۲۰۰ میلی‌گرم 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 رنگیزه‌های فتوسنتزی، تیمار شاهد کمترین مقدار کلروفیل a (۱/۳۲ میلی‌گرم در گرم برگ تازه)، کارتنوئید (۰/۳۲۵ میلی‌گرم در گرم برگ تازه) و کلروفیل کل (۱/۹۵ میلی‌گرم در گرم برگ تازه) را نشان داد. درحالی‌که تیمار دارای *B. licheniformis* و محلول‌پاشی فنیل‌آلانین در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر بیشترین مقادیر این رنگیزه‌ها را به‌ترتیب با مقادیر ۱/۹۸، ۰/۴۵۳ و ۲/۶۵ میلی‌گرم در گرم برگ تازه ایجاد کرد. سایر تیمارهای باکتریایی نیز در افزایش این رنگیزه‌ها مؤثر بودند، اما باکتری *B. megaterium* کمترین تأثیر را داشت (جدول ۵). بیشترین مقدار کلروفیل b نیز در تیمار *P. agglomerans* با محلول‌پاشی فنیل‌آلانین در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر (۰/۷۷ میلی‌گرم در گرم برگ تازه) به‌دست آمد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین میزان اسانس نشان داد که کاربرد ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر فنیل‌آلانین بیشترین تأثیر را در افزایش این صفت داشت؛ به‌طوری‌که تیمار *P. florescens* همراه با محلول‌پاشی ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر فنیل‌آلانین، بیشترین میزان اسانس (۰/۵۶۹ درصد جرمی) را نشان داد که البته این تیمار از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با تیمارهای دارای *B. licheniformis*، *P. putid* و *R. meliloti* در سطح مشابه فنیل‌آلانین نداشت (شکل ۱).

## بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از باکتری‌های حل‌کننده فسفات و محلول‌پاشی فنیل‌آلانین، هر دو اثر معنی‌داری بر بهبود ویژگی‌های رشدی، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه مریم‌گلی

**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 rood fresh and dry weights of meadow sage

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

ns، * و ** به‌ترتیب بیانگر آثار غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

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

**جدول ۳.** تجزیه واریانس اثر باکتری‌های حل‌کننده فسفات و محلول‌پاشی فنیل‌آلانین بر محتوای نسبی آب برگ (RWC)، کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، کارتنوئید 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

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

* و ** به‌ترتیب بیانگر آثار معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

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

**جدول ۴.** مقایسه میانگین اثر برهمکنش 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 4.** Means' comparison of the interactive effect of phosphate-solubilizing bacteria and L-phenylalanine foliar application on plant height, shoot fresh and dry weights, leaf length and width, stem diameter and rood fresh and dry weights of meadow sage

