



The Effect of Biofertilizers and Biochar on Morphophysiological Characteristics, Antioxidant Capacity and Yield of Dragonhead (*Dracocephalum moldavica*) Under Defficit Irrigation

Seyed Mostafa Mousavi Ghahfarokhi¹ | Mehdi Madandoust^{2✉} |
Mohamad Rahim Owji³ | Farhad Mohajeri⁴

1. Department of Agronomy, Fa.C., Islamic Azad University, Fasa, Iran. E-mail: seyedmostafa.mousavighahfarokhi@iau.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agronomy, Fa.C., Islamic Azad University, Fasa, Iran. E-mail: mehdi.madandoust@iau.ac.ir
3. Department of Agronomy, Fa.C., Islamic Azad University, Fasa, Iran. E-mail: mohamadrahim.owji@iau.ac.ir
4. Department of Agronomy, Fa.C., Islamic Azad University, Fasa, Iran. E-mail: farhad.mohajeri@iau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 8 February 2026
Received in revised form
10 May 2026
Accepted 10 August 2026
Published online 22 September 2026

Keywords:

Proline
Water stress
Pseudomonas
Catalase
Mycorrhiza

ABSTRACT

Objective: Drought stress is one of the most serious consequences of climate change and a major constraint on plant growth and productivity, particularly in arid and semi-arid regions. The medicinal plant dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) is highly sensitive to severe drought stress, which leads to reduced yield. The use of environmentally friendly approaches, such as biofertilizers and organic amendments, may improve photosynthesis, enhance yield, and increase drought tolerance. This study evaluated the effects of drought stress and the application of *Pseudomonas fluorescens* strain P-169, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), and biochar on the morphological traits, chlorophyll content, and biomass yield of dragonhead.

Method: The experiment was conducted at a research farm in Shiraz during the 2023 and 2024 growing seasons, using a split-plot arrangement in a randomized complete block design with three replications. Irrigation treatments were assigned to main plots at three levels corresponding to irrigation after 25% (I1, control), 50% (I2), and 75% (I3) soil moisture depletion. Eight fertilizer treatments were allocated to subplots: F1 (control), F2 (mycorrhiza), F3 (*Pseudomonas*), F4 (biochar), F5 (mycorrhiza+ *Pseudomonas*), F6 (mycorrhiza+ biochar), F7 (*Pseudomonas*+ biochar), and F8 (mycorrhiza+ *Pseudomonas*+ biochar). After confirming data normality and homogeneity across the experimental years, a combined analysis of variance was performed using SAS software (v. 9.2), and means were compared using Duncan's multiple range test at the 5% significance level.

Results: Drought stress significantly affected all measured traits. The highest plant height, number of lateral branches, number of flowering branches, and chlorophyll a and b contents were obtained under the I1 treatment, whereas drought stress caused a significant decline in these traits. Among fertilizer treatments, F8 produced the highest values for most characteristics. The I1F8 combination resulted in the maximum stem diameter (0.85 cm), total chlorophyll content (24.3 mg g⁻¹), total biomass yield (2348 kg ha⁻¹), and combined leaf and flower yield (1792 kg ha⁻¹). In contrast, the I3F1 treatment exhibited the lowest values, representing reductions of 34%, 74%, 72.3%, and 66.7%, respectively, relative to I1F8.

Conclusion: Overall, the results indicate that drought stress, by disrupting nutrient uptake and chlorophyll synthesis, reduces the vegetative characteristics and yield of this medicinal plant. The combined application of *Pseudomonas*, mycorrhizal fungi, and biochar can serve as an effective and sustainable strategy for mitigating drought stress by improving soil properties, strengthening the plant photosynthetic system, and alleviating the negative impacts of drought, ultimately leading to a significant increase in plant productivity.

Cite this article: Mousavi Ghahfarokhi, S. M., Madandoust, M., Owji, M., R., & Mohajeri, F. (2026). The effect of biofertilizers and biochar on morphophysiological characteristics, antioxidant capacity and yield of Dragonhead (*Dracocephalum moldavica*) under deficit irrigation. *Journal of Crops Improvement*, 28 (3), 393-415. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2026.410759.2974>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2026.410759.2974>

Publisher: University of Tehran Press.



اثر کودهای زیستی و بیوجار بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژی، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و عملکرد گیاه بادرشویه (*Dracocephalum moldavica*) در شرایط کم‌آبایی

سید مصطفی موسوی قهفرخی^۱ | مهدی مدن‌دوست^۲ | محمد رحیم اوجی^۳ | فرهاد مهاجری^۴

۱. گروه زراعت، واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، فسا، ایران. رایانامه: seyedmostafa.mousavighahfarokhi@iau.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت، واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، فسا، ایران. رایانامه: mehdi.madandoust@iau.ac.ir
۳. گروه زراعت، واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، فسا، ایران. رایانامه: mohamadrhim.owji@iau.ac.ir
۴. گروه زراعت، واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، فسا، ایران. رایانامه: farhad.mohajeri@iau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۳۱

هدف: تنش خشکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های ناشی از تغییر اقلیم، بر رشد و عملکرد گیاهان، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، اثر سوء به‌دنبال دارد. گیاه دارویی ارزشمند بادرشویه، در مواجهه با تنش شدید خشکی حساس بوده و عملکرد آن کاهش می‌یابد. به‌کارگیری راه‌کارهای سازگار با محیط زیست از قبیل کودهای زیستی و آلی می‌تواند نقش مؤثری در بهبود فتوسنتز، عملکرد و افزایش تحمل به خشکی داشته باشد. این پژوهش با هدف بررسی اثر تنش خشکی و کاربرد باکتری سودوموناس فلورسنس سویه P-169، مایکوریزا آربوسکولار و بیوجار بر ویژگی‌های مورفولوژیک، محتوای کلروفیل و عملکرد بادرشویه انجام شد.

روش پژوهش: آزمایش در مزرعه پژوهشی در شهرستان شیراز به‌صورت کرت‌های یک‌بار خردشده در قالب بلوک کامل تصادفی در سه تکرار طی سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ اجرا شد. کرت‌های اصلی شامل تیمارهای آبیاری ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد تخلیه رطوبتی (I_1 ، I_2 و I_3) و کرت‌های فرعی شامل شاهد (F_1)، قارچ مایکوریزا (F_2)، باکتری سودوموناس (F_3)، بیوجار (F_4)، مایکوریزا+ سودوموناس (F_5)، مایکوریزا+ بیوجار (F_6)، سودوموناس+ (F_7) مایکوریزا+ سودوموناس+ بیوجار (F_8) بود. پس از جمع‌آوری داده‌ها و اطمینان از نرمال بودن آن‌ها و همگنی سال‌های آزمایش، تجزیه واریانس مرکب با نرم‌افزار SAS v.9.2 و مقایسه میانگین‌ها نیز با آزمون دانکن (سطح احتمال پنج درصد) انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که تیمارهای آزمایش اثر معنی‌داری بر ویژگی‌های موردبررسی به‌دنبال داشت. بیش‌ترین ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی و تعداد شاخه گل‌دهنده، محتوای کلروفیل a و b به‌ترتیب با میانگین‌های ۶۶/۸ سانتی‌متر، ۱۶/۸، ۱۶/۵، ۱۳/۴ میلی‌گرم بر گرم و ۵/۸ میلی‌گرم بر گرم در تیمار I_1 مشاهده شد و با اعمال تنش خشکی از مقادیر ویژگی‌ها به‌طور معنی‌داری کاسته شد. همچنین، تیمار کودی F_8 بیش‌ترین مقادیر ویژگی‌های بیان‌شده را به‌خود اختصاص داد. ترکیب تیماری I_1F_8 بیش‌ترین قطر ساقه (۰/۸۵ سانتی‌متر)، کلروفیل کل (۲۴/۳ میلی‌گرم بر گرم)، عملکرد زیستی (۲۳۴۸ کیلوگرم بر هکتار) و عملکرد برگ و گل (۱۷۹۲ کیلوگرم بر هکتار) را به‌خود اختصاص داد و کم‌ترین مقادیر با ۳۴، ۷۴، ۷۲/۳ و ۶۶/۷ درصد کاهش برای ترکیب تیماری I_3F_1 ثبت شد.

