Research Article

Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research
Vol. 40, No. 2, Page 241-258 (2024)

DOI:10.22092/ijmapr.2023.363071.3351

The effect of PGPRS and vermicompost on some morphological parameters, nutrients and essential oil composition of *Satureja hortensis* L. under drought stress conditions

Omid Heidarpour[1], Behrooz Esmaielpour[2*], Ali-Ashraf Soltani[3] and Zahra Aslani[4]

1- Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture Science, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran
2*- Corresponding author, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture Science, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran, E-mail: behsmaiel@yahoo.com
3- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture Science, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran
4- Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

Received: July 2023 Revised: December 2023 Accepted: December 2023

Abstract

Background and objectives: Savory (*Satureja hortensis* L.) is one of the most important medicinal plants that grows in different parts of the world, including Iran. Water deficit has adverse effects on physiological processes such as photosynthesis, nutrient absorption, development and division of cells, and accumulation and transfer of nutrients, thus reducing the performance of plants. In contrast, biofertilizers play a prominent role in the growth and development of plants by improving the absorption of nutrients and sufficient water through changes in the physicochemical properties of the soil. This study aimed to investigate the effect of drought stress, growth-promoting bacteria (PGPRS) and vermicompost on the yield, amount of nutrients and essential components of the savory plant.

Materials and methods: A factorial experiment based on a randomized complete block design with three replications was conducted at the Research Farm at the Mohaghegh Ardabili University, Iran, from 2016-2017. Treatments included three levels of drought stress (Full irrigation (S1), Water cut at 50% of flowering (S2), and water cut in early stages of flowering (S3), four vermicompost levels (including 0, 1, 1.5 and 2 t. ha-1) and included inoculation with microorganisms at three levels (non-inoculation, inoculation with Streptomyces and Pseudomonas fluorescens p15). Before planting, the seeds were inoculated with biological stimulants. Then, seeds were cultivated in rows at a distance of 25 cm between the rows, 20 cm on rows and at a depth of 0.5 cm. To apply the irrigation treatment, the field's soil was investigated in the horizon of the plant roots up to a depth of 20 cm by digging a profile. The weight method was used to control water. Field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP) were measured using intact samples 24 hours after soil saturation for field capacity and placed in a suction device with 15 atmospheres of negative pressure for permanent wilting point. The corresponding values for the soil at a depth of 0 to 30 cm were determined according to the layering of the soil, and from their difference, the amount of usable soil water (AW) was determined. During the test, the usable water (depending on the plant's growth stage) was determined by the soil sampling cylinder and transferred to the oven in the form of moisture percentage by weight. The examined parameters included plant height, shoot dry weight, root dry weight, and concentration of phosphorus, potassium, and essential oil components.

Results: Based on the obtained results, drought stress, vermicompost, and inoculation with PGPRS had a significant effect on the measured parameters. So that the maximum plant height (62.36 cm), shoot dry weight (28.72 grams) and root dry weight (6.35 grams), phosphorus (1.3 percent) and potassium absorption (3.3 percent) were obtained under non-stress conditions, application of vermicompost two tons per hectare of and inoculation with Streptomyces

Copyright: © 2024 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (http://ijmapr.areeo.ac.ir/) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

bacteriaand the lowest amount of plant height (22.33 cm), shoot dry weight (18.33 grams), dry weight roots (3.07 grams), phosphorus (0.85 percent) and potassium (1.2 percent) were observed in the planting beds without vermicompost application and non-inoculation with biological stimulants and in severity drought stress. Also, the highest amount of carvacrol (62%) and gamma-terpinene (26.9%) was obtained in the treatment of severe drought stress and beds containing two tons per hectare of vermicompost in plants inoculated with Streptomyces.
Conclusion: Vermicompost with growth-promoting bacteria can be a sustainable agricultural fertilizer containing beneficial microorganisms that improve the growth performance and essential components of savory plants under drought stress and non-stress conditions.

Keywords: Essential oil, plant growth-promoting bacteria, drought stress, *Satureja hortensis* L., vermicompost.

تأثیر باکتری‌های محرک رشد و ورمی‌کمپوست بر برخی پارامترهای رشدی، جذب عناصر غذایی و اسانس *Satureja hortensis* L. در شرایط تنش خشکی

امید حیدرپور[۱]، بهروز اسماعیل‌پور[۲*]، علی‌اشرف سلطانی[۳] و زهرا اصلانی[۴]

۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران

۲*- نویسنده مسئول، استاد، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران، پست الکترونیک: behsmaiel@yahoo.com

۳- دانشیار، گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران

۴- دانش‌آموخته دکتری، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

تاریخ دریافت: مرداد ۱۴۰۲ تاریخ اصلاح نهایی: آذر ۱۴۰۲ تاریخ پذیرش: دی ۱۴۰۲

چکیده

سابقه و هدف: کمبود آب اثرهای نامطلوبی بر فرایندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز، جذب عناصر غذایی، توسعه و تقسیم سلولی، تجمع و انتقال مواد غذایی داشته و بدین طریق موجب کاهش عملکرد گیاهان می‌گردد. کودهای زیستی باعث تحریک جوانه‌زنی، افزایش طول ریشه، فتوسنتز، در دسترس بودن و جذب مواد مغذی خاک و فعالیت میکروبی خاک در شرایط استرس‌زا می‌شوند. کاربرد کودهای ارگانیک مانند کمپوست و ورمی‌کمپوست برای بهبود انعطاف‌پذیری و عملکرد محصول نشان داده شده است. استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی می‌تواند باعث افزایش کربن و محتوی کل مواد آلی در خاک و همچنین افزایش تغذیه معدنی و ظرفیت نگهداری آب در خاک شود. هدف از این پژوهش، بررسی تنش خشکی، باکتری‌های محرک رشد و ورمی‌کمپوست بر عملکرد، میزان عناصر غذایی و اجزای اسانس گیاه مرزه است.

مواد و روش‌ها: آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل: تنش خشکی در سه سطح (S_1: آبیاری کامل، S_2: قطع آبیاری در ۵۰٪ گلدهی و S_3: قطع آبیاری در اوایل گلدهی)، مایه‌کوبی شامل عدم مایه‌کوبی و مایه‌کوبی با باکتری سودوموناس P_{15} و باکتری استرپتومایسس و ورمی‌کمپوست در چهار سطح (صفر، ۱، ۱/۵ و ۲ تن در هکتار) بود. قبل از کاشت بذرهای مورد نظر را در محرک‌های زیستی قرار داده و به‌صورت بذرمال آماده شد. بذر مرزه به‌صورت ردیفی با فاصله بین ردیف‌ها ۲۵ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف‌ها ۲۰ سانتی‌متر و در عمق ۰/۵ سانتی‌متری کشت گردید. برای اعمال تیمار آبیاری، خاک مزرعه در افق ریشه‌های گیاه تا عمق ۲۰ سانتی‌متر با حفر پروفیل، بررسی شد. برای کنترل آب از روش وزنی استفاده گردید. ظرفیت مزرعه‌ای و نقطه پژمردگی دائم با استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده در حالت ۲۴ ساعت پس از اشباع خاک برای ظرفیت مزرعه‌ای و قرار دادن در دستگاه مکش با ۱۵ اتمسفر فشار منفی برای نقطه پژمردگی دائم بدست آمد و مقادیر مربوط برای خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر با توجه به لایه‌بندی خاک و از تفاضل آنها میزان آب قابل استفاده خاک تعیین شد. در طول آزمایش آب قابل استفاده (با توجه به مرحله رشدی گیاه) توسط سیلندر نمونه‌برداری خاک و انتقال به آون به‌صورت درصد وزنی رطوبت تعیین شد. صفات مورد بررسی شامل ارتفاع گیاه، وزن خشک شاخساره، وزن خشک ریشه، غلظت عناصر فسفر، پتاسیم و اجزای اسانس بودند.

نتایج: براساس نتایج بدست آمده تنش خشکی، ورمی‌کمپوست و مایه‌کوبی با باکتری‌های محرک رشد بر پارامترهای اندازه‌گیری شده تأثیر معنی‌داری داشته است. به‌طوری که بیشترین میزان ارتفاع بوته (۶۲/۳۶ سانتی‌متر)، وزن خشک شاخساره (۲۸/۷۲ گرم)، وزن خشک ریشه (۶/۳۵ گرم)، جذب فسفر (۱/۳٪) و میزان جذب پتاسیم (۲/۳٪) در شرایط بدون تنش، کاربرد دو تن در هکتار ورمی‌کمپوست و مایه‌کوبی با باکتری استرپتومایسس و کمترین میزان ارتفاع بوته (۲۲/۳۳ سانتی‌متر)، وزن خشک شاخساره (۱۸/۳۳ گرم)، وزن خشک ریشه (۳/۰۷ گرم)، فسفر (۰/۸۵٪) و پتاسیم (۱/۲٪) در بسترهای کاشت بدون کاربرد ورمی‌کمپوست و بدون مایه‌کوبی با محرک‌های زیستی و در تیمار تنش قطع آبیاری در ابتدای گلدهی بدست آمد. همچنین بالاترین میزان کارواکرول

(۶۲٪) و گاما-ترپینن (۲۶/۹٪) در تیمار تنش خشکی (قطع آبیاری در ابتدای گلدهی) و بسترهای حاوی ۲ تن در هکتار ورمی‌کمپوست در گیاهان مایه‌کوبی شده با باکتری استرپتومایسس بدست آمد.
نتیجه‌گیری: کاربرد ورمی‌کمپوست همراه با باکتری‌های محرک رشد را می‌توان به‌عنوان کودهای کشاورزی پایدار حاوی میکروارگانیسم‌های مفید برای بهبود عملکرد رشد و اجزای اسانس گیاه مرزه در شرایط تنش خشکی و بدون تنش پیشنهاد کرد.