| Root dry weight (g pot$^{-1}$) وزن خشک ریشه (گرم در گلدان) | Root fresh weight (g pot$^{-1}$) وزن تازه ریشه (گرم در گلدان) | Stem diameter (mm) قطر ساقه (میلی‌متر) | Leaf width (cm) عرض برگ (سانتی‌متر) | Leaf length (cm) طول برگ (سانتی‌متر) | Shoot dry weight(g pot$^{-1}$) وزن خشک شاخساره (گرم در گلدان) | Shoot fresh weight (g pot$^{-1}$) وزن تازه شاخساره (گرم در گلدان) | Plant height (cm) ارتفاع گیاه (سانتی‌متر) | Phenylalanine (mg L$^{-1}$) فنیل‌آلانین (میلی‌گرم در لیتر) | Phosphate-solubilizing bacteria باکتری‌های حل‌کننده فسفات |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3.94±0.14$^{c-e}$ | 19.7±0.72$^{c-e}$ | 1.75±0.17$^{ab}$ | 2.45±0.14$^{d-f}$ | 7.75±0.14$^{a-d}$ | 10.72±0.73$^{b-f}$ | 43.5±7.51$^{d-f}$ | 49.3±2.03$^{g-j}$ | 0 | |
| 4.09±0.10$^{b-e}$ | 20.4±0.53$^{b-e}$ | 2.19±0.02$^{ab}$ | 2.85±0.08$^{a-e}$ | 6.75±0.14$^{b-e}$ | 12.73±0.47$^{b-e}$ | 48.7±3.32$^{b-f}$ | 51.0±2.89$^{g-j}$ | 100 | *Pantoea agglomerans* |
| 4.58±0.18$^{z-d}$ | 22.9±0.89$^{a-d}$ | 2.18±0.07$^{ab}$ | 2.80±0.11$^{b-f}$ | 7.00±0.00$^{a-d}$ | 14.46±0.001$^{a-d}$ | 51.7±1.30$^{b-f}$ | 50.5±3.18$^{g-j}$ | 200 | |
| 4.03±0.19$^{c-e}$ | 20.2±0.95$^{c-e}$ | 2.25±0.26$^{ab}$ | 3.43±0.01$^{a-c}$ | 7.25±0.14$^{a-d}$ | 12.32±1.84$^{b-e}$ | 56.0±8.37$^{b-e}$ | 73.5±0.00$^{a-c}$ | 0 | |
| 4.16±0.17$^{b-e}$ | 20.1±0.85$^{b-e}$ | 1.91±0.01$^{ab}$ | 2.05±0.03$^{ef}$ | 6.60±0.23$^{b-e}$ | 15.01±0.41$^{a-d}$ | 68.2±1.88$^{a-d}$ | 51.5±1.44$^{g-j}$ | 100 | *Bacillus pumilus* |
| 4.57±0.14$^{a-d}$ | 22.8±0.73$^{a-d}$ | 2.50±0.17$^{ab}$ | 2.15±0.20$^{ef}$ | 6.75±0.43$^{b-e}$ | 13.53±0.06$^{a-e}$ | 61.5±0.29$^{a-e}$ | 56.5±1.44$^{e-i}$ | 200 | |
| 4.24±0.20$^{a-e}$ | 21.2±0.98$^{a-e}$ | 1.41±0.09$^{a-c}$ | 2.70±0.17$^{b-f}$ | 7.75±0.43$^{a-d}$ | 12.65±1.27$^{b-e}$ | 57.5±5.77$^{b-e}$ | 61.0±1.00$^{c-h}$ | 0 | |
| 4.79±0.07$^{a-c}$ | 23.9±0.38$^{a-c}$ | 1.67±0.31$^{ab}$ | 2.25±0.00$^{ef}$ | 5.75±0.43$^{de}$ | 16.11±1.81$^{ab}$ | 73.2±8.23$^{ab}$ | 48.3±1.45$^{h-j}$ | 100 | *Bacillus licheniformis* |
| 4.06±0.10$^{b-e}$ | 20.3±0.52$^{b-e}$ | 2.77±0.59$^{a}$ | 2.40±0.34$^{ef}$ | 6.50±0.29$^{b-e}$ | 19.19±0.41$^{a}$ | 87.2±1.88$^{a}$ | 70.0±1.15$^{a-e}$ | 200 | |
| 4.22±0.23$^{a-e}$ | 21.1±1.14$^{a-e}$ | 2.55±0.63$^{ab}$ | 2.95±0.00$^{a-e}$ | 8.35±0.00$^{a-c}$ | 11.11±1.97$^{b-f}$ | 50.5±8.95$^{-f}$ | 65.5±2.60$^{-f}$ | 0 | |
| 4.13±0.16$^{b-e}$ | 20.6±0.80$^{b-e}$ | 1.50±0.003$^{a-c}$ | 2.25±0.03$^{ef}$ | 6.85±0.08$^{b-e}$ | 10.94±0.60$^{b-f}$ | 49.7±2.74$^{b-f}$ | 59.6±2.73$^{d-h}$ | 100 | *Bacillus megaterium* |
| 4.74±0.20$^{a-d}$ | 23.7±1.03$^{a-d}$ | 2.25±0.13$^{ab}$ | 2.65±0.20$^{c-f}$ | 7.25±0.00$^{a-d}$ | 14.68±1.05$^{a-d}$ | 66.7±4.76$^{a-d}$ | 59.5±3.75$^{d-h}$ | 200 | |
| 4.34±0.28$^{a-e}$ | 21.7±1.40$^{a-e}$ | 1.32±0.001$^{a-c}$ | 2.30±0.29$^{ef}$ | 6.85±0.84$^{b-e}$ | 9.68±0.44$^{d-f}$ | 44.0±2.02$^{d-f}$ | 62.6±4.26$^{c-g}$ | 0 | |