نتیجه‌گیری: در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی با ایجاد اختلال در جذب مواد مغذی و ساخت کلروفیل منجر به کاهش ویژگی‌های رویشی و عملکرد گیاه دارویی بادرشویه می‌شود و حضور هم‌زمان سودوموناس، مایکوریزا و بیوجار به‌عنوان یک مدیریت پایدار تنش خشکی عمل کرده و از طریق بهبود ویژگی‌های خاک، تقویت سامانه فتوسنتزی گیاه و تعدیل اثر سوء خشکی عملکرد گیاه را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد.

کلیدواژه‌ها:

پرولین
تنش خشکی
سودوموناس
کاتالاز
مایکوریزا

استناد: موسوی قهفرخی، سید مصطفی؛ مدن‌دوست، مهدی؛ رحیم اوجی، محمد و مهاجری، فرهاد (۱۴۰۵). اثر کودهای زیستی و بیوجار بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژی، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و عملکرد گیاه بادرشویه (*Dracocephalum moldavica*) در شرایط کم‌آبایی. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۸ (۳)، ۳۹۳-۴۱۵. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2026.410759.2974>



۱. مقدمه

امروزه کشاورزی به دلیل افزایش جمعیت و نیاز به تولید پایدار، با چالش‌های جدی مواجه می‌باشد. در این شرایط، کمبود منابع آب و تنش خشکی ناشی از آن، به عنوان یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی می‌تواند بر رشد و عملکرد گیاهان در بسیاری از مناطق جهان، به ویژه مناطق خشک و نیمه خشک، اثر نامطلوب داشته و هدررفت تولید کشاورزی را افزایش دهد (میرطیپی و همکاران، ۱۴۰۱). در میان تنش‌های محیطی، خشکی تنش چندبعدی بوده و بر فرایندهای مورفولوژیک، فیزیولوژیک و عملکرد گیاهان اثر سوء دارد (نارایاناسامی^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). تنش خشکی فتوسنتز و تثبیت دی‌اکسیدکربن را کاهش و تولید گونه‌های فعال اکسیژن را افزایش می‌دهد، در نتیجه، تنش اکسیداتیو منجر به آسیب به پروتئین‌ها، DNA و لیپیدها می‌شود. بنابراین رشد، تقسیم سلول‌ها و در نهایت، عملکرد گیاه محدود شده و در موارد شدید مرگ گیاه اتفاق می‌افتد (راگالی^۲ و همکاران، ۲۰۲۳).

سازوکار دفاعی گیاه در مواجهه با تنش خشکی سازگاری اسمزی می‌باشد که این سازش می‌تواند توسط سنتز ترکیب‌های محلول درون سلولی فراهم شود. زمانی که گیاه در شرایط تنش خشکی قرار می‌گیرد، تجزیه پروتئین‌ها و در نتیجه، افزایش آمینواسیدها و آمیدها تسریع می‌شود. یکی از این آمینواسیدها پرولین می‌باشد که به عنوان یک ماده محلول منجر به تنظیم فشار اسمزی، کاهش هدررفت آب از سلول، حفظ آماس سلولی، کاهش فعالیت آنزیم‌ها، جلوگیری از تجزیه پروتئین‌ها، افزایش پایداری برخی از آنزیم‌های سیتوپلاسمی و میتوکندریایی و در نتیجه، حفاظت از سیستم‌های غشایی می‌شود. نقش حفاظتی پرولین به جز تنظیم اسمزی به دلیل توانایی آن در مهار گونه‌های فعال اکسیژن و بافر کردن پتانسیل احیایی سلول در شرایط تنش می‌باشد (کشاورزفرد و همکاران، ۱۳۹۹).

تنش خشکی با اختلال در انتقال الکترون در کلروپلاست‌ها و میتوکندری و تولید گونه‌های واکنشی اکسیژن از قبیل سوپراکسید و H_2O_2 ، آسیب به لیپیدها و اسیدهای نوکلئیک و اکسیداسیون پروتئین‌ها را به دنبال دارد (محمدي-چراغ‌آبادی^۳ و همکاران، ۲۰۲۱). در این شرایط آنزیم کاتالاز به طور اختصاصی H_2O_2 را به آب و اکسیژن تبدیل می‌کند. فعالیت آنزیم کاتالاز به طور معمول در مرحله اولیه یا متوسط پاسخ به خشکی افزایش می‌یابد تا بار H_2O_2 را کاهش دهد (السید^۴ و همکاران، ۲۰۱۹).

از نظر اقلیمی، بخش عمده مساحت ایران جزء مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود و خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی در این منطقه از جهان به شمار می‌آید. بنابراین، کشت گیاهان دارویی متحمل به خشکی می‌تواند یکی از راه کارهای مقابله با تنش خشکی باشد (سلیمی و همکاران، ۱۳۹۹). گیاه دارویی بادرشویه^۵ متعلق به خانواده Lamiaceae، به دلیل برخورداری از ویژگی‌های ضدویروسی و ضدقارچی در صنایع غذایی، آرایشی و بهداشتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بادرشویه گیاهی علفی و یک ساله می‌باشد که ساقه، برگ و گل آن معطر و دارای اسانس بوده و حاوی ترکیب‌هایی از قبیل سیترال و استات‌ژرانیل می‌باشد. مواد مؤثره اندام‌های رویشی این گیاه به عنوان قابض، کاهش دهنده تب، تقویت قلب، آرام بخش و اشتها آور استفاده می‌شود (گلستانی، ۱۳۹۹).

در شرایط وقوع تنش‌های محیطی از جمله خشکی، چنانچه گیاه به طور مناسبی با کودهای زیستی تغذیه شود، قادر به کاهش اثر نامطلوب تنش می‌باشد. این در حالی است که به دلیل کاربرد طولانی مدت کودهای شیمیایی در کشاورزی

1. Narayanasamy

2. Ragályi

3. Mohammadi-Cheraghbabadi

4. ElSayed

5. *Dracocephalum moldavica*

افزون بر ایجاد چالش‌های بهداشتی و زیست‌محیطی، کاهش ماده آلی خاک به‌وقوع پیوسته است. بنابراین، استفاده از کودهای زیستی و آلی می‌تواند به‌عنوان مکمل کودهای شیمیایی، پایداری تولید در نظام‌های کشاورزی را تضمین کند. کاربرد این قبیل کودها مزایایی از قبیل افزایش جذب عناصر، بهبود ساختمان خاک، تحریک رشد گیاه، افزایش عملکرد کمی و کیفی گیاه و مقاومت به تنش‌های محیطی را به‌دنبال دارد (راگالی و همکاران، ۲۰۲۳). کودهای زیستی به مواد حاصلخیزکننده‌ای اطلاق می‌شود که شامل تعداد کافی از یک یا چند گونه از جانداران مفید خاک‌زی بوده که در بستری از مواد نگه‌دارنده قرار دارد. به‌عبارت دیگر، این نوع کودها حاوی گونه‌های میکروبی مؤثر جهت فراهم‌سازی عناصر موردنیاز گیاه می‌باشد. این ریزجانداران شامل باکتری‌های ریزوسفری تثبیت‌کننده نیتروژن مولکولی به‌صورت همزیست، آزادزی و همیار، باکتری‌ها و قارچ‌های حل‌کننده فسفات، قارچ‌های حل‌کننده سیلیکات، قارچ‌های میکوریزا و غیره می‌باشند (اسرا^۱ و همکاران، ۲۰۲۳).