واژه‌های کلیدی: اسانس، باکترهای محرک رشد، تنش خشکی، مرزه، ورمی‌کمپوست.

مقدمه

مرزه با نام علمی *Satureja hortensis* L. گیاهی علفی و یک‌ساله متعلق به خانواده نعناعیان است. این گیاه بومی منطقه مدیترانه بوده و در سطح وسیعی در فرانسه، مجارستان، اسپانیا و ایران کشت می‌شود (Gontaru *et al*., 2008). برگ‌های آن منحصراً یک رگبرگ دارد و در سطح آنها نیز نقاط ریز و فراوانی دیده می‌شود که شامل غده‌های اسانس‌دار هستند. برگ‌ها و سرشاخه‌های گلدار این گیاه حاوی بیشترین میزان اسانس می‌باشند. مقدار اسانس بین ۱٪ تا ۲٪ است. از مهمترین ترکیبات تشکیل‌دهنده اسانس می‌توان کارواکرول (۳۰٪ تا ۴۰٪)، تیمول (۲۰٪ تا ۳۰٪) و ترکیبات فنلی دیگر نام برد (Omid Beigi, 2001).

گیاهان در طول چرخه زندگی خود به‌طور مداوم در معرض تنش‌های غیرزنده مانند تنش خشکی قرار دارند. خشکسالی رایج‌ترین تنش محیطی است که می‌تواند بر رشد گیاهان در سراسر جهان به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأثیر بگذارد، بنابراین خشکی به محدودیت‌های اصلی تولید محصولات کشاورزی تبدیل شده است (Bahadur *et al*., 2019). همچنین تنش خشکی باعث تغییرات ساختاری، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاهان می‌شود (Ghosh *et al*., 2017). گزارش شده است که عوامل محیطی متعددی مانند تنش خشکی می‌توانند غلظت متابولیت‌های ثانویه را افزایش داده و بیان ژن‌های دخیل در سنتز این متابولیت‌ها را در گیاهان دارویی افزایش دهند (Kleinwachter & Selmar, 2014).

کمبود آب همچنین اثرهای نامطلوبی بر فرایندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز، جذب عناصر غذایی، توسعه و تقسیم سلولی، تجمع و انتقال مواد غذایی دارد (Devnarain *et al*., 2016). افزایش شدت تنش خشکی (۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی) در گیاه مرزه تابستانه موجب کاهش معنی‌داری در وزن خشک اندام هوایی، ریشه و افزایش درصد اسانس گردید، به‌طوری که وزن خشک اندام هوایی و ریشه در تیمار ۲۵٪ ظرفیت زراعی به‌ترتیب به میزان ۲ و ۵ برابر کاهش یافت و درصد اسانس به میزان ۶۷٪ افزایش پیدا کرد (Danaee & Abdossi, 2022). همچنین اعمال تیمارهای مختلف تنش خشکی (۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) در گیاه ترخون (*Artemisia dracunculus* L) بر صفات مورفولوژیکی، عملکرد سرشاخه و برگ تأثیر منفی گذاشت و بیشترین میزان عملکرد سرشاخه و برگ به‌ترتیب ۹۳۳۸ و ۴۳۹ کیلوگرم در هکتار در شرایط بدون تنش و کمترین میزان صفات مذکور به‌ترتیب ۴۸۲۶ و ۲۱۸ کیلوگرم در هکتار در تیمار ۴۰٪ ظرفیت زراعی بدست آمد (Lotfi *et al*., 2014). کوددهی خاک به‌طور مستقیم از طریق تأمین مواد مغذی یا به‌طور غیرمستقیم از طریق تأثیر بر مسیرهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاه نقش مهمی در بقای گیاه دارد (Nasiroleslami *et al*., 2021).

امروزه به دلیل اثرهای نامطلوب کودهای شیمیایی بر pH خاک، میکرو فلور مفید و تأمین آب، تقاضا برای جایگزین‌های آلی و بیولوژیکی افزایش یافته است (Saha *et al*., 2019). ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاهی (PGPRs)، میکوریزا و ورمی‌کمپوست ازجمله پرمصرف‌ترین

کودهایی هستند که جنبه‌های سازگار با محیط زیست دارند (Weisany *et al*., 2016). در این میان، باکتری‌های محرک رشد با بهبود جذب عناصر غذایی و آب کافی از طریق تغییر در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، نقش برجسته‌ای در رشد و نمو گیاهان دارند (Goswami & Suresh, 2020). در بین کودهای آلی، ورمی‌کمپوست به‌طور گسترده‌ای برای بهبود ویژگی‌های خاک از طریق افزایش ظرفیت آب و تسهیل در دسترس بودن مواد مغذی برای گیاهان استفاده می‌شود (Khosropour *et al*., 2021). بنابراین، PGPRs و ورمی‌کمپوست با تأثیر بر جذب عناصر غذایی در ریزوسفر و فعل و انفعالات گیاهی به‌عنوان محرک‌های گیاهی شناخته می‌شوند. ورمی‌کمپوست در نتیجه هضم بقایای مواد آلی ضمن عبور از دستگاه گوارش کرم‌های خاکی بوجود می‌آید (Jahani *et al*., 2011) که با افزایش میزان عناصر غذایی در دسترس گیاه باعث افزایش رشد گیاه، میزان ماده خشک و عملکرد گیاه می‌شود (Saeednejad & Rezvani Moghaddam, 2010). حدود ۲٪ تا ۵٪ باکتری‌های ریزوسفری به‌عنوان باکتری محرک رشد شناخته می‌شوند (Goswami *et al*., 2016). PGPRها شامل باکتری‌های احاطه کننده ریشه هستند که باعث افزایش رشد گیاه می‌شوند، امروزه این باکتری‌ها به‌عنوان زاد مایه میکروبی به شکل کنترل‌گرهای زیستی یا کودهای زیستی استفاده می‌شوند (Glick, 2012).

استرپتومایسس یکی از باکتری‌های گرم مثبت است که ظرفیت بسیار خوبی برای زنده ماندن در محیط‌های نامطلوب دارد (Lightfield *et al*., 2011). گزارش شده است که باکتری استرپتومایسس با تولید ایندول-۳-اسید استیک و سیدروفورها رشد گیاه را تقویت می‌کند (Goudjal *et al*., 2016). توانایی تولید سیدروفور و ایندول استیک اسید به‌وسیله باکتری استرپتومایسس در شرایط تنش قبلاً گزارش شده است (Sadeghi *et al*., 2012). باکتری‌های جنس *Pseudomonas* نیز از مهمترین باکتری‌های محرک رشد ریزوسفری هستند. از ویژگی‌های شاخص گونه‌های این جنس تولید هورمون‌های گیاهی مانند اکسین، سیدروفور، سیانید هیدروژن و تولید اسیدهای آلی و معدنی می‌باشد (Van Loon, 2007). بهبود ساختمان خاک و جذب عناصری مانند روی، منیزیم، کلسیم و پتاسیم توسط باکتری‌های جنس سودوموناس فلورسنس و سودوموناس پوتیدا گزارش شده است (Khan *et al*., 2009). امروزه اثبات شده است که این میکروارگانیسم‌ها علاوه بر کمک به جذب عناصر غذایی، موجب کاهش بیماری‌ها، بهبود ساختمان خاک، تحریک رشد گیاه و افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های محیطی می‌شوند (Nagananda *et al*., 2010).

Darakeh و همکاران (۲۰۲۲) ضمن بررسی اثر تنش خشکی همراه با کاربرد کود شیمیایی (نیتروژن، فسفر و پتاسیم)، میکروارگانیسم‌های محرک رشد و ورمی‌کمپوست بر پارامترهای رشدی و میزان جذب عناصر غذایی در گیاه زیره سیاه، بیان کردند که کاربرد ورمی‌کمپوست و میکروارگانیسم‌های محرک رشد وزن تر و خشک اندام هوایی را در مقایسه با گیاهان تیمار نشده دو برابر افزایش داد. همچنین بیشترین میزان عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم در اندام هوایی گیاهان تیمار شده حاصل شد. در تحقیق دیگری Parsa و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی سطوح مختلف تنش خشکی (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ ظرفیت زراعی) و ترکیب کودهای زیستی و شیمیایی بیان کردند که بیشترین میزان اسانس (۲/۰۹) گیاه نعناع فلفلی در تیمار آبیاری ۵۰٪ ظرفیت زراعی و استفاده از تیمار کودی ترکیبی (کودهای زیستی همراه با شیمیایی) بدست آمد. بررسی اثر کود شیمیایی، دامی، ورمی‌کمپوست و تلفیق آنها بر گیاه مرزه خوزستانی (*S. khuzestanica* Jamzad) نشان داد که استفاده تلفیقی از کودهای آلی و شیمیایی تأثیر مثبتی بر کمّیت و کیفیت اسانس مرزه دارد (Ahmadi *et al*., 2021).