| 4.32±0.11$^{a-e}$ | 21.6±0.54$^{a-e}$ | 2.54±0.29$^{ab}$ | 3.45±0.00$^{a-c}$ | 8.50±0.00$^{ab}$ | 10.94±1.17$^{b-f}$ | 49.7±5.34$^{b-f}$ | 68.3±0.33$^{b-e}$ | 100 | *Bacillus subtilis* |
| 4.73±0.17$^{a-d}$ | 23.6±0.84$^{a-d}$ | 2.61±0.10$^{a}$ | 3.75±0.00$^{a}$ | 9.20±0.81$^{a}$ | 11.99±1.59$^{b-e}$ | 54.5±7.22$^{b-e}$ | 61.0±1.15$^{c-h}$ | 200 | |
| 3.82±0.07$^{d-f}$ | 19.1±0.37$^{d-f}$ | 1.95±0.005$^{ab}$ | 2.60±0.23$^{c-f}$ | 5.90±0.17$^{de}$ | 15.62±1.21$^{a-c}$ | 71.0±5.48$^{a-c}$ | 59.0±1.73$^{d-h}$ | 0 | |
| 4.98±0.08$^{ab}$ | 24.9±0.44$^{ab}$ | 2.51±0.12$^{ab}$ | 3.35±0.00$^{a-d}$ | 7.40±0.00$^{a-d}$ | 11.66±0.25$^{b-f}$ | 53.0±1.15$^{b-f}$ | 77.6±0.33$^{ab}$ | 100 | *Pseudomonas fluorescens* |
| 4.60±0.15$^{a-d}$ | 23.0±0.75$^{a-d}$ | 2.74±0.48$^{a}$ | 2.30±0.00$^{ef}$ | 7.50±0.29$^{a-d}$ | 12.93±0.001$^{b-e}$ | 58.7±0.00$^{b-e}$ | 58.5±0.86$^{d-h}$ | 200 | |
| 4.02±0.06$^{c-e}$ | 20.1±0.31$^{c-e}$ | 2.36±0.08$^{ab}$ | 2.60±0.06$^{c-f}$ | 7.60±0.34$^{a-d}$ | 15.07±0.19$^{a-d}$ | 68.5±5.48$^{a-d}$ | 53.3±2.60$^{-j}$ | 0 | |
| 4.27±0.05$^{a-e}$ | 21.3±0.27$^{a-e}$ | 2.57±0.24$^{ab}$ | 3.56±0.23$^{ab}$ | 6.66±0.71$^{b-e}$ | 12.04±0.001$^{b-e}$ | 54.7±1.15$^{b-e}$ | 69.0±0.00$^{b-e}$ | 100 | *Pseudomonas putida* |
| 5.13±0.04$^{a}$ | 25.7±0.23$^{a}$ | 1.63±0.00$^{ab}$ | 2.95±0.26$^{a-e}$ | 5.75±0.14$^{de}$ | 16.00±0.001$^{ab}$ | 72.7±0.00$^{ab}$ | 82.6±2.03$^{a}$ | 200 | |
| 4.06±0.10$^{b-e}$ | 20.3±0.51$^{b-e}$ | 2.69±0.24$^{a}$ | 2.75±0.14$^{b-f}$ | 6.75±0.14$^{b-e}$ | 15.18±0.32$^{a-d}$ | 69.0±0.86$^{a-d}$ | 61.8±0.83$^{c-h}$ | 0 | |
| 4.26±0.13$^{a-e}$ | 21.3±0.66$^{a-e}$ | 1.97±0.01$^{ab}$ | 2.30±0.17$^{ef}$ | 6.25±0.72$^{c-e}$ | 10.01±1.65$^{c-f}$ | 45.5±0.00$^{c-f}$ | 66.3±1.20$^{b-f}$ | 100 | *Enterobacter cloacae* |
| 4.62±0.12$^{a-d}$ | 23.1±0.62$^{a-d}$ | 2.05±0.07$^{ab}$ | 2.15±0.20$^{ef}$ | 6.40±0.52$^{b-e}$ | 11.66±1.78$^{b-f}$ | 53.0±0.00$^{b-f}$ | 53.5±0.86$^{f-j}$ | 200 | |
| 4.25±0.25$^{a-e}$ | 21.3±1.27$^{a-e}$ | 1.18±0.68$^{a-c}$ | 2.25±0.14$^{ef}$ | 6.90±0.34$^{b-d}$ | 10.67±1.33$^{b-f}$ | 48.5±1.44$^{b-f}$ | 76.3±3.18$^{ab}$ | 0 | |
| 4.50±0.10$^{a-d}$ | 22.5±0.51$^{a-d}$ | 1.50±0.00$^{a-c}$ | 2.70±0.00$^{b-f}$ | 5.75±0.43$^{de}$ | 9.57±0.82$^{d-f}$ | 56.2±2.17$^{b-e}$ | 71.2±4.13$^{a-d}$ | 100 | *Rhizobium meliloti* |
| 4.60±0.18$^{a-d}$ | 23.0±0.94$^{a-d}$ | 1.78±0.04$^{ab}$ | 2.75±0.14$^{b-f}$ | 6.00±0.00$^{de}$ | 10.45±0.00$^{b-f}$ | 65.7±0.00$^{a-d}$ | 51.0±3.51$^{g-j}$ | 200 | |
| 2.84±0.06$^{g}$ | 14.2±0.33$^{g}$ | 0.75±0.00$^{c}$ | 1.90±0.06$^{f}$ | 4.65±0.20$^{e}$ | 6.10±0.54$^{f}$ | 27.7±2.45$^{f}$ | 41.5±4.91$^{j}$ | 0 | |
| 2.98±0.03$^{fg}$ | 14.9±1.53$^{fg}$ | 0.97±0.55$^{bc}$ | 2.23±0.14$^{ef}$ | 6.30±0.63$^{b-e}$ | 7.75±0.60$^{ef}$ | 35.2±2.74$^{f}$ | 43.6±0.67$^{ij}$ | 100 | Control |
| 3.48±0.17$^{e-g}$ | 17.4±0.85$^{e-g}$ | 1.36±0.00$^{a-c}$ | 2.75±0.14$^{b-f}$ | 5.85±0.08$^{de}$ | 11.38±0.28$^{b-f}$ | 47.5±8.08$^{b-f}$ | 50.0±1.73$^{g-j}$ | 200 | |