استفاده از قارچ‌های میکوریزای آربوسکولار جذب عناصر مغذی توسط گیاه را افزایش می‌دهد، چرا که شبکه‌ای گسترده فراتر از مناطق دسترسی ریشه گیاه به مواد غذایی را فراهم می‌کند (یانگ^۲ و همکاران، ۲۰۲۴). باکتری‌های محرک رشد نیز نقش حلالیت و افزایش دسترسی زیستی عناصر معدنی را داشته و به‌طور مستقیم با تثبیت نیتروژن و تولید هورمون‌های رشد و به‌طور غیرمستقیم با تولید انواع آنتی‌بیوتیک‌ها و سیدروفورها منجر به کاهش و یا ممانعت از اثر نامطلوب تنش‌های زیستی و غیرزیستی شده و در نتیجه، رشد و عملکرد گیاهان را بهبود می‌بخشند (سلیمی و همکاران، ۱۳۹۹). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که باکتری‌های سودوموناس با تولید اگزوپلی‌ساکاریدها و حفظ محتوای رطوبت خاک منجر به افزایش تحمل به تنش خشکی می‌شوند. افزون بر این، ترکیب‌های آلی فرار باکتریایی از قبیل اسید استیک با تشکیل بیوفیلم در خاک به افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش خشکی کمک می‌کند (بروجنی^۳ و همکاران، ۲۰۲۱).

بیوپار یک ترکیب کربنی آلی پایدار و مقاوم بوده و از حرارت‌دهی زیست‌توده، در دمای بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در شرایط اکسیژن کم، به‌طور ترجیحی بدون اکسیژن، تولید می‌شود. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که یکی از ویژگی‌های مهم بیوپار افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک می‌باشد، چرا که سطح ویژه بالایی در توزیع اندازه ذرات و تخلخل خاک ایجاد کرده و منجر به کاهش چگالی ظاهری می‌شود. از آنجایی که مقدار آب در دسترس گیاه، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل فیزیکی خاک به‌شدت بر تولید گیاه مؤثر می‌باشد، کاربرد بیوپار منجر به افزایش ظرفیت نگهداری آب می‌شود. همچنین، بیوپار در شرایط تنش خشکی، با تقویت سامانه آنتی‌اکسیدانتی گیاه و متعادل‌سازی اسمولیت‌ها از قبیل قندهای محلول و پروتئین‌ها از آسیب اکسیداتیو و پراکسیداسیون لیپیدی جلوگیری می‌کند و در نتیجه، تولید کلروفیل، رشد و زیست‌توده گیاه در شرایط کم‌آبی حفظ می‌شود (زمان^۴ و همکاران، ۲۰۲۴).

به‌دلیل گسترش خشک‌سالی جهانی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تغییر الگوی کاشت گیاهان در این مناطق اهمیت فراوانی دارد. همچنین، در سال‌های اخیر به اهمیت ترکیب‌های آلی بستر کاشت از قبیل بیوپار و همچنین، اثر مثبت کودهای زیستی در افزایش رشد و عملکرد گیاهان در شرایط تنش‌های محیطی از جمله تنش خشکی، توجه بسیاری شده است. بنابراین، این پژوهش به ارزیابی اثر بیوپار، قارچ میکوریزا و باکتری سودوموناس بر ویژگی‌های رویشی، فیزیولوژیکی و عملکرد گیاه دارویی بادرشویه در شرایط تنش خشکی پرداخته است.

1. Esraa
2. Yang
3. Boroujeni
4. Zaman

۲. پیشینه پژوهش

عوامل مورفولوژیک در گیاهان دارویی از قبیل تغییر سطح برگ، سطح و حجم تاج‌پوشش، وزن کل زیست‌توده، ارتفاع، قطر ساقه و غیره می‌تواند بر مقدار تحمل این گیاهان به تنش خشکی مؤثر باشد (گلستانی، ۱۳۹۹). در ارزیابی عملکرد و برخی ویژگی‌های زراعی اکوتیپ‌های گیاه بادرشویه در شرایط تنش خشکی، گلستانی (۱۳۹۹) بیان کرد که خشکی منجر به کاهش معنی‌دار وزن تر و خشک اندام هوایی، ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی و قطر ساقه گیاه شد. در بررسی تحمل به تنش خشکی در گیاه دارویی استوبا^۱، نتایج نشان داد که ارتفاع، وزن تر اندام هوایی، قطر و حجم تاج‌پوشش، حجم، سطح و وزن تر و خشک ریشه و محتوای کلروفیل b با اعمال تنش رطوبتی در سطح یک درصد کاهش یافت (عسکرزاد و همکاران، ۱۳۹۸).

در پژوهشی بر گیاه دارویی زنیان^۲ نتایج نشان داد که استفاده از کودهای زیستی منجر به افزایش عملکرد زیستی گیاه شد (قیلاوی‌زاده^۳ و همکاران، ۲۰۱۳). دهقانی تفتی و همکاران (۱۳۹۷) در گیاه دارویی اسفرزه^۴ نشان دادند که بیش‌ترین عملکرد زیستی و عملکرد برگ و گل در ترکیب تیماری تنش شوری ۲/۵ دسی‌زیمنیس بر متر و کاربرد تلفیقی قارچ *Glomus intraradices* و باکتری *Pseudomonas fluorescens* به‌دست آمد. این پژوهش‌گران اظهار داشتند که اگرچه شوری بالای آب آبیاری می‌تواند اثر منفی بر عملکرد گیاه دارویی داشته باشد، اما بهره‌گیری از کودهای زیستی می‌تواند بخشی از این اثر سوء را جبران کند. در مطالعه خاشعی سیوکی و همکاران (۱۳۹۸) نتایج حکایت از بیش‌ترین ارتفاع بوته، وزن تر و خشک گیاه زنیان در برهم‌کنش بیوجار و تنش آبی داشت. افزون بر این، کاربرد بیوجار به مقدار ۴۵ تن در هکتار در شرایط آبیاری کامل بیش‌ترین مقدار عملکرد و ویژگی‌های رشدی زنیان را به‌خود اختصاص داد. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که کاربرد تلفیقی بیوجار با کودهای زیستی در شرایط تنش خشکی بسیار مفید بوده و تحمل به خشکی را نسبت به استفاده جداگانه از آن‌ها بهبود می‌بخشد (زمان و همکاران، ۲۰۲۴؛ مالک^۵ و همکاران، ۲۰۲۴).

علی‌پور^۶ و همکاران (۲۰۲۱) با مطالعه اثر باکتری‌های محرک رشد بر گیاه رازیانه^۷ در شرایط تنش رطوبتی اعلام کردند که تلقیح این باکتری‌ها اثر معنی‌داری بر عملکرد زیستی، عملکرد دانه، عملکرد اسانس و محتوای کلروفیل داشت و منجر به کاهش اثر منفی تنش خشکی شد. در بررسی اثر باکتری‌های محرک رشد و سالیسیلیک‌اسید بر ویژگی‌های زراعی و محتوای اسانس گیاه دارویی بومادران^۸ در شرایط تنش خشکی، گزارش شد که اگرچه، تنش خشکی منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد گیاه می‌شود، اما کاربرد باکتری‌های محرک رشد و سالیسیلیک‌اسید اثر تنش خشکی را کاهش و عملکرد کمی و کیفی گیاه را افزایش می‌دهد (زارع‌پور و همکاران، ۱۴۰۳). کشاورزفرد و همکاران (۱۳۹۹) در بررسی کاربرد بیوجار و هیومیک‌اسید جهت افزایش مقاومت به تنش خشکی در گیاه گل آهار^۹، گزارش کردند که تنش خشکی کاهش مقدار فسفر و پتاسیم برگ‌ها و افزایش محتوای کاروتنوئید، نشت یونی و پرولین را به‌دنبال داشت. همچنین، برهم‌کنش بیوجار و هیومیک‌اسید بر محتوای کلروفیل a و کل، مقدار نیتروژن و فسفر معنی‌دار بود. در مطالعه‌ای دیگر، با کاربرد بیوجار همراه با قارچ مایکوریزا و باکتری‌های مفید در گیاه سیاهدانه^{۱۰}، افزایش وزن کپسول، عملکرد روغن و اسانس گزارش شد (رسولی - صادقیانی^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۳).