مرزه یکی از گیاهان با ارزشی است که علاوه بر اینکه به‌عنوان سبزی خوراکی استفاده می‌شود، در صنایع داروسازی و پزشکی نیز کاربردهای فراوانی دارد و از آنجا که خشکسالی و تنش‌های آبی در بسیاری از مناطق دنیا می‌تواند رشد و عملکرد این گیاه را تحت تأثیر قرار دهد، ازاین‌رو یافتن راهکارهایی برای تعدیل اثرهای تنش روی گیاه مرزه با بهره جستن از محرک‌های زیستی از قبیل

باکتری‌های محرک رشد گیاهی و استفاده از ورمی‌کمپوست ضروریست. بنابراین با توجه به موارد ذکر شده، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر محرک‌های زیستی شامل باکتری‌های محرک رشد و ورمی‌کمپوست بر خصوصیات رشدی، جذب عناصر غذایی و ترکیبات اسانس در گیاه مرزه در شرایط تنش خشکی در دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه گروه علوم باغبانی دانشگاه محقق اردبیلی با موقعیت جغرافیایی ۳۸ درجه و ۲۵ دقیقه و ۱۴ ثانیه طول شمالی و ۴۸ درجه و ۲۹ دقیقه و ۷۳ ثانیه عرض شرقی و با ارتفاع نسبی از سطح دریا ۱۵۰۰ متر در سال ۱۳۹۶ اجرا شد. این پژوهش به‌صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه فاکتور تنش خشکی، محرک‌های زیستی و ورمی‌کمپوست در سه تکرار در شرایط مزرعه اجرا گردید. تیمارهای تنش خشکی شامل سه رژیم آبیاری (S_1: آبیاری کامل (۱۰۰٪)، S_2: قطع آبیاری در ۵۰٪ گلدهی و S_3: قطع آبیاری در اوایل گلدهی)، تیمارهای مایه‌کوبی شامل عدم مایه‌کوبی و مایه‌کوبی با دو گونه باکتری محرک رشد (باکتری محرک رشد سودوموناس P_{15} و باکتری استرپتومایسس) و چهار سطح ورمی‌کمپوست شامل صفر (V_1)، یک تن در هکتار (V_2)، ۱/۵ تن در هکتار (V_3) و دو تن در هکتار (V_4) بود.

تهیه بستر، مایه‌کوبی و کشت بذر

در این تحقیق، بذر مرزه مورد استفاده از پژوهشکده گیاهان دارویی دانشگاه شهید بهشتی تهیه گردید و باکتری‌های محرک رشد از مرکز تحقیقات خاک و آب ایران تهیه شد و در یخچال در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری گردید. ورمی‌کمپوست از شرکت زرین کود گرگان خریداری شد. عملیات آماده‌سازی بستر کاشت در مزرعه شامل شخم و دیسک قبل از کاشت انجام شد. بعد از شخم زدن زمین، کرت‌های مورد نظر آماده گردید و سطح کرت‌ها صاف شدند و ورمی‌کمپوست براساس مقادیر مورد نظر به کرت‌ها اضافه گردید و با استفاده از شن‌کش ورمی‌کمپوست اضافه شده به آرامی با خاک کاملاً مخلوط گردید. برخی ویژگی‌های خاک و ورمی‌کمپوست مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. برای اجرای آزمایش کرت‌هایی به ابعاد ۱ در ۱ متر در نظر گرفته شد و فواصل بین کرت‌ها نیز ۵۰ سانتی‌متر بود. قبل از کاشت بذرهای مورد نظر را در محرک‌های زیستی قرار داده و به‌صورت بذرمال آماده شد. بذر مرزه به‌صورت ردیفی در فاصله بین ردیف‌ها ۲۵ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف‌ها ۲۰ سانتی‌متر و در عمق ۰/۵ سانتی‌متری کشت گردید و روی بذرها با خاک، برای تماس بهتر خاک با بذر، پوشانده شد. بوته‌ها در مرحله ۶-۴ برگی برای دستیابی به تراکم مطلوب تنک شدند. آبیاری در اوایل کشت گیاه تا هشت هفته بعد از کاشت و با توجه به شرایط آب و هوایی چهار نوبت در هفته و به‌صورت یکسان برای تمام کرت‌های آزمایشی انجام شد و برای گیاهان در تیمارهای بدون تنش این روند تا آخر فصل رشد (اوایل شهریور) ادامه یافت.

اعمال تنش آبی به‌صورت قطع آبیاری انجام شد، بدین ترتیب که تا مرحله شروع رشد زایشی گیاهان مرزه به‌صورت کامل آبیاری می‌شدند، سپس در دو مرحله ابتدای رشد زایشی (اواسط تیر ماه) و ۵۰٪ گلدهی (اواخر تیرماه) آبیاری گیاهان قطع شد و برای تیمار شاهد نیز آبیاری تا آخرین مراحل رشد ادامه یافت. برای اعمال تیمار آبیاری، خاک مزرعه در افق ریشه‌های گیاه تا عمق ۲۰ سانتی‌متر با حفر پروفیل، بررسی شد. برای کنترل آب از روش وزنی استفاده گردید. ظرفیت مزرعه‌ای و نقطه پژمردگی دائم با استفاده از نمونه‌های دست نخورده، ۲۴ ساعت پس از اشباع خاک برای ظرفیت مزرعه‌ای و قرار دادن در دستگاه مکش با ۱۵ اتمسفر فشار منفی برای نقطه پژمردگی دائم بدست آمد، مقادیر مربوط برای خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر با توجه به لایه‌بندی خاک و از تفاضل آنها میزان آب قابل استفاده خاک تعیین شد. در طول آزمایش آب قابل استفاده (با توجه به مرحله رشدی گیاه) توسط سیلندر نمونه‌برداری خاک و انتقال به آون به‌صورت درصد وزنی رطوبت تعیین شد (De Ridder & Van Keulen,1995). سپس تنش آبی به‌صورت قطع آبیاری در اوایل مرحله گلدهی و قطع آبیاری در مرحله ۵۰٪ گلدهی اعمال گردید.

جدول ۱- برخی از خواص شیمیایی ورمی‌کمپوست و خاک مورد استفاده

Table 1. Some chemical properties of vermicompost and experimental soil

Properties	Soil	Vermicompost
Organic matter (%)	0.068	35
Total N (%)	0.014	3.51
P (%)	0.08	1.15
K (%)	0.01	1.25
Fe (ppm)	11.48	550
Zn (ppm)	3.5	250
pH	7.1	7
EC ($dS.m^{-1}$)	1.2	1.1

اندازه‌گیری صفات رویشی

در پایان دوره آزمایش، از هر واحد آزمایشی ۵ بوته به‌طور تصادفی انتخاب و صفاتی مانند ارتفاع بوته (توسط خطکش)، وزن تر شاخساره و ریشه (به‌وسیله ترازوی دیجیتالی) اندازه‌گیری گردید. برای تعیین وزن خشک، قسمت‌های رویشی به‌طور جداگانه در داخل آون (دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت) قرار داده شدند و وزن خشک آنها محاسبه گردید.

اندازه‌گیری عناصر غذایی

برای این منظور، اندام هوایی را در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک کرده و پس از آن نمونه‌ها پودر شدند، سپس مقدار ۰/۳ تا ۰/۵ گرم از نمونه‌های خشک (برای هر تکرار به‌صورت جداگانه توزین گردید) در کروزه‌های چینی ریخته و به منظور حذف ترکیبات آلی به کوره با دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد انتقال داده شد و به مدت ۵ ساعت به خاکستر سفید رنگی تبدیل گردید. این خاکستر به کمک ۱۰ میلی‌لیتر اسیدکلریدریک ۲ مولار هضم شده، سپس به کمک کاغذ صافی فیلتر و به درون فالکون ۵۰ میلی‌لیتر ریخته و با آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس برای اندازه‌گیری فسفر و پتاسیم مورد استفاده قرار گرفت. میزان فسفر برگ‌ها با استفاده از روش رنگ‌سنجی (رنگ زرد مولیبدات وانادات) و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۷۶۶/۵ و مقادیر پتاسیم به روش نشر شعله‌ای و با کمک دستگاه فلیم فتومتر (مارک JENWAY، ساخت کشور انگلستان) اندازه‌گیری شد (Hamada & EL-enany, 1994).

اندازه‌گیری اجزای تشکیل‌دهنده اسانس

برای استخراج و آنالیز اسانس، بوته‌ها در پایان آزمایش از یک سانتی‌متری بالای سطح خاک برداشت و در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) و در سایه به مدت یک هفته خشک شدند. سپس استخراج اسانس به روش تقطیر با آب (با دستگاه کلونجر) انجام شد. برای این منظور، مقدار ۳۰ گرم از پیکره رویشی را خرد کرده و به همراه ۴۰۰ میلی‌لیتر آب به درون بالن مخصوص دستگاه ریخته شد و عمل اسانس‌گیری به مدت ۳ ساعت ادامه یافت. به‌منظور تجزیه نمونه‌های اسانس و اندازه‌گیری ترکیبات آن از دستگاه‌های کروماتوگراف گازی (GC) و کروماتوگراف گازی متصل به طیف‌سنج جرمی (GC/MS) آزمایشگاه مرکزی دانشگاه محقق اردبیلی استفاده شد.

برای شناسایی ترکیب‌های اسانس‌ها از دستگاه‌های گاز کروماتوگرافی (GC) مدل 7890Bساخت کشور آمریکا و گاز کروماتوگرافی متصل به طیف‌سنج جرمی (GC/MS) مدل 5977A ساخت کشور آمریکا استفاده گردید. ستون موئینه با نام تجاری DB-5 ساخت شرکت J&W به طول ۳۰ متر و قطر داخلی ۲۵۰ میکرومتر که سطح داخلی آن با فاز ساکن از جنس Phenyl و DimethylSiloxane به ضخامت ۰/۲۵ میکرومتر پوشیده شده بود، استفاده شد. برنامه‌ریزی حرارتی ستون از دمای اولیه ۶۰ درجه سانتی‌گراد تا دمای نهایی ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد بود که در هر دقیقه ۳ درجه سانتی‌گراد به آن افزوده شد. نوع گاز حامل هلیوم با درجه خلوص

۹۹/۹۹۹٪ و فشار ورودی آن به ستون، برابر ۳ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع تنظیم شده بود. نرم‌افزار مورد استفاده Euro chrom 2000 for windows ساخت شرکت Knauer کشور آلمان بود. شناسایی طیف‌ها به کمک شاخص‌های بازداری آنها که با تزریق هیدرو کربن‌های نرمال (C7-C 25) در شرایط یکسان با تزریق اسانس‌ها و توسط برنامه رایانه‌ای نوشته‌شده به زبان بیسیک محاسبه گردید.

تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها و نرم‌افزارهای مورد استفاده

برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SAS 9.1 و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد.

نتایج

صفات رشدی

براساس نتایج بدست آمده، اثر تنش خشکی، میکروارگانیسم‌های محرک رشد و ورمی‌کمپوست بر صفات رشدی اندازه‌گیری شده تأثیر معنی‌داری داشته است (جدول ۲). همچنین اثر متقابل هر سه عامل بر پارامترهای مذکور معنی‌دار بود (جدول ۳). همچنین نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثرهای متقابل تنش خشکی، ورمی‌کمپوست و محرک‌های زیستی نشان داد که در شرایط تنش خشکی، ارتفاع بوته، وزن خشک شاخساره و وزن خشک ریشه در گیاه مرزه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. درحالی که مایه‌کوبی با محرک‌های زیستی و کاربرد ورمی‌کمپوست توانست اثرهای نامطلوب تنش خشکی را کاهش دهد به‌طوری که بیشترین ارتفاع بوته (۶۲/۳۶ سانتی‌متر)، وزن خشک شاخساره (۲۸/۷۲ گرم) و وزن خشک ریشه (۶/۳۵ گرم) در شرایط بدون تنش، کاربرد ۲ تن در هکتار ورمی‌کمپوست و مایه‌کوبی با باکتری استرپتومایسس و کمترین ارتفاع بوته (۲۲/۳۳ سانتی‌متر)، وزن خشک شاخساره (۱۸/۳۳ گرم) و وزن خشک ریشه (۳/۰۷ گرم) در گیاهان در بسترهای کاشت بدون کاربرد ورمی‌کمپوست و بدون مایه‌کوبی با محرک‌های زیستی و در تیمار تنش قطع آبیاری در ابتدای گلدهی بدست آمد (جدول ۳).

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر محرک‌های زیستی و ورمی‌کمپوست بر برخی پارامترهای رشدی و عناصر غذایی مرزه (*Satureja hortensis*) در شرایط تنش خشکی

Table 2. ANOVA of biological stimulants and vermicompost effects on some growth parameters and nutrients of *Satureja hortensis* under drought stress conditions

S.O.V.	d.f.	M.S.				
		Plant height	Shoots dry weight	Roots dry weight	K	P
Replication	2	178.9**	19.04^{ns}	31.7**	0.002^{ns}	0.014**
Irrigation regimes (I)	2	4223.99**	1357**	10.8**	0.368**	0.714**
Vermicompost (V)	3	609.1**	283**	2.84**	2.322**	9.982**
Bacteria (B)	2	222.6**	102.4**	1.44**	0.025**	0.138**
I×V	6	13.04**	8.96**	0.187**	0.005**	0.117**
I×B	4	10.57**	6.48**	0.114**	0.043**	0.121**
V×B	6	11.12**	7.23**	0.218**	0.004**	0.134**
I×B×V	12	16.78**	8.45**	0.118**	0.051**	0.108**
Experimental error	90	3.82	1.57	0.017	0.0016	0.014
C.V. (%)		4.65	6.51	4.3	5.85	5.09

n.s. and **: non-significant and significant at 1% probability level, respectively

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی × ورمی‌کمپوست × محرک‌های زیستی

بر برخی شاخص‌های رشد رویشی مرزه (***Satureja hortensis***)

Table 3. Means comparison of drought stress × vermicompost × biological stimulants interaction on some vegetative growth parameters of *Satureja hortensis*

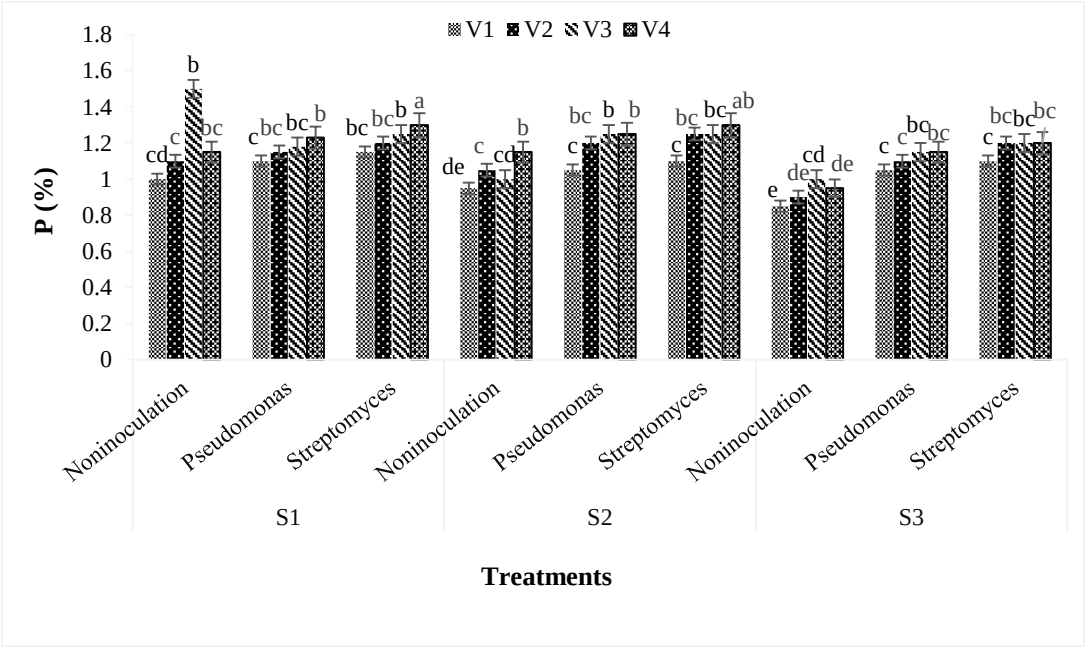
Drought stress	Vermicompost	PBRM inoculation	Plant height (cm)	Shoots dry weight (g)	Roots dry weight (g)
S1	V1	No inoculation	35.44^{jk}	18.33^{ef}	3.07^{cd}
		Pseudomonas	39.97^{hi}	19.77^{de}	4.40^{b}
		Streptomyces	41.54^{hi}	21.03^{cd}	4.25^{b}
	V2	No inoculation	47^{fg}	20.3^{de}	3.33^{cd}
		Pseudomonas	54.66^{de}	19.77^{de}	4.25^{bc}
		Streptomyces	56.44^{fc}	21.03^{cd}	4.88^{b}
	V3	No inoculation	52.33^{de}	20.3^{de}	3.3^{cd}
		Pseudomonas	58.67^{ab}	22.02^{cd}	5.05^{b}
		Streptomyces	59.63^{ab}	24.35^{bc}	5.85^{ab}
	V4	No inoculation	55.60^{cd}	24^{bc}	3.93^{bc}
		Pseudomonas	60.37^{ab}	26.6^{ab}	5.45^{ab}
		Streptomyces	62.26^{a}	28.72^{a}	6.35^{a}
S2	V1	No inoculation	36.66^{jk}	13.45^{hi}	2.78^{de}
		Pseudomonas	40.54^{hi}	16.65^{fg}	3.63^{cd}
		Streptomyces	43.21^{gh}	18.18^{gf}	3.9^{bc}
	V2	No inoculation	39.66^{jk}	17^{fg}	2.9^{de}
		Pseudomonas	43.05^{gh}	19.25^{de}	3.61^{cd}
		Streptomyces	44.55^{gh}	20.67^{de}	4.10^{bc}
	V3	No inoculation	45^{gh}	21.66^{cd}	3.26^{cd}
		Pseudomonas	46.49^{fg}	23.83^{bc}	3.87^{bc}
		Streptomyces	51.42^{gf}	24.44^{bc}	4.54^{b}
	V4	No inoculation	46.33^{fg}	22.33^{cd}	3.4^{cd}
		Pseudomonas	50.48^{ef}	24.28^{bc}	3.92^{c}
		Streptomyces	52.82^{de}	26.9^{a}	4.74^{b}
S3	V1	No inoculation	22.33^{o}	9.0^{j}	2.3f^{g}
		Pseudomonas	29.62^{im}	13.69^{gh}	2.96^{de}
		Streptomyces	32.65^{ki}	14.57^{gh}	3.05^{cd}
	V2	No inoculation	27.33^{mn}	10.66^{ij}	2.58^{e}
		Pseudomonas	35.49^{jk}	15.35^{gh}	3.08^{cd}
		Streptomyces	37.66ij	16.8fg	3.54^{bc}
	V3	No inoculation	32.33^{ki}	12^{hi}	2.69^{de}
		Pseudomonas	39.47^{h}i	16.5^{fg}	3.2^{cd}
		Streptomyces	42.15^{gh}	18.85^{gf}	3.4^{cd}
	V4	No inoculation	34^{jh}	14.^{gh}	2.89^{de}
		Pseudomonas	40.95^{hi}	18.25^{gf}	3.38^{cd}
		Streptomyces	42.85^{gh}	19.37^{de}	3.65^{bc}

PBRM: Plant beneficial rhizospheric microorganism; S1- Full irrigation, S2- Water cut at 50% of flowering, S3- Water cut during early stages of flowering; V1, V2, V3, and V4: 0, 1, 1.5, and 2 ton vermicompost.ha^{-1}, respectively

In each column, means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (Duncan test).

فسفر

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که تنش خشکی، محرک‌های زیستی، ورمی‌کمپوست و اثر متقابل آنها بر میزان جذب فسفر در گیاه مرزه تأثیر معنی‌داری داشته است (جدول ۲). همچنین نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثرهای متقابل تنش خشکی، ورمی‌کمپوست و محرک‌های زیستی نشان داد که در شرایط تنش خشکی، درصد جذب فسفر به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. درحالی که مایه‌کوبی با محرک‌های زیستی و کاربرد ورمی‌کمپوست توانست میزان جذب فسفر را در شرایط تنش خشکی بهبود ببخشد. به‌طوری که بیشترین میزان جذب فسفر (۱/۳٪) در شرایط بدون تنش، کاربرد دو تن در هکتار ورمی‌کمپوست و مایه‌کوبی با باکتری استرپتومایسس حاصل شد و کمترین میزان جذب فسفر (۰/۸۵٪) نیز در گیاهان در بسترهای کاشت بدون کاربرد ورمی‌کمپوست و بدون مایه‌کوبی با محرک‌های زیستی در تیمار تنش قطع آبیاری در ابتدای گلدهی بدست آمد (شکل ۱).