حروف مشابه در هر ستون به مفهوم نبود تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها 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 standarad errors (SE).

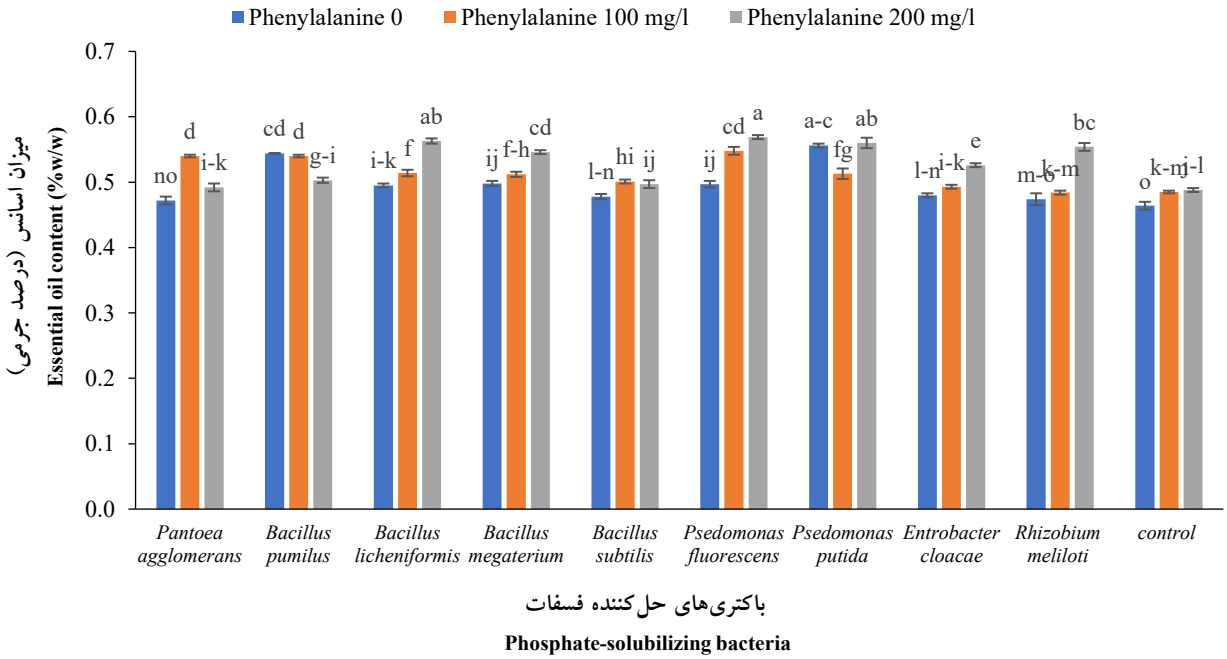
**جدول ۵.** مقایسه میانگین اثر برهمکنش باکتری‌های حل‌کننده فسفات و محلول‌پاشی فنیل‌آلانین بر محتوای نسبی آب برگ (RWC)، کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، کارتنوئید و میزان اسانس گیاه مریم‌گلی ترکه‌ای