1. *Stevia rebaudiana* Bertoni

2. *Carum copticum*

3. Ghilavizadeh

4. *Plantago ovata* Forsk.

5. Malik

6. Alipour

7. *Foeniculum vulgare*

8. *Achillea millefolium* L.

9. Zinnia

10. *Nigella sativa*

11. Rasouli-Sadaghiani

همچنین، در گیاه نعنای فلفلی^۱ بیوچار محتوای اسانس و ترکیب‌های فنولی را به‌طور معنی‌داری افزایش داد (صفری^۲ و همکاران، ۲۰۲۳).

گزارش شده است که تلقیح گیاه با مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد اغلب منجر به افزایش پرولین و قندها می‌شود، زیرا گیاهان با فعال‌سازی سازوکارهای اسموتیک، افزایش بیان P5CS و مسیرهای کربوهیدراتی، خود را با خشکی تطبیق می‌دهند (هوانگ^۳ و همکاران، ۲۰۲۲). از سوی دیگر، پژوهش‌هایی وجود دارد که نشان داده‌اند کاربرد بیوچار همراه با باکتری‌های محرک رشد منجر به کاهش بخشی از بار تنش می‌شود. این موضوع به‌دلیل نگهداری مطلوب‌تر آب در خاک و کاهش تنش اکسیداتیو می‌باشد که منجر به کاهش مقدار پرولین نسبت به شاهد می‌شود (آن‌بوگانس^۴ و همکاران، ۲۰۲۴). در بررسی کاربرد بیوچار و هیومیک‌اسید جهت افزایش مقاومت به تنش خشکی در گیاه گل‌آهار، نتایج نشان داد که تنش خشکی افزایش محتوای کاروتنوئید، نشت یونی و پرولین را به‌دنبال داشت (کشاورزفرد و همکاران، ۱۳۹۹). گزارش شده که تنش خشکی منجر به افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی آنزیم در گیاه می‌شود. در گیاه خارمریم، تنش خشکی منجر به افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز شد که این پاسخ آنتی‌اکسیدانی هم در سطح فعالیت آنزیمی و هم در بیان ژنی مشاهده شد (ال‌سید و همکاران، ۲۰۱۹).

۳. روش‌شناسی پژوهش

این آزمایش در مزرعه پژوهشی در شهرستان شیراز، با مختصات جغرافیایی ۲۹ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی و ۵۲ درجه و ۳۲ دقیقه و در ارتفاع ۱۴۸۸ متری از سطح دریا انجام شد. قبل از شروع آزمایش از خاک مزرعه در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری صورت گرفت که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن در جدول (۱) مشاهده می‌شود. همچنین، ویژگی‌های آب‌وهوایی دوره رشد گیاه در طی سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ در جدول (۲) ارائه شده است. تیمارهای آزمایش شامل تیمارهای آبیاری در سه سطح (آبیاری پس از ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد تخلیه رطوبتی به‌ترتیب I₁، I₂ و I₃) در کرت‌های اصلی و تیمارهای کودی در هشت سطح (F₁: شاهد، F₂: قارچ مایکوریزای آربوسکولار، F₃: باکتری سودوموناس فلورسنس، F₄: بیوچار، F₅: مایکوریزا+ سودوموناس، F₆: مایکوریزا+ بیوچار، F₇: سودوموناس+ بیوچار و F₈: مایکوریزا+ سودوموناس+ بیوچار) در کرت‌های فرعی بود.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش طی سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳

سال	بافت خاک	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	اسیدیته	کربن آلی (درصد)	نیترژن (درصد)	فسفر	پتاسیم	مس (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	آهن	روی	منگنز
۱۴۰۲	لومی	۶/۰۱	۷/۹۲	۰/۵۲	۰/۱	۶	۲۱۵	۰/۲۲	۰/۹۵	۰/۸۳	۱
۱۴۰۳	لومی	۶	۷/۸۹	۰/۵۶	۰/۱	۶/۲	۲۱۹	۰/۲۳	۰/۹۷	۰/۸	۱

جهت آماده‌سازی مزرعه، ابتدا توسط گاواهن برگردان‌دار زمین شخم زده شد و سپس، با دیسک کلوخه‌ها خرد و با ماله تسطیح کامل انجام شد و در نهایت، فاروبندی صورت گرفت. با توجه به نتایج آزمون خاک (جدول ۱) کود نیتروژنی به‌مقدار ۱۵۰ کیلوگرم بر هکتار، طی سه تقسیط، مرحله شش برگی، ساقه‌دهی و شروع گلدهی، استفاده شد. کودهای

1. *Mentha piperita*
2. Saffari
3. Huang
4. Anbuganesan

فسفره و پتاسه به‌ترتیب از منبع سوپرفسفات تریپل و سولفات پتاسیم به‌مقدار ۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار، قبل از کاشت به‌صورت نواری و زیر خطوط کاشت قرار گرفت. هر کرت آزمایشی شامل پنج ردیف کاشت به‌طول سه متر و فاصله ۵۰ سانتی‌متر از یکدیگر در نظر گرفته شد و نشاها روی ردیف‌ها به فاصله ۲۰ سانتی‌متری از یکدیگر کاشته شد. فاصله بین کرت‌های اصلی، فرعی و تکرارها نیز به‌ترتیب دو، یک و دو متر بود.

نشاها در هر دو سال در اسفندماه کاشته شد و بلافاصله آبیاری صورت گرفت. آبیاری بوته‌ها تا زمان چهار برگی، به‌طور طبیعی (آبیاری پس از ۲۵ درصد تخلیه رطوبتی) صورت گرفت و سپس، تیمارهای تنش رطوبتی اعمال شد. تیمارهای آبیاری براساس درصد تخلیه رطوبت آب قابل استفاده خاک در عمق توسعه ریشه اعمال شد. اندازه‌گیری رطوبت خاک به‌روش وزنی و از طریق نمونه‌گیری‌های مکرر و روزانه خاک در وسط هر کرت انجام شد تا رطوبت تخلیه‌شده مشخص گردد. مقدار آب مصرفی برای هر کرت با در نظر گرفتن رطوبت ظرفیت زراعی خاک، مساحت هر کرت و عمق توسعه ریشه محاسبه شد. آبیاری هر تیمار تا رسیدن به رطوبت ظرفیت زراعی ادامه یافت. برای تعیین مقدار رطوبت خاک در شرایط ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم از دستگاه صفحه فشاری استفاده شد. جهت تکثیر باکتری محرک رشد، باکتری سودوموناس سویه P-169 با لوله آزمایشگاه روی محیط کشت NA به‌شکل زیگزاگی قرار گرفت. پس از رشد باکتری‌ها به‌مدت ۲۴ تا ۴۸ ساعت، ریشه نشاها در سوسپانسیون باکتری جهت دستیابی به تراکم مایه تلقیح 10^8 واحد تشکیل‌دهنده کلونی بر میلی‌لیتر، به‌مدت ۲۰ دقیقه قرار داده شد (بورد^۱ و همکاران، ۲۰۰۰). گونه مایکوریزای آربوسکولار از طریق کاشت سورگوم با اسپورهای قارچ مایکوریزای بخش پژوهش‌های بیولوژی مؤسسه تحقیقات خاک و آب ایران، تهیه شد. زامایه مایکوریزایی به‌صورت مخلوطی از اسپور، هیف، ریشه‌های تلقیح‌شده و ماسه‌بادی بود و در هر گرم خاک تعداد ۱۲۰ اسپور قارچ مایکوریزا وجود داشت (شنک^۲ و پرز^۳، ۱۹۹۰). در زمان کاشت ۵ گرم از خاک حاوی مایکوریزا به‌ازای هر بوته، مورداستفاده قرار گرفت. کاربرد بیوجار نیز قبل از کاشت به مقدار ۱۰ تن در هکتار در نظر گرفته شد. در طی دوران رشد گیاه عملیات مدیریت علف‌های هرز به‌صورت دستی انجام شد.