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر تنش خشکی × ورمی‌کمپوست × محرک‌های زیستی بر میزان فسفر مرزه (***Satureja hortensis***)

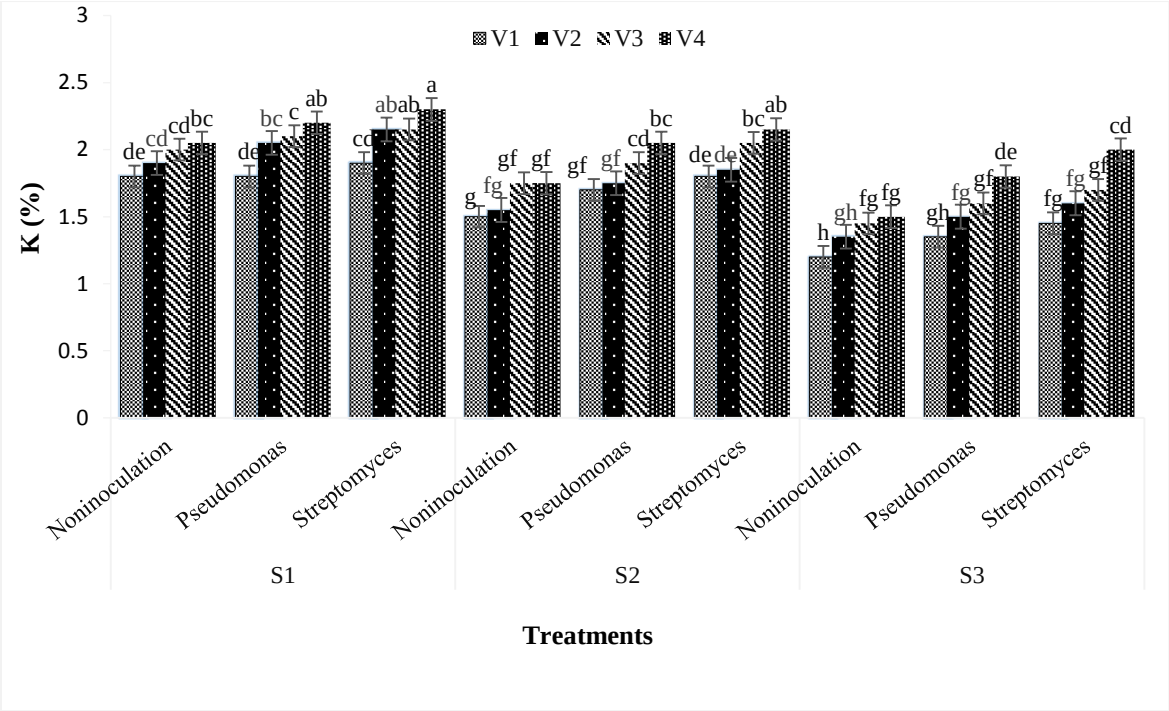
Figure 1. Means comparison of drought stress × vermicompost × biological stimulants effects on phosphorus content of *Satureja hortensis*

S1- Full irrigation, S2- Water cut at 50% of flowering, S3- Water cut during early stages of flowering;
V1, V2, V3, and V4: 0, 1, 1.5, and 2 ton vermicompost.ha^{-1}, respectively
Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (Duncan test).

پتاسیم

براساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین، اثرهای متقابل تنش خشکی، ورمی‌کمپوست و محرک‌های زیستی نشان داد که در شرایط تنش خشکی، درصد جذب پتاسیم گیاه مرزه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. مایه‌کوبی با محرک‌های زیستی و کاربرد ورمی‌کمپوست توانست اثرهای نامطلوب تنش خشکی را کاهش دهد، به‌طوری که بیشترین میزان جذب پتاسیم (۲/۳٪) در شرایط بدون تنش، کاربرد ۲ تن در

هکتار ورمی‌کمپوست و مایه‌کوبی با استرپتومایسس حاصل شد و کمترین میزان جذب پتاسیم (۱/۲٪) نیز در گیاهان در بسترهای کاشت بدون کاربرد ورمی‌کمپوست و بدون مایه‌کوبی با محرک‌های زیستی در تیمار تنش قطع آبیاری در ابتدای گلدهی بدست آمد (شکل ۲).



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر تنش خشکی × ورمی‌کمپوست × محرک‌های زیستی بر میزان پتاسیم مرزه (*Satureja hortensis*)

Figure 2. Means comparison of drought stress × vermicompost × biological stimulants effects on potassium content of *Satureja hortensis*

S1- Full irrigation, S2- Water cut at 50% of flowering, S3- Water cut during early stages of flowering; V1, V2, V3, and V4: 0, 1, 1.5, and 2 ton vermicompost.ha^{-1}, respectively
Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (Duncan test).

اجزای اسانس

با توجه به نتایج آنالیز اسانس مرزه به‌وسیله دستگاه GC، ۳۰ ترکیب تشکیل‌دهنده اسانس شناسایی گردید که ۱۲ ترکیب غالب آن در تیمارهای مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. سه ترکیب اصلی اسانس مرزه در این تحقیق براساس میزان درصد آنها شامل کارواکرول، گاما-ترپینن و آلفا-ترپینن بودند. بالاترین میزان کارواکرول (۶۲٪) و گاما-ترپینن (۲۶/۹٪) در تیمار تنش خشکی شدید و بسترهای حاوی ۲ تن در هکتار ورمی‌کمپوست و گیاهان مایه‌کوبی شده با باکتری استرپتومایسین حاصل شد و کمترین مقدار کارواکرول (۵۳٪) و گاما-ترپینن (۲۱/۵٪) در تیمار آبیاری کامل، بدون ورمی‌کمپوست و بدون مایه‌کوبی با محرک‌های زیستی بدست آمد (جدول ۴). بیشترین میزان ترکیب آلفا-ترپینن (۵/۴٪) در تیمار آبیاری کامل و بسترهای حاوی ۲ تن در هکتار ورمی‌کمپوست در گیاهان مایه‌کوبی نشده حاصل شد و کمترین میزان این ترکیب (۳/۱٪) در تیمار تنش خشکی ملایم و بسترهای حاوی یک تن در هکتار ورمی‌کمپوست و گیاهان مایه‌کوبی شده با باکتری استرپتومایسس بدست آمد (جدول ۴).

جدول ۴- اثر متقابل تنش خشکی × ورمی‌کمپوست × محرک‌های زیستی بر اجزای اسانس مرزه (***Satureja hortensis***)

Table 4. Drought stress × vermicompost × biological stimulants interaction on *Satureja hortensis* essential oil compounds

Drought stress	Vermicompost	PBRM inoculation	*α*-thujene	*α*-pinene	*β*-pinene	*P*-cymene	*γ*-terpinene	carvacrol
RI			927	933	976	1014	1080	1282
S1	V1	No inoculation	1.9	1.6	0.3	3.5	21.5	53
		Pseudomonas	1.5	1.2	0.1	2.7	21.9	55.2
		Streptomyces	1.7	1.3	0.1	2.8	22.9	56
	V2	No inoculation	1.3	1.2	0.4	2.8	22.6	54.5
		Pseudomonas	1.4	1	0.35	2.8	23	55.5
		Streptomyces	1.8	1.25	0.25	3	23.9	57
	V3	No inoculation	1.8	1.2	0.45	3.1	23.5	55.1
		Pseudomonas	1.9	1.1	0.2	2.8	24.5	57
		Streptomyces	1.9	1	0.2	2. 5	24.7	57.3
	V4	No inoculation	2.04	1.3	0.2	3.2	24.2	55.5
		Pseudomonas	1.4	1.2	0.5	2.9	24.7	56.5
		Streptomyces	1.65	1.1	0.2	2.7	24.9	58
S2	V1	No inoculation	1.6	1.5	0.8	3.5	21.5	53.8
		Pseudomonas	1.5	1.3	0.6	2.6	21.5	54.8
		Streptomyces	1.5	1.2	0.5	2.7	23.6	57
	V2	No inoculation	1.57	1.5	0.9	3. 6	23.5	54.2
		Pseudomonas	1.27	0.9	0.55	1.5	24.6	56.3
		Streptomyces	1.7	1	0.15	2.3	25.2	58
	V3	No inoculation	1.35	1.5	0.7	3.1	23.5	56.1
		Pseudomonas	1.1	0.8	0.5	1.3	25.6	58
		Streptomyces	1.75	1.2	0.4	2.5	23.5	58.6
	V4	No inoculation	1.2	13	0.8	2. 5	23.8	56.4
		Pseudomonas	1.25	1.25	0.4	2.1	24.7	59.5
		Streptomyces	1.4	1	0.2	2.8	25.3	60.7
S3	V1	No inoculation	2.3	1.2	0.5	3.4	22.5	54.1
		Pseudomonas	1.25	0.6	0.4	1.8	25.1	55.5
		Streptomyces	1.1	0.9	0.1	2.5	24.5	56
	V2	No inoculation	1.3	1.6	0. 4	3.6	22.9	55
		Pseudomonas	1.2	1.3	0.4	1.4	23.2	57.6
		Streptomyces	1.1	1	0.5	1.7	24.1	59.3
	V3	No inoculation	1.43	1.5	0.55	2.7	24.1	57
		Pseudomonas	1.25	1.1	0.25	2.8	24.8	57.8
		Streptomyces	1.1	0.7	0.5	1.1	25.5	59.7
	V4	No inoculation	1.24	1.3	0. 6	2.4	25	58
		Pseudomonas	1.1	0.9	0.25	1.6	26.4	61
		Streptomyces	1.2	0.7	0.9	1.8	26.9	62

ادامه جدول ۴- ...