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

| Carotenoids (mg $g^{-1}$ FW) کارتنوئید (میلی‌گرم بر گرم وزن تازه برگ) | Total Chlorophyll (mg $g^{-1}$ FW) کلروفیل کل (میلی‌گرم بر گرم وزن تازه برگ) | Chlorophyll b (mg $g^{-1}$ FW) کلروفیل b (میلی‌گرم بر گرم وزن تازه برگ) | Chlorophyll a (mg $g^{-1}$ FW) کلروفیل a (میلی‌گرم بر گرم وزن تازه برگ) | RWC (%) | Phenylalanine (mg $L^{-1}$) فنیل‌آلانین (میلی‌گرم در لیتر) | Phosphate-solubilizing bacteria باکتری‌های حل‌کننده فسفات |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $0.276\pm0.00^{p}$ | $2.22\pm0.01^{g-k}$ | $0.58\pm0.06^{a-f}$ | $1.65\pm0.004^{d-f}$ | $65.9\pm2.31^{a-d}$ | 0 | |
| $0.391\pm0.0002^{d-i}$ | $2.26\pm0.0003^{f-j}$ | $0.61\pm0.008^{a-e}$ | $1.63\pm0.00^{d-f}$ | $64.9\pm2.02^{a-d}$ | 100 | *Pantoea aglomerans* |
| $0.368\pm0.007^{h-n}$ | $2.59\pm0.06^{ab}$ | $0.77\pm0.07^{a}$ | $1.81\pm0.08^{a-f}$ | $72.4\pm1.73^{a-d}$ | 200 | |
| $0.395\pm0.006^{d-h}$ | $2.28\pm0.05^{e-i}$ | $0.70\pm0.01^{a-c}$ | $1.57\pm0.03^{f}$ | $67.7\pm0.96^{a-d}$ | 0 | |
| $0.413\pm0.0006^{b-d}$ | $2.32\pm0.04^{d-i}$ | $0.62\pm0.01^{a-e}$ | $1.70\pm0.06^{c-f}$ | $67.3\pm2.74^{a-d}$ | 100 | *Bacillus pumilus* |
| $0.425\pm0.007^{bc}$ | $2.51\pm0.006^{a-c}$ | $0.59\pm0.002^{a-f}$ | $1.92\pm0.004^{a-c}$ | $71.5\pm6.28^{a-d}$ | 200 | |
| $0.431\pm0.005^{ab}$ | $2.36\pm0.03^{c-h}$ | $0.66\pm0.07^{a-d}$ | $1.70\pm0.008^{c-f}$ | $71.8\pm3.62^{a-d}$ | 0 | |
| $0.409\pm0.00^{b-e}$ | $2.3400.002^{d-i}$ | $0.58\pm0.009^{a-f}$ | $1.76\pm0.00^{a-f}$ | $74.3\pm1.13^{a-d}$ | 100 | *Bacillus licheniformis* |
| $0.453\pm0.00^{a}$ | $2.65\pm0.04^{a}$ | $0.67\pm0.02^{a-d}$ | $1.98\pm0.09^{a}$ | $79.8\pm0.09^{a}$ | 200 | |
| $0.406\pm0.005^{b-f}$ | $2.32\pm0.001^{d-i}$ | $0.73\pm0.07^{ab}$ | $1.59\pm0.008^{ef}$ | $63.9\pm6.17^{a-d}$ | 0 | |
| $0.391\pm0.004^{d-i}$ | $2.21\pm0.04^{g-k}$ | $0.51\pm0.03^{c-f}$ | $1.71\pm0.03^{b-f}$ | $66.9\pm0.51^{a-d}$ | 100 | *Bacillus megaterium* |
| $0.377\pm0.00^{g-m}$ | $2.09\pm0.004^{j-l}$ | $0.47\pm0.04^{d-f}$ | $1.61\pm0.05^{d-f}$ | $76.2\pm3.26^{a-c}$ | 200 | |
| $0.395\pm0.003^{d-h}$ | $2.37\pm0.02^{c-h}$ | $0.49\pm0.006^{d-f}$ | $1.87\pm0.0007^{a-d}$ | $67.1\pm3.03^{a-d}$ | 0 | |