جهت استخراج و اندازه‌گیری مقدار کلروفیل a، b و کل، مقدار مشخصی از نمونه برگ در نیتروژن مایع، درون هاون کوبیده و ۲۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد به نمونه اضافه شد. سپس، به‌مدت ۱۰ در سانتریفیوژ با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه قرار گرفت و عصاره تولیدشده در فاز روئی در مووت اسپکتروفتومتر ریخته شد. که در نهایت، مقادیر کلروفیل a، b و کل در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر خوانده شد و براساس رابطه‌های (۱)، (۲) و (۳) زیر براساس میلی‌گرم بر گرم وزن تر به‌دست آمد (آرنون^۴، ۱۹۶۷). در مرحله گلدهی، ارتفاع بوته، تعداد شاخه گل‌دهنده و قطر ساقه تعیین شد. جهت اندازه‌گیری اسانس، عملکرد زیستی و عملکرد برگ و گل، در مرحله گلدهی گیاه نیز، از هر کرت ۱۰ بوته با رعایت اثر حاشیه انتخاب و از محل طوقه توسط قیچی چیده شد. نمونه‌ها بلافاصله در کیسه‌های نایلونی به آزمایشگاه انتقال یافت و به‌مدت ۱۰ روز در سایه و در هوای آزاد خشک و سپس، وزن خشک آن‌ها تعیین شد. جهت اندازه‌گیری مقدار اسانس، به این صورت که تعداد پنج گیاه پس از حذف اثر حاشیه انتخاب شد. سپس، مقدار ۵۰ گرم از اندام هوایی در هر کرت به‌صورت تصادفی انتخاب و به‌طور کامل آسیاب شد. سپس، درون بالن یک لیتری ریخته و ۷۵ میلی‌لیتر آب به آن اضافه شد. در نهایت، به‌مدت دو ساعت در اسانس‌گیر کلونجر، بازده اسانس به‌دست آمد (میکل^۵، ۱۹۷۶). برای اندازه‌گیری محتوای پروتئین، ۰/۵ گرم برگ تازه با ۱۰ میلی‌لیتر سولفوسالسیلیک‌اسید در هاون کوبیده و سپس، صاف شد. دو میلی‌لیتر از محلول صاف شده با دو میلی‌لیتر اسید ناین هیدرین به‌مدت یک ساعت در حمام آب گرم ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از خنک‌شدن، چهار میلی‌لیتر تولوئن اضافه و محلول حاصل به‌مدت ۱۵ تا

1. Burd
2. Schenck
3. Perez
4. Arnon
5. Miquel

۲۰ دقیقه شیک شد. در نهایت، مقدار جذب نور توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۲۵ نانومتر تعیین شد (باتس^۱ و همکاران، ۱۹۷۳). برای تعیین فعالیت آنزیم کاتالاز نیز ۰/۱ گرم نمونه منجمد برگ در سه میلی‌لیتر بافر فسفات سدیم ۲۵ میلی‌مولار با اسیدیته ۶/۸، عصاره‌گیری شد. همگن‌های حاصل با سرعت ۱۵۰۰۰ دور در دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ و از بخش روشن‌آور جهت سنجش فعالیت آنزیم استفاده شد. در نهایت، جذب نور در طول موج ۲۴۰ نانومتر خوانده شد (کاکماک^۲ و هورست^۳، ۱۹۹۱). پس از جمع‌آوری داده‌ها و بررسی نرمال‌بودن آن‌ها توسط نرم‌افزار SAS و همگنی سال-های آزمایش توسط آزمون بارتلت، تجزیه واریانس مرکب با نرم‌افزار SAS v.9.2 و مقایسه میانگین‌ها نیز با کمک آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

$$\text{Chlorophyll } a \text{ (mg g}^{-1}\text{FW)} = \frac{V_{\text{extract}} \times [12.7 \times A_{663} - 2.69 \times A_{646}]}{1000 \times W_{\text{tissue}}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{Chlorophyll } b \text{ (mg g}^{-1}\text{FW)} = \frac{V_{\text{extract}} \times [22.9 \times A_{645} - 4.69 \times A_{663}]}{1000 \times W_{\text{tissue}}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\text{Total Chlorophyll (mg g}^{-1}\text{FW)} = ((20.2 \times A_{645}) - (8.02 \times A_{663})) \times W \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در این روابط، A: مقدار جذب در طول موج موردنظر، V: حجم نهایی استون ۸۰ درصد برحسب میلی‌لیتر و W: وزن برگ تازه برحسب گرم می‌باشد.

جدول ۲. ویژگی‌های هواشناسی محل اجرای آزمایش طی سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳

ساعات آفتابی	میانگین رطوبت نسبی (درصد)	بارندگی (میلی‌متر)	میانگین بیشینه دما (درجه سانتی‌گراد)	میانگین کمینه دما (درجه سانتی‌گراد)	سال ۱۴۰۲
۲۴۹/۱	۴۹/۵	۱۱۲/۵	۱۸/۸	۵/۴	اسفند
۲۶۶/۹	۴۷/۹	۴/۵	۲۸/۹	۱۱/۵	فروردین
۳۱۵/۷	۴۲/۳	۰	۳۴/۹	۱۶/۱	اردیبهشت
۳۴۵/۶	۲۲/۶	۰/۲	۳۷/۴	۱۹/۴	خرداد
۳۵۵/۷	۲۳/۲	۰/۶	۴۰/۹	۲۲/۲	تیر
۳۱۷/۴	۲۸/۳	۴/۲	۴۰	۲۱/۹	مرداد
۳۲۵/۸	۲۷	۰	۳۵/۶	۱۵/۹	شهریور
۲۱۸۵/۲	۲۱۲/۵	۱۲۲	۳۳۶/۵	۱۱۲/۵	مجموع
۳۱۲/۱	۳۰/۳	-	۳۳/۷	۱۶	میانگین
سال ۱۴۰۳					
۲۳۱/۲	۵۰	۸۰/۳	۱۹/۴	۶/۷	اسفند
۳۰۰/۶	۳۲/۱	۳/۷	۲۹/۳	۱۲/۳	فروردین
۳۶۴/۲	۲۰/۳	۰	۳۵/۲	۱۷/۲	اردیبهشت
۳۵۱/۶	۱۷/۹	۰	۳۸	۱۸/۷	خرداد
۳۲۱/۱	۲۳/۸	۶/۸	۳۹/۵	۲۱/۶	تیر
۳۵۲	۲۱/۷	۰	۳۸/۸	۲۰/۶	مرداد
۳۰۷/۱	۲۲/۱	۰	۳۶	۱۶/۷	شهریور
۲۲۲۷/۸	۱۸۷/۹	۹۰/۸	۲۳۶/۲	۱۱۳/۸	مجموع
۳۱۸/۲	۲۶/۴	-	۳۳/۷	۱۶/۲	میانگین

۴. یافته‌های پژوهشی

۴.۱. کلروفیل a، b و کل

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثر ساده سال‌های آزمایش، تیمارهای آبیاری و کودی در سطح یک درصد بر محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی معنی‌دار می‌باشد. برهم‌کنش تیمارهای آبیاری و کودی نیز تنها بر مقدار کلروفیل کل در

سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). مطابق با مقایسه میانگین اثر سال‌های آزمایش (جدول ۴)، محتوای کلروفیل a، b و کل در سال اول به ترتیب ۱۸/۳، ۳۵/۲ و ۲۰/۸ درصد بیش‌تر از سال دوم بود. نتایج تیمارهای آبیاری نیز نشان داد که مقدار کلروفیل a و b در تیمار I₁ بیش‌ترین، میانگین به ترتیب ۱۳/۴ و ۵/۸ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ، و در تیمار I₃، به ترتیب ۴۴/۷ و ۷۰/۶ درصد کاهش، کم‌ترین مقدار می‌باشد (جدول ۵). نتایج تیمارهای کودی حکایت از افزایش محتوای کلروفیل a و b با کاربرد جداگانه و تلفیقی کودها در مقایسه با شاهد داشت. افزون بر این، کاربرد دوگانه کودها نسبت به کاربرد جداگانه آن‌ها و کاربرد هم‌زمان سه نوع کود (باکتری سودوموناس + قارچ مایکوریزا + بیوجار) نسبت به کاربرد دوگانه از برتری برخوردار بود، به طوری که تیمار شاهد به ترتیب ۴۳ و ۸۳/۳ درصد مقدار کلروفیل a و b کم‌تری در مقایسه با کاربرد سه‌گانه کودها تولید کرد (جدول ۶). براساس برهم‌کنش تیمارهای آبیاری و کودی (شکل ۱)، در تمامی تیمارهای کودی، با افزایش دسترسی گیاه به آب، مقدار کلروفیل کل از بیش‌ترین مقدار برخوردار بود. به طور مشابه با محتوای کلروفیل a و b، تیمارهای کودی توانستند مقدار کلروفیل کل را نسبت به شاهد بهبود داده و بیش‌ترین مقادیر به ترتیب به کاربرد تلفیقی هر سه کود، کاربرد دوگانه و تیمارهای انفرادی اختصاص داشت. بیش‌ترین و کم‌ترین محتوای کلروفیل کل با میانگین به ترتیب ۲۴/۳ و ۶/۳ میلی گرم بر گرم، مربوط به تیمارهای ترکیب I₁F₈ و I₃F₁ بود.

جدول ۳. تجزیه واریانس مرکب اثر تیمارهای آزمایش بر ویژگی‌های رویشی، رنگیزه‌های فتوسنتزی، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و عملکرد بادرشوبه

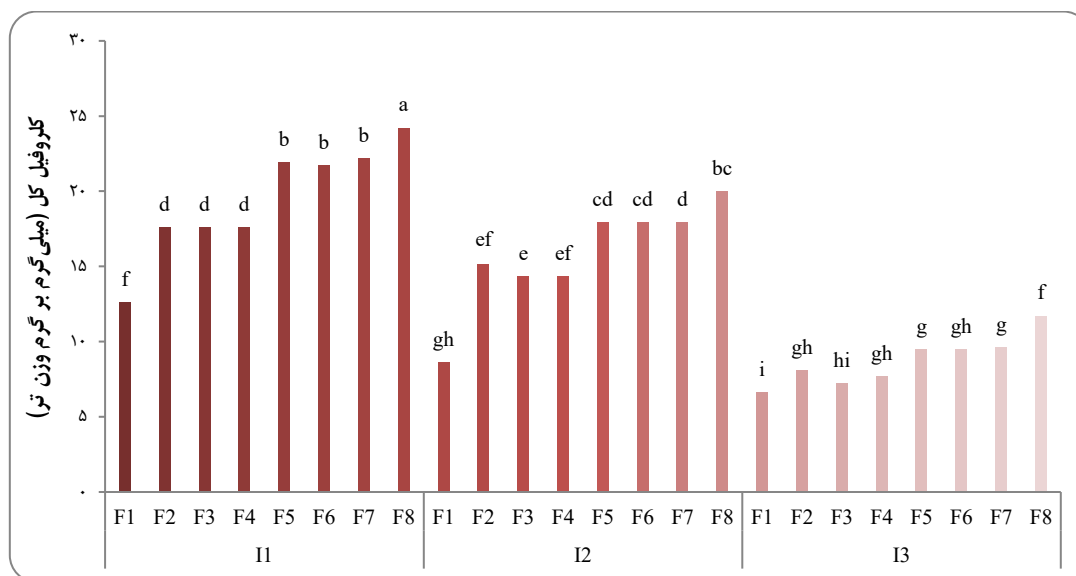
منابع تغییر	درجه آزادی	ارتفاع بوته	تعداد شاخه جانبی	تعداد شاخه گل‌دهنده	قطر ساقه	اسانس	عملکرد برگ و گل	عملکرد زیستی	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	محتوای پروبین	ضابحات کاتالاز
سال (۷)	۱	۸۷۹/۶**	۱۰۸۸/۸**	۳۹**	۰/۰۱**	۰/۰۱**	۸۱۸۵۱۲/۳**	۱۸۳۶۹۰۵/۸**	۱۱۷**	۳۳/۴**	۲۷۵/۶**	۳۵/۴**	۲۱**
تکرار (سال)	۴	۴۲۳	۶	۷	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۲	۲۹۸۶۴/۴	۲۶۲۰۹	۱۵/۴	۸/۶۲	۴۴/۳	۸/۸	۰/۶
رژیم آبیاری (a)	۲	۹۵۰۸**	۸۸۵/۶**	۳۵۰/۶**	۰/۳**	۰/۱**	۴۲۸۷۱۴۰/۷**	۷۴۰۳۵۱۳/۸**	۴۳۲/۷**	۲۱۶/۳**	۱۲۵۵**	۷۳۸/۸**	۱۲۱**
سال×آبیاری	۲	۲ns	۰/۹ns	۰/۰۳ns	۰/۰۰۰۱ns	۰/۰۰۰۲ns	۲۵۱۵۵/۵ns	۲۴۴۷۰ns	۵/۳ns	۰/۴ns	۰/۹ns	۰/۰۹ns	۲/۴**
خطای اول	۸	۵۹	۱/۵	۱/۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۶	۲۳۱۰۰/۸	۱۳۱۸۳/۳	۲/۲	۰/۴	۴	۱/۲	۰/۱
تیمار کودی (b)	۷	۱۵۶۰/۶**	۷۸/۲**	۷۴**	۰/۰۳**	۰/۰۳**	۶۴۵۹۷۷/۳**	۱۴۶۲۵۸۵/۵**	۵۵/۵**	۲۹**	۱۶۴**	۵۵**	۲۰**
سال×کود	۷	۳ns	۰/۰۹ns	۰/۰۳ns	۰/۰۰۰۴ns	۰/۰۰۰۱ns	۳۹۷۲ns	۳۴۸۱ns	۰/۲ns	۰/۱ns	۰/۶ns	۰/۱ns	۰/۱ns
آبیاری×کود	۱۴	ns۱۰/۲	ns۱/۵	ns۰/۵	۰/۰۰۰۴**	ns۰/۰۰۰۱	۴۸۳۳۱**	۴۷۲۷۲/۷**	ns۲	ns۱/۸	۷/۶	ns۰/۳	۳/۶**
سال×آبیاری×کود	۱۴	۱/۲ns	۰/۲ns	۰/۰۶ns	۰/۰۰۰۴ns	۰/۰۰۰۱ns	۳۹۱۹ns	۲۶۰۴/۷ns	۰/۳ns	۰/۰۳ns	۰/۳ns	۰/۳ns	۰/۱ns
خطای آزمایش	۸۴	۶۱/۷	۱	۱/۶	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۹	۱۲۰۳۹	۱۲۴۲۷/۲	۴/۲	۱	۳/۴	۱/۸	۰/۱۴
ضریب تغییرات (درصد)	-	۱۴/۷	۸/۸	۹/۴	۲	۷/۶	۱۰	۷/۷	۱۴/۷	۲۵	۱۲/۵	۱۲/۶	۱۹/۴

ns و * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم معنی‌داری براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر ساده سال‌های آزمایش بر ویژگی‌های رویشی، رنگیزه‌های فتوسنتزی و عملکرد بادرشوبه

سال‌های آزمایش	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	تعداد شاخه جانبی	تعداد شاخه گل‌دهنده	قطر ساقه (سانتی‌متر)	اسانس (درصد)	عملکرد زیستی (کیلوگرم بر هکتار)	عملکرد برگ و گل (کیلوگرم بر هکتار)	(میلی گرم بر گرم وزن تر) کلروفیل a	(میلی گرم بر گرم وزن تر) کلروفیل b	(میلی گرم بر گرم وزن تر) کلروفیل کل	(میلی گرم بر گرم وزن تر) پروبین
سال اول	۵۵/۶a	۱۲/۸a	۱۴/۲a	۰/۷a	۰/۳۱b	۱۵۶۰/۲a	۱۱۶۹/۴a	۱۱/۶a	۴/۶a	۱۶/۲a	۹/۵b
سال دوم	۵۰/۷b	۱۱b	۱۳/۲b	۰/۶۸b	۰/۳۳a	۱۳۳۴/۳b	۱۰۱۱/۶b	۹/۸b	۳/۴b	۱۳/۴b	۱۰/۵a

حروف مشابه در هر ستون فاقد معنی داری براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.