Continued Table 4. …

Drought stress	Vermi compost	PBRM inoculation	myrcene	α-phellandrene	α-terpinene	caryophyllene	β-bisabolene	β-germacrene
RI			981	999	1011	1424	1501	1542
S1	V1	No inoculation	1.1	0.5	5.2	0.5	0.5	0.14
		Pseudomonas	0.8	0.55	3.5	0.3	0.4	0.11
		Streptomyces	0.9	0.5	3.7	0.4	0.4	0.12
	V3	No inoculation	1.7	0.44	4.2	0.5	0.5	0.1
		Pseudomonas	1.7	0.3	3.6	0.3	0.3	0.11
		Streptomyces	1.4	0.25	3.3	0.25	0.4	0.1
	V4	No inoculation	1.1	0.45	5.4	0.3	0.6	0.1
		Pseudomonas	1.5	0.4	4.8	0.2	0.25	0.1
		Streptomyces	1.2	0.3	3.9	0.3	0.2	0.15
S2	V1	No inoculation	2	0.6	5.3	0.5	0.3	0.1
		Pseudomonas	1.4	0.6	4.2	0.4	0.2	0.2
		Streptomyces	1.4	0.5	3.4	0.4	0.3	-
	V2	No inoculation	0.8	0.4	4.6	0.4	-	0.25
		Pseudomonas	1.5	0.4	4.6	0.5	0.1	-
		Streptomyces	1.4	0.3	3.1	0.65	0.2	0.1
	V3	No inoculation	1.7	0.3	5.3	0.5	0.3	0.1
		Pseudomonas	1.6	0.3	4.2	0.3	0.2	0.15
		Streptomyces	1.3	0.35	4.7	0.4	0.4	0.17
	V4	No inoculation	1.8	0.6	3.5	0.6	0.5	0.2
		Pseudomonas	1.2	0.1	3.5	0.25	0.3	-
		Streptomyces	1	0.1	3.4	0.2	0.4	0.1
S3	V1	No inoculation	1.5	0.2	4.5	0.3	0.5	0.1
		Pseudomonas	1.2	0.1	3.7	0.2	0.3	0.2
		Streptomyces	0.9	0.1	3.7	0.3	0.25	0.25
	V2	No inoculation	0.7	0.8	3.6	-	0.3	0.2
		Pseudomonas	1.1	0.3	3.8	0.1	0.2	0.1
		Streptomyces	1.6	0.2	3.7	0.2	0.3	0.1
	V3	No inoculation	1.3	0.2	4.5	0.3	0.3	0.25
		Pseudomonas	1.1	0.25	4.2	0.2	0.2	-
		Streptomyces	1.5	0.15	3.2	0.4	0.3	-
	V4	No inoculation	1.3	0.3	4.9	0.5	0.5	0.2
		Pseudomonas	1.6	0.2	3.4	0.3	0.3	-
		Streptomyces	1.3	0.5	3.3	0.4	0.4	0.1

PBRM: Plant beneficial rhizospheric microorganism; S1- Full irrigation, S2- Water cut at 50% of flowering, S3- Water cut during early stages of flowering; V1, V2, V3, and V4: 0, 1, 1.5, and 2 ton vermicompost.ha^{-1}, respectively

بحث

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که در شرایط تنش خشکی صفات رویشی کاهش یافتند و بیشترین کاهش در زمان اعمال تنش خشکی در اوایل گلدهی حاصل شد. نتایج بدست آمده از این پژوهش با یافته‌های سایر محققان به شرح زیر همسو است. تنش خشکی باعث کاهش ارتفاع گیاه، اندام هوایی و عملکرد در گیاهان مرزه (*Satureja hortensis*)، (Rezaei-Chiyaneh *et al*., 2023)، مریم‌گلی (*Salvia officinalis*) (Aslani *et al*., 2023) و آویشن (*Thymus vulgaris* L.) (Amani Machiani *et al*., 2021) شد. در شرایط تنش کمبود آب، جذب عناصر غذایی در اطراف ریشه به دلیل کمتر بودن تحرک و سرعت انتشار مواد معدنی کاهش می‌یابد (Hussain *et al*., 2018). در این تحقیق استفاده از کودهای زیستی موجب بهبود عملکرد گیاه مرزه در هر دو شرایط بدون تنش و تنش گردید. وقتی گیاهان در شرایط محیطی نامطلوب مانند انواع تنش‌ها قرار می‌گیرند، رشد آنها به‌دلیل عدم تعادل در جذب و انتقال عناصر غذایی دچار اختلال می‌شود. کودهای زیستی مانند ورمی‌کمپوست با بهبود خواص فیزیکی محیط رشد، افزایش فعالیت ریزجانداران موجود در خاک، افزایش ظرفیت

نگهداری آب و بهبود جذب عناصر غذایی باعث بهبود عملکرد گیاهان در شرایط تنش خشکی می‌شود (Özenç, 2008). تأثیر مثبت کاربرد ورمی‌کمپوست در پژوهش‌های دیگر مبنی بر افزایش شاخص‌های رشد، عملکرد و بهبود صفات مورفولوژیکی و متابولیت‌های ثانویه نسبت به تیمار شاهد در گیاه دارویی بادرشبو (*Dracocephalum moldavica* L.)، (Mafakheri *et al*., 2012) و مرزه (Rahimi & Babakhanzadeh Sejirani, 2020) گزارش شده است که با نتایج بدست آمده از این تحقیق مطابقت دارد. جذب بهتر مواد غذایی توسط گیاهان در بسترهای حاوی ورمی‌کمپوست نشان می‌دهد که بهبود رشد ریشه و یا جذب مواد غذایی در ریشه ممکن است یکی از سازوکارهای اصلی در تحریک رشد گیاه باشد (Pant *et al*., 2009). همچنین در این تحقیق نقش مثبت باکتری استرپتومایسس و باکتری سودوموناس بر پارامترهای رشدی در شرایط تنش خشکی مشاهده گردید. سازوکارهای احتمالی که باکتری‌های محرک رشد از طریق آنها باعث بهبود رشد و عملکرد گیاهان در شرایط تنش خشکی می‌شوند شامل افزایش فعالیت آنزیم ۱- آمینوسیکلو پروپان ۱- کربوکسیلات (ACC) دآمیناز (Arshad *et al*., 2008)، افزایش میزان هورمون‌هایی مانند اکسین و سایتوکینین (Ansary *et al*., 2012) و بهبود جذب عناصر غذایی می‌باشد (Gosal *et al*., 2010). مطابق با نتایج این تحقیق بیشترین میزان ارتفاع بوته، وزن تر و خشک اندام هوایی و طول ریشه در گیاه سورگوم (*Great millet*) مایه‌کوبی شده با باکتری *Streptomyces laurentii* در شرایط ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی بدست آمد (kour *et al*., 2020). کودهای آلی (ورمی‌کمپوست و کمپوست) می‌توانند رشد گیاه و جذب فتوسنتز را با افزایش سطح برگ و ظرفیت فعالیت فتوسنتزی در مرحله قبل از گلدهی افزایش دهند (Rahimi *et al*., 2023). در راستای نتایج این تحقیق، مایه‌کوبی گیاه مرزنجوش با میکروارگانیسم‌های محرک رشد (ازتوباکتر و قارچ مایکوریزا) در شرایط بدون تنش میزان وزن تر و خشک را به‌ترتیب ۱۷/۱٪ و ۳۴/۴٪ افزایش داد. درحالی که در شرایط تنش اختلاف معنی‌داری با شاهد مشاهده نشد (Mahmood *et al*., 2023).

براساس نتایج بدست آمده میزان جذب فسفر و پتاسیم در شرایط تنش خشکی کاهش یافت. درحالی که مایه‌کوبی با باکتری‌های محرک رشد به‌ویژه استرپتومایسس میزان عناصر پتاسیم و فسفر را در اندام هوایی گیاه مرزه هم در شرایط تنش و هم در شرایط بدون تنش بهبود بخشید. در شرایط تنش، گیاهان با محدودیت‌های مواد مغذی مانند فسفر مواجه هستند که بر رشد آنها تأثیر می‌گذارد. اگر چه فسفر در خاک به دو صورت آلی و ارگانیک به فراوانی وجود دارد اما به‌صورت نامحلول بوده و برای گیاهان قابل جذب نیست (Sharma *et al*., 2013). باکتری‌های محرک رشد با سازوکارهای مختلفی ازجمله تولید اسیدهای آلی، اسیدهای معدنی و ترشح پروتون موجب کاهش pH ریزوسفر شده، در نتیجه سبب افزایش فراهمی عناصر غذایی برای گیاه می‌گردند (Glick, 2012). به‌علاوه باکتری‌های محرک رشد سطح ریشه را برای جذب آب و مواد مغذی بهبود بخشیده و با سنتز هورمون‌های گیاهی مانند اکسین‌ها، سیتوکینین‌ها و جیبرلین‌ها رشد گیاه را افزایش و در برابر تنش‌های محیطی مقاومت ایجاد می‌کنند (Zaidi *et al*., 2015). مطابق با نتایج این تحقیق افزایش میزان فسفر و پتاسیم در مرزه مایه‌کوبی شده با باکتری *Pseudomonas fluorescens* WCS417 گزارش شده است (Khalediyan *et al*., 2021). *Streptomyces laurentii* به‌عنوان باکتری محرک رشد، سازگار با خشکی و حل کننده فسفر گزارش شده است که در ریزوسفر خاک می‌تواند برای مقابله با کمبود آب و غلبه بر مشکل عدم دسترسی فسفر به سیستم‌های گیاهی کمک کند (Kour *et al*., 2020). همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش میزان ورمی‌کمپوست در واحد سطح میزان جذب فسفر و پتاسیم افزایش یافت. ورمی‌کمپوست حاوی عناصر در فرم‌هایی ازجمله نیترات‌ها، فسفر قابل تبادل، پتاسیم محلول، کلسیم و منیزیم هستند که قابلیت دسترسی برای جذب سطحی ریشه و یا جذب توسط گیاهان را دارند (Pramanik *et al*., 2007). در راستای نتایج این تحقیق با