| $0.383\pm0.002_{e-k}$ | $2.40\pm0.0003^{b-f}$ | $0.48\pm0.007^{d-f}$ | $1.93\pm0.008^{a-c}$ | $72.4\pm4.16^{a-d}$ | 100 | *Bacillus subtilis* |
| $0.385\pm0.00_{d-j}$ | $2.46\pm0.02^{a-d}$ | $0.51\pm0.03^{c-f}$ | $1.98\pm0.01^{a}$ | $76.9\pm3.05^{a-c}$ | 200 | |
| $0.353\pm0.0003^{mn}$ | $2.18\pm0.02^{i-k}$ | $0.44\pm0.03^{ef}$ | $1.71\pm0.05^{b-f}$ | $60.8\pm7.54^{a-d}$ | 0 | |
| $0.356\pm0.0007^{l-n}$ | $2.07\pm0.00^{kl}$ | $0.44\pm0.02^{ef}$ | $1.66\pm0.09^{a-f}$ | $63.1\pm1.49^{a-d}$ | 100 | *Pseudomonas fluorescens* |
| $0.354\pm0.003^{mn}$ | $2.20\pm0.02^{h-k}$ | $0.54\pm0.02^{b-f}$ | $1.80\pm0.01^{a-f}$ | $76.2\pm1.77^{a-c}$ | 200 | |
| $0.388\pm0.01^{d-j}$ | $2.19\pm0.01^{i-k}$ | $0.54\pm0.02^{b-f}$ | $1.80\pm0.03^{a-f}$ | $66.8\pm4.86^{a-d}$ | 0 | |
| $0.367\pm0.006^{i-n}$ | $2.42\pm0.04^{a-f}$ | $0.56\pm0.03^{b-f}$ | $1.85\pm0.07^{a-d}$ | $68.5\pm1.85^{a-d}$ | 100 | *Pseudomonas putida* |
| $0.381\pm0.004^{f-l}$ | $2.55\pm0.007^{ab}$ | $0.54\pm0.006^{b-f}$ | $1.95\pm0.06^{ab}$ | $78.6\pm1.71^{ab}$ | 200 | |
| $0.372\pm0.00^{h-n}$ | $2.41\pm0.03^{b-f}$ | $0.57\pm0.004^{a-f}$ | $1.84\pm0.007^{a-d}$ | $58.1\pm8.01^{cd}$ | 0 | |
| $0.363\pm0.001^{j-n}$ | $2.43\pm0.03^{a-e}$ | $0.61\pm0.03^{a-e}$ | $1.81\pm0.04^{a-f}$ | $69.2\pm0.52^{a-d}$ | 100 | *Enterobacter cloacae* |
| $0.371\pm0.001^{h-n}$ | $2.38\pm0.0003^{c-h}$ | $0.61\pm0.04^{a-e}$ | $1.77\pm0.02^{a-f}$ | $75.9\pm2.23^{a-c}$ | 200 | |
| $0.402\pm0.0008^{c-g}$ | $2.42\pm0.01^{a-f}$ | $0.70\pm0.02^{a-c}$ | $1.72\pm0.006^{b-f}$ | $67.9\pm0.77^{a-d}$ | 0 | |
| $0.373\pm0.003^{h-n}$ | $2.26\pm0.05^{f-j}$ | $0.43\pm0.03^{ef}$ | $1.83\pm0.04^{a-e}$ | $69.4\pm2.16^{a-d}$ | 100 | *Rhizobium meliloti* |
| $0.361\pm0.005^{j-n}$ | $2.19\pm0.03^{i-k}$ | $0.49\pm0.05^{d-f}$ | $1.72\pm0.04^{b-f}$ | $72.0\pm3.18^{a-d}$ | 200 | |
| $0.325\pm0.005^{o}$ | $1.95\pm0.03^{l}$ | $0.48\pm0.004^{f}$ | $1.32\pm0.00^{g}$ | $54.8\pm0.82^{d}$ | 0 | |
| $0.391\pm0.004^{d-i}$ | $2.30\pm0.02^{d-j}$ | $0.48\pm0.03^{d-f}$ | $1.82\pm0.008^{a-e}$ | $59.7\pm0.47^{b-d}$ | 100 | Control |
| $0.349\pm0.13^{no}$ | $2.06\pm0.00^{kl}$ | $0.46\pm0.01^{f}$ | $1.61\pm0.06^{f}$ | $69.9\pm2.69^{a-d}$ | 200 | |