شکل ۱. برهم‌کنش تیمارهای آبیاری و کودی بر محتوای کلروفیل کل بادرشوبیه

حروف مشابه فاقد معنی‌داری براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

(I₁، I₂ و I₃ به‌ترتیب آبیاری پس از ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد تخلیه رطوبتی، F₁، F₂، F₄، F₅، F₆، F₇ و F₈ به‌ترتیب شاهد، مایکوریزا، سودوموناس، بیوجار، مایکوریزا+ سودوموناس، مایکوریزا+ بیوجار، سودوموناس+ بیوجار و مایکوریزا+ سودوموناس+ بیوجار)

۲.۴. ارتفاع بوته

مطابق با نتایج تجزیه واریانس مرکب، اثر ساده سال‌های آزمایش، تیمارهای آبیاری و کودی در سطح یک درصد بر ارتفاع بوته گیاه دارویی بادرشوبیه معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین ارائه‌شده در جدول (۴) نشان داد که در سال ۱۴۰۲ به‌دلیل افزایش ۳۴/۳ درصدی بارندگی در مقایسه با سال دوم، ارتفاع بوته بادرشوبیه ۹/۶ درصد در مقایسه با سال ۱۴۰۳ افزایش یافت (جدول ۲). نتایج هم‌چنین، نشان داد که بیش‌ترین ارتفاع بوته، میانگین ۶۶/۸ سانتی‌متر، متعلق به آبیاری I₁ می‌باشد و با کاهش آب در دسترس گیاه در تیمارهای I₂ و I₃ به‌ترتیب ۱۹ و ۴۲ درصد ارتفاع بوته با کاهش مواجه شد. نتایج تیمارهای کودی نیز حکایت از بیش‌ترین ارتفاع بوته با میانگین ۶۸ سانتی‌متر، در تیمار F₈ داشت. سپس، تیمارهای F₇، F₆ و F₅ بدون تفاوت با یکدیگر، مشاهده شد و جایگاه بعد به تیمارهای F₄، F₃ و F₂ اختصاص داشت. کم‌ترین ارتفاع بوته با کاهش ۴۳/۲ درصدی نسبت به F₈، مربوط به تیمار F₁ بود (جدول ۵).

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر ساده تیمارهای آبیاری بر ویژگی‌های رویشی و رنگیزه‌های فتوسنتزی بادرشوبیه

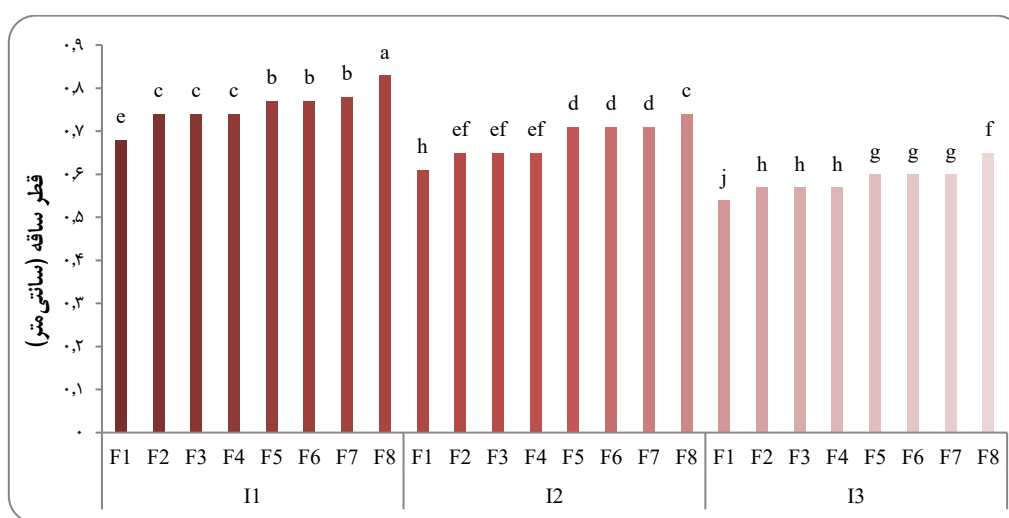
تیمارهای آبیاری	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	تعداد شاخه جانبی	تعداد شاخه اسانس کل‌دهنده	کلروفیل a (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)	کلروفیل b (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)	پروکلین
۲۵ درصد تخلیه رطوبتی	۶۶/۸a	۱۶/۸a	۱۶/۵a	۱۳/۴a	۵/۸a	۶c
۵۰ درصد تخلیه رطوبتی	۵۴b	۱۱/۴b	۱۳/۶b	۱۱/۲b	۴/۸b	۱۰b
۷۵ درصد تخلیه رطوبتی	۳۸/۷c	۸c	۱۱c	۷/۴c	۱/۷c	۱۴a

حروف مشابه در هر ستون فاقد معنی‌داری براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

۳.۴. قطر ساقه

براساس تجزیه واریانس مرکب (جدول ۳)، اثر ساده سال‌های آزمایش، تیمارهای آبیاری، تیمارهای کودی و برهم‌کنش

تیمارهای آبیاری و کودی در سطح یک درصد بر قطر ساقه بادرشوبیه معنی‌دار شد. مقایسه میانگین نشان داد که به دلیل مطلوب بودن شرایط آب‌وهوا در سال اول آزمایش، قطر ساقه در سال اول اندکی بیش‌تر از سال دوم، به ترتیب میانگین $0/7$ و $0/68$ سانتی‌متر بود (جدول ۴). مقایسه میانگین ارائه شده در شکل (۲) حاکی از برتری قطر ساقه بادرشوبیه در تمامی تیمارهای کودی، برای آبیاری I_1 بود و با کاهش دسترسی به آب از قطر ساقه گیاه نیز کاسته شد. افزون بر این، تیمارهای کودی در هر سه تیمارهای آبیاری به کار رفته در پژوهش نسبت به شاهد، قطر ساقه بیش‌تری تولید کردند و بیش‌ترین مقادیر به تیمارهای کودی تلفیقی اختصاص داشت. بیش‌ترین قطر ساقه، میانگین $0/85$ سانتی‌متر، به ترکیب تیماری I_1F_8 اختصاص داشت که ۲۳ درصد بیش‌تر از تیمار شاهد در همان سطح آبیاری بود. ترکیب‌های تیماری I_2F_8 و I_3F_8 نیز به ترتیب $20/6$ و $19/6$ درصد، قطر ساقه بادرشوبیه را نسبت به I_2F_1 و I_3F_1 افزایش دادند.