کاربرد کودهای زیستی (ورمی‌کمپوست، کمپوست معمولی و کود حیوانی) میزان عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم در اندام هوایی آویشن افزایش یافت و بیشترین میزان عناصر به‌ترتیب در کاربرد ورمی‌کمپوست، کمپوست معمولی، کود حیوانی و گیاهان شاهد مشاهده شد (Rahimi *et al*., 2023). در شرایط کمبود آب، گیاهان به دلیل کاهش ظرفیت ماتریکس خاک که منجر به عدم تعادل یونی و کمبود مواد مغذی می‌شود، هم در معرض کمبود آب و هم تنش اسمزی قرار می‌گیرند. در این شرایط، کودهای آلی سیستم ریشه‌ای را گسترش داده و جذب عناصر غذایی را بهبود می‌بخشد و همچنین شرایط بهتری را برای جذب آب توسط گیاهان فراهم می‌کند (Ievinsh *et al*., 2020).

نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داد که میزان کارواکرول و گاما-ترپینن به‌عنوان اجزای اصلی اسانس مرزه در شرایط تنش خشکی و مایه‌کوبی با میکروارگانیسم افزایش یافت. به‌علاوه کاربرد ورمی‌کمپوست میزان این ترکیبات را در شرایط تنش خشکی در مقایسه با شرایط بدون تنش افزایش داد. در راستای نتایج این تحقیق، Rezaei-Chiyaneh و همکاران (۲۰۲۳) ترکیبات کارواکرول (۴۳/۳۲-۳۸/۷۸٪)، گاما-ترپینن (۳۷/۳۹-۲۶/۸۲٪) و آلفا-ترپینن (۶/۸۸-۴/۰۱٪) را به‌عنوان اجزای اصلی اسانس مرزه معرفی کردند، که در اثر مایه‌کوبی با باکتری سودوموناس فلورسنس و پوتیدا و در شرایط خشکی میزان این ترکیبات افزایش یافت. مایه‌کوبی گیاه مرزه با میکروارگانیسم‌های ازتوباکتر و قارچ میکوریزا میزان کارواکرول و تیمول را در مقایسه با گیاهان مایه‌کوبی نشده در همه تیمارهای آبیاری افزایش داد، در شرایط تنش خشکی شدید مایه‌کوبی با میکروارگانیسم‌ها میزان کارواکرول و تیمول را به‌ترتیب ۷۷/۱٪ و ۲۰/۵٪ افزایش داد (Mahmood *et al*., 2023). بیوسنتز اجزای اسانس مربوط به تولید ترپن‌های با ارزش است که می‌تواند به‌عنوان پاسخ دفاعی به تنش‌های مختلف در نظر گرفته شود (Selmar & Kleinwächter, 2013). گزارش شده است که عوامل محیطی مانند تنش آبی و مایه‌کوبی با کودهای زیستی می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر مسیر بیوسنتزی و تجمع ترکیبات طبیعی تأثیر بگذارد، همچنین نشان داده شد که با استفاده از قارچ‌های میکوریزا یا ریزوباکتری‌ها، تولید ترپن‌های ارزشمند در گیاه نیز تغییر می‌کند (Banchio *et al*., 2008). Mohammadi و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که مایه‌کوبی گیاه مرزه با باکتری سودوموناس فلورسنس به‌طور قابل توجهی موجب افزایش بیوماس گیاه و برخی از اجزای اسانس در شرایط تنش آبی گردید. تأثیر مثبت PGPRها در تغییر میزان ترکیبات اسانس در گیاهانی مانند *Origanum onites* L. نشان می‌دهد که در حضور میکروارگانیسم‌هایی مانند سودوموناس فلورسنس و سودوموناس پوتیدا، بیشترین میزان ترکیبات بورنئول، تیمول و کارواکرول در گیاهان مایه‌کوبی شده بدست آمد (Kutlu *et al*., 2019). استفاده از کودهای آلی مانند کمپوست ممکن است موجب بهبود ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و افزایش در دسترس بودن برخی از عناصر مانند نیتروژن شود که هم منجر به افزایش ماده خشک شده، هم باعث افزایش غلظت ترکیبات فیتوشیمیایی گیاهان می‌شوند (Saki *et al*., 2019؛ Heidarpour *et al*., 2019). مایه‌کوبی گیاه مریم‌گلی (*S. officinalis*) در سطوح مختلف تنش خشکی (۱۰۰، ۷۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) با باکتری سودوموناس فلورسنس موجب بهبود عملکرد اسانس و میزان آلفا-توجون به‌عنوان ترکیب اصلی اسانس گیاه مریم‌گلی گردید (Aslani *et al*., 2023).

براساس نتایج بدست آمده می‌توان بیان کرد، کاربرد همزمان ورمی‌کمپوست و ریزجانداران محرک رشد شامل باکتری‌های محرک رشد استرپتومایسس و سودوموناس در بیشتر صفات مورفولوژیک و جذب عناصر غذایی اثر هم‌افزایی داشته و سبب تعدیل اثرهای تنش کم آبی در این گیاه شد. در این پژوهش کاربرد همزمان باکتری استرپتومایسس و ۲ تن در هکتار ورمی‌کمپوست در مزرعه باعث تولید پایدار و بهبود رشد و عملکرد گیاه دارویی مرزه در شرایط تنش خشکی گردید.

References

- Ahmadi, Sh., Sefidkon, F., Abbaszadeh, B. and Farhadi, M., 2023. Evaluation of the effect of nutrition on the quantity and quality of *Satureja khuzestanica* Jamzad essential oils in ecological conditions of Khorramabad. ECO phytochemistry of medicinal plants, 11(1): 36-48.
- Amani Machiani, M., Javanmard, A., Morshedloo, M.R., Aghaee, A. and Maggi, F., 2021. *Funneliformis mosseae* inoculation under water deficit stress improves the yield and phytochemical characteristics of thyme in intercropping with soybean. Scientific Reports, 11: 15279.
- Ansary, M.H., Asadi Rahmani, H., Ardakani, M.R., Paknejad, F., Habibi, H. and Mafakheri, S., 2012. Effect of *Pseudomonas fluorescent* on Proline and Phytohormonal Status of Maize (*Zea mays* L.) under Water Deficit Stress. Annals of Biological Research, 3(2): 1054-1062.
- Arshad, M., Shaharoona, B. and Mahmood, T., 2008. Inoculation with *Pseudomonas* spp. Containing ACC-Deaminase Partially Eliminates the Effects of Drought Stress on Growth, Yield, and Ripening of Pea (*Pisum sativum* L.). Pedosphere, 18(5): 611-620.
- Aslani, Z., Hassani, A., Mandoulakani, B.A., Barin, M. and Maleki, R., 2023. Effect of drought stress and inoculation treatments on nutrient uptake, essential oil and expression of genes related to monoterpenes in sage (*Salvia officinalis*). Scientia Horticulturae, 309: 111610.
- Banchio, E., Bogino, P.C., Zygadlo, J. and Giordano, W., 2008. Plant growth promoting rhizobacteria improve growth and essential oil yield in *Origanum majorana* L. Biochemical Systematics and Ecology, 36(10): 766-771.
- Bahadur, A., Batool, A., Nasir, F., Jiang, S., Mingsen, Q., Zhang, Q. and Feng, H., 2019. Mechanistic insights into arbuscular mycorrhizal fungi-mediated drought stress tolerance in plants. International journal of molecular sciences, 20(17): 1-18.
- Danaee, E. and Abdossi, V., 2022. The effects of drought stress and sodium nitroprusside on growth indices and enzymatic activity of *Satureja hortensis*. Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology), 35(2): 326-341.
- Darakeh, S.A.S.S., Weisany, W., Tahir, N.A.R. and Schenk, P.M., 2022. Physiological and biochemical responses of black cumin to vermicompost and plant biostimulants: Arbuscular mycorrhizal and plant growth-promoting rhizobacteria. Industrial Crops and Products, 188: 115557.
- De Ridder, N. and Van Keulen, H., 1995. Estimating biomass through transfer functions based on simulation model results: a case study for the Sahel. Agricultural water management, 28(1): 57-71.
- Devnarain, N., Crampton, B.G., Chikwamba, R., Becker, J.V.W. and Kennedy, M.M., 2016. Physiological responses of selected African sorghum landraces to progressive water stress and re-watering. South African Journal of Botany, 103: 61-69.
- Ghosh, D., Lin, Q., Xu, J. and Hellmann, H.A., 2017. How plants deal with stress: Exploration through proteome investigation. Frontiers in plant science, 8: 1176.
- Goswami, M. and Suresh, D.E.K.A., 2020. Plant growth-promoting rhizobacteria alleviators of abiotic stresses in soil: a review. Pedosphere, 30(1): 40-61.
- Goswami, D., Thakker, J.N. and Dhandhukia, P.C., 2016. Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A review. Cogent Food and Agriculture, 2(1): 1127500.
- Gontaru, L., Plander, S. and Simandi, B., 2008. Investigation of *Satureja hortensis* L. as a possible source of natural antioxidants. Hungarian Journal of Industry and Chemistry, 36: 39-42.
- Gosal, S.K., Karlupia, A., Gosal, S.S., Chhibba, M. and Varma, A., 2010. Biotization with *Piriformospora indica* and *Pseudomonas fluorescens* improves survival rate, nutrient acquisition, field performance and saponin content of micropropagated Chlorophytumsp. Indian Journal of Biotechnology, 9: 289-297.
- Goudjal, Y., Zamoum, M., Sabaou, N., Mathieu, F. and Zitouni, A., 2016. Potential of endophytic Streptomyces spp. for biocontrol of Fusarium root rot disease and growth promotion of tomato seedlings. Biocontrol Science and Technology, 26(12): 1691-1705.
- Glick, B.P., 2012. Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. Scientifica, 2012: 963401.
- Hamada, A.M. and EL-enany, A.E., 1994. Effect of NaCl salinity on growth, pigment and mineral element contents, and gas exchange of broad bean and pea plants. Biologia Plantarum, 36: 75-81.
- Heidarpour, O., Esmaielpour, B., Soltani, A.A. and Khorramdel, S., 2019. Effect of vermicompost on essential oil composition of (*Satureja hortensis* L.) under water stress condition. Journal of Essential Oil Bearing Plants, 22(2): 484-492.