حروف مشابه در هر ستون به مفهوم نبود تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها 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 standarad errors (SE).




**شکل ۱.** اثر برهمکنش باکتری‌های حل‌کننده فسفات و محلول‌پاشی فنیل‌آلانین بر میزان اسانس گیاه مریم‌گلی ترکه‌ای. 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, $P < 0.05$).

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

بیشترین ارتفاع بوته، وزن تازه و خشک ریشه در تیمار *P. putida* همراه با محلول‌پاشی ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر فنیل‌آلانین 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 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، فنیل‌آلانین به‌عنوان پیش‌ساز ترکیبات فنلی در تحریک مسیرهای متابولیک افزایش تقسیم سلولی و رشد بافت‌های رویشی نقش دارد (Khan et al., 2019). همچنین فنیل‌آلانین 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

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 نعناع‌دشتی 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، طویل‌شدن 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 گزارش‌شده 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 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 گزارش‌شده 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 بنزآلدئید 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

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 (Kloepper 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 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 منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

## 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 Behrouzyar, 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. Polyphenoloxide 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. thyrsiflora). Plant Product. 44(2), 235–246. https://doi.org/10.22055/ppd.2020.31636.1844. (In Persian with English abstract)
12. Esmaeili, 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: 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/kjhst.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., Khattab, 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.
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.
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 variatcions 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.jarmap.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. Torfi, V., Danesh Shahraki, A., Ghobadinia, 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.