شکل ۲. برهم‌کنش تیمارهای آبیاری و کودی بر قطر ساقه بادرشوبیه

حروف مشابه فاقد معنی‌داری براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

(I_1 , I_2 و I_3 به ترتیب آبیاری پس از ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد تخلیه رطوبتی، F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , F_5 , F_6 , F_7 و F_8 به ترتیب شاهد، مایکوریزا، سودوموناس، بیوجار، مایکوریزا+ سودوموناس، مایکوریزا+ بیوجار، سودوموناس+ بیوجار و مایکوریزا+ سودوموناس+ بیوجار)

۴.۴. تعداد شاخه جانبی و تعداد شاخه گل‌دهنده

تجزیه واریانس مرکب ارائه شده در جدول (۳) نشان می‌دهد که اثر ساده سال‌های آزمایش، تیمارهای آبیاری و کودی در سطح یک درصد بر تعداد شاخه جانبی و شاخه گل‌دهنده گیاه بادرشوبیه معنی‌دار بود. مقایسه میانگین (جدول ۴) حکایت از افزایش به ترتیب $16/3$ و $7/5$ درصدی تعداد شاخه جانبی و شاخه گل‌دهنده در سال اول نسبت به سال دوم داشت. نتایج هم‌چنین، نشان داد که آبیاری شاهد بیش‌ترین تعداد شاخه جانبی و گل‌دهنده گیاه بادرشوبیه را به خود اختصاص داد و با کاهش دسترسی به آب در تیمار I_3 تعداد شاخه جانبی و گل‌دهنده به ترتیب $52/3$ و $33/3$ درصد با کاهش مواجه شد (جدول ۵). مطابق با نتایج مقایسه میانگین اثر تیمارهای کودی، بیش‌ترین تعداد شاخه جانبی و گل‌دهنده، میانگین $15/7$ و $15/8$ ، مربوط به تیمار F_8 بود. سپس، تیمارهای F_7 ، F_6 و F_5 مشاهده شد و جایگاه بعد به تیمارهای F_4 ، F_3 و F_2 اختصاص داشت. کم‌ترین تعداد شاخه جانبی و گل‌دهنده نیز به ترتیب با $45/2$ و 41 درصد کاهش برای تیمار شاهد ثبت شد (جدول ۶).

۵.۴. اسانس

نتایج تجزیه واریانس مرکب حاکی از معنی‌داری اثر سال‌های آزمایش، تیمارهای آبیاری و کودی در سطح یک درصد بر اسانس بادرشوبیه بود (جدول ۳). مقایسه میانگین نشان داد که اسانس گیاه در سال دوم، ۰/۰۲ درصد نسبت به سال اول افزایش یافت که می‌تواند به دلیل افزایش بارندگی در سال اول باشد (جدول ۴). افزون بر این، نتایج مقایسه تیمارهای آبیاری (جدول ۵) حکایت از افزایش معنی‌دار اسانس، با میانگین ۴۰ درصد، در تیمار I₂ داشت. کم‌ترین اسانس بادرشوبیه نیز با میانگین ۲۶ درصد کاهش، برای تیمار I₃ ثبت شد (جدول ۶).

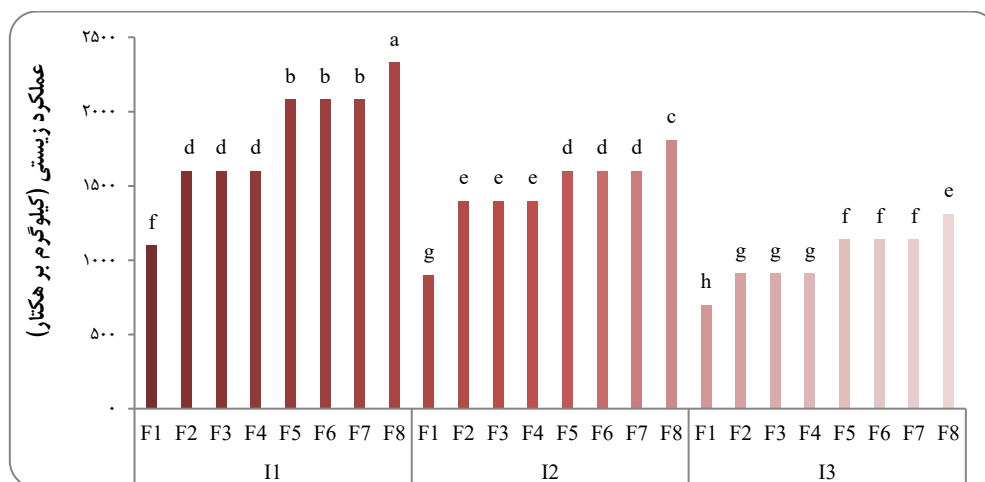
جدول ۶. مقایسه میانگین اثر ساده تیمارهای کودی بر ویژگی‌های رویشی و رنگیزه‌های فتوسنتزی بادرشوبیه

تیمارهای کودی	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	تعداد شاخه جانبی	تعداد شاخه گل‌دهنده	پرولین (میلی گرم بر گرم وزن تر)	کلروفیل a (میلی گرم بر گرم وزن تر)	کلروفیل b (میلی گرم بر گرم وزن تر)
شاهد	۳۸/۶d	۸/۶d	۹/۳c	۱۲/۸a	۷/۴c	۱d
میکوریزا	۴۷/۳c	۱۱c	۱۳/۳b	۱۱b	۱۰b	۳/۴c
سودوموناس	۴۷/۸c	۱۱c	۱۳/۳b	۱۱b	۱۰b	۳/۳c
بیوجار	۴۸/۳c	۱۱c	۱۳/۲b	۷/۲d	۱۰b	۳/۳c
میکوریزا + سودوموناس	۵۸/۳b	۱۲/۶b	۱۵a	۱۱b	۱۱/۸a	۵b
میکوریزا + بیوجار	۵۸/۴b	۱۲/۸b	۱۵a	۹c	۱۱/۷a	۵/۰۳ab
سودوموناس + بیوجار	۵۸/۵b	۱۳b	۱۵a	۹c	۱۱/۷a	۴/۸b
میکوریزا + سودوموناس + بیوجار	۶۸a	۱۵/۷a	۱۵/۸a	۹c	۱۳a	۶a

حروف مشابه در هر ستون فاقد معنی‌داری براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

۶.۴. عملکرد زیستی و عملکرد برگ و گل

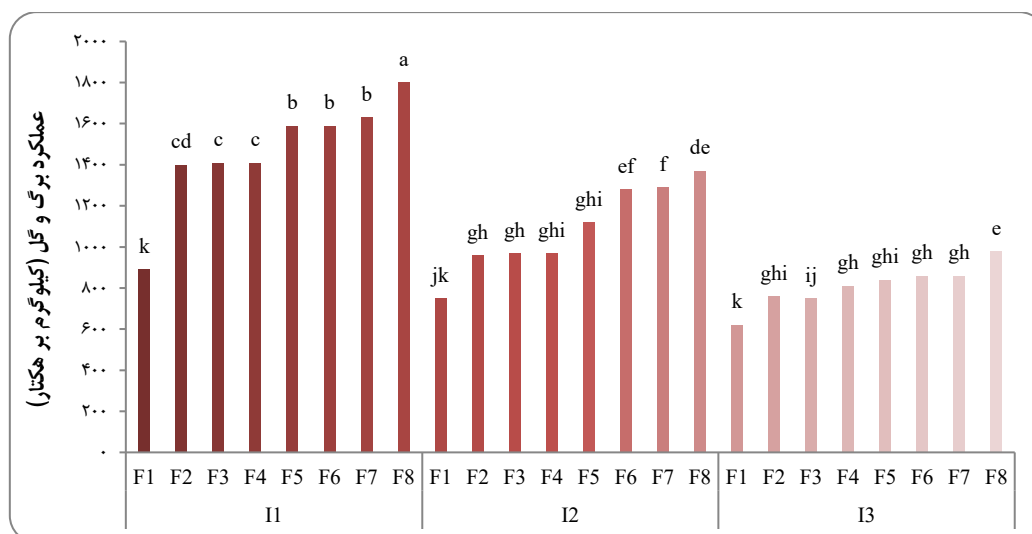
همان‌گونه که در جدول تجزیه واریانس مرکب (جدول ۳) مشاهده می‌شود، اثر