- Hussain, H.A., Hussain, S., Khaliq, A., Ashraf, U., Anjum, S.A., Men, S. and Wang, L., 2018. Chilling and drought stresses in crop plants: Implications, cross talk, and potential management opportunities. Frontiers in plant science, 9: 1-21.
- Ievinsh, G., Andersone-Ozola, U. and Zeipiņa, S., 2020. Comparison of the effects of compost and vermicompost soil amendments in organic production of four herb species. Biological Agriculture and Horticulture, 36(4): 267-282.
- Jahani, M., Besharati, H. and Golchin, A., 2011. Effect of iron and zinc enriched vermicompost on plant dry weight and seedling emergence of corn single crass 704. Iranian Journal of Soil Research, 25(1): 33-38.
- Khan, M.S., Zaidi, A., Wani, P.A. and Oves, M., 2009. Role of plants growth–promotin g rhizobacteria in the remediation of metal contaminated soil. Environmental chemistry letters,7: 1-19.
- Kleinwachter, M. and Selmar, D., 2014. New insights explainthat drought stress enhances the quality of spice and medicinal plants: potential applications. Environmental chemistry letters, 35: 121-131.
- Khosropour, E., Weisany, W., Tahir, N.A.R. and Hakimi, L., 2021. Vermicompost and biochar can alleviate cadmium stress through minimizing its uptake and optimizing biochemical properties in Berberis integerrima bunge. Environmental Science and Pollution Research, 29(12): 17476-17486.
- Khalediyan, N., Weisany, W. and Schenk, P.M., 2021. Arbuscular mycorrhizae and rhizobacteria improve growth, nutritional status and essential oil production in *Ocimum basilicum* and *Satureja hortensis*. Industrial Crops and Products, 160: 113163.
- Kutlu, M., Cakamkci, R., Hosseinpour, A. and Karagoz, H., 2019. The use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR)s effect on essential oil rate, essential oil content, some morphological parameters and nutrient uptake of Turkish oregano. Applied Ecology and Environmental Research, 17(2): 1641-1653.
- Kour, D., Rana, K.L., Kaur, T., Sheikh, I., Yadav, A.N., Kumar, V. and Saxena, A.K., 2020. Microbe-mediated alleviation of drought stress and acquisition of phosphorus in great millet (*Sorghum bicolour* L.) by drought-adaptive and phosphorus-solubilizing microbes. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 23: 101501.
- Lightfield, J., Fram, N.R. and Ely, B., 2011. Across bacterial phyla, distantly-related genomes with similar genomic GC content have similar patterns of amino acid usage. PLoS One, 6(3): e17677.
- Lotfi, M., Abbaszadeh, B. and Mirza, M., 2014. The effect of drought stress on morphology, proline content and soluble carbohydrates of tarragon (*Artemisia dracunculus* L.). Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants, 30(1): 19-29.
- Mahmood, G., Porang, K., Mohammad, N. and Hamid, L., 2023. Effects of Salicylic Acid and Microorganisms on Morphological and Physiological Characteristics (*Satureja hortensis* L.) under Drought Stress. European Journal of Biology, 82(1): 12-22.
- Mafakheri, S., Omidbaigi, R., Sefidkon, F. and Rejali, F., 2012. Effect of vermicompost, biophosphate and azotobacter on quantity and quality of essential oil of *Dracocephalum moldavica* L. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 27(4): 596-605.
- Mohammadi, H., Dashi, R., Farzaneh, M., Parviz, L. and Hashempour, H., 2017. Effects of beneficial root pseudomonas on morphological, physiological, and phytochemical characteristics of *Satureja hortensis* (Lamiaceae) under water stress. Brazilian Journal of Botany, 40(1): 41-48.
- Nagananda, G.S., Das, A., Bhattacharya, S. and Kalpana, T., 2010. *In vitro* studies on the effects of biofertilizers (Azotobacter and Rhizobium) on seed germination and development of *Trigonella foenum-graecum* L. using a novel glass marble containing liquid medium. International Journal of Botany, 6: 394-403.
- Nasiroleslami, E., Mozafari, H., Sadeghi-Shoae, M., Habibi, D. and Sani, B., 2021. Changes in yield, protein, minerals, and fatty acid profile of wheat (*Triticum aestivum* L.) under fertilizer management involving application of nitrogen, humic acid, and seaweed extract. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 21(4): 2642-2651.
- Omid Beigi, R., 2001. Production and Processing of Medicinal Plants. Vol. 3, Edition 5, Tehran, Astan Quds Razavi Publishing House, Tehran, Iran, 400p (In Persian).
- Özenç, D.B., 2008. Growth and transpiration of tomato seedlings grown in hazelnut husk compost under water-deficit stress. Compost Science and Utilization, 16: 125-131.
- Parsa, M., Kamaei, R. and Yousefi, B., 2022. Effect of chemical and biological fertilizers on the physiological characteristics and activity of some antioxidant enzymes of peppermint (*Mentha piperita*) under drought stress conditions. Journal of

Plant Research (Iranian Journal of Biology), 35(4): 866-881.
- Pant, A.P. Radovich, T.J., Hue, N.V., Talcott, S.T. and Krenek, K.A., 2009. Vermicompost extracts influence growth,mineral nutrients, phytonutrients and antioxidant activity in pak choi (*Brassica rapa* cv. Bonsai, Chinensis group) grown under vermicompost and chemical fertiliser. Journal of the Science of Food and Agriculture, 89: 2383-2392.
- Pramanik, P., Ghosh, G.K., Ghosal, P.K. and Banik, P., 2007. Changes in organic C, N, P and K and enzyme activities in vermicompost of biodegradable organic wastes under liming and microbial inoculants. Bioresource Technology, 98: 2485-2494.
- Rahimi, A. and Babakhanzadeh Sejirani, E., 2021. Effect of vermicompost and some macro-elements on growth, absorption of nutrients and quantity and quality of savory essential oil (*Satureja hortensis* L). Plant Production Research, 27(4): 133-149.
- Rahimi, A., Gitari, H., Lyons, G., Heydarzadeh, S., Tuncturk, M. and Tuncturk, R., 2023. Effects of vermicompost, compost and animal manure on vegetative growth, physiological and antioxidant activity characteristics of *Thymus vulgaris* L. Under water stress. Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences, 33(1): 40-53.
- Rezaei-Chiyaneh, E., Mahdavikia, H., Alipour, H., Dolatabadian, A., Battaglia, M. L., Maitra, S. and Harrison, M.T., 2023. Biostimulants alleviate water deficit stress and enhance essential oil productivity: a case study with savory. Nature, Scientific Reports, 13(1): 720.
- Saeednejad, A.H. and Rezvani Moghaddam, P., 2010. Effect of compost, vermicompost and cattle manure on yield, yield components and oil content of *Cuminum cyminum*. Horticultural Science, 24: 142-148. (in Persian)
- Sadeghi, A., Karimi, E., Dahaji, P.A., Javid, M.G., Dalvand, Y. and Askari, H., 2012. Plant growth-promoting activity of an auxin and siderophore producing isolate of Streptomyces under saline soil conditions. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 28: 1503-1509.
- Saha, S., Jeon, B.H., Kurade, M.B., Govindwar, S.P., Chatterjee, P.K., Oh, S.E. and Lee, S.S., 2019. Interspecies microbial nexus facilitated methanation of polysaccharidic wastes. Bioresource technology, 289: 121638.
- Saki, A., Mozafari, H., Asl, K.K., Sani, B. and Mirza, M., 2019. Plant yield, antioxidant capacity and essential oil quality of *Satureja mutica* supplied with cattle manure and wheat straw in different plant densities. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 50(21): 2683-2693.
- Selmar, D. and Kleinwächter, M., 2013. Stress enhances the synthesis of secondary plant products: the impact of stress-related over-reduction on the accumulation of natural products. Plant and Cell Physiol, 6(54): 817-826.
- Sharma, S.B., Sayyed, R.Z., Trivedi, M.H. and Gobi, T.A., 2013. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. SpringerPlus, 2: 587.
- Van Loon, L.C., 2007. Plant response to plant growth-promoting rhizobacteria. European Journal of Plant Pathology, 119: 243-254.
- Weisany, W., Raei, Y., Salmasi, S.Z., Sohrabi, Y. and Ghassemi-Golezani, K., 2016. Arbuscular mycorrhizal fungi induced changes in rhizosphere, essential oil and mineral nutrients uptake in dill/common bean intercropping system. Annals of Applied Biology, 169(3): 384-397.
- Zaidi, Z., Ahmad, E., Saghir Khan, M., Saif, S. and Rizvi, A., 2015. Role of plant growth promoting rhizobacteria in sustainable production of vegetables: current perspective. Scientia Horticulturae, 193: 231-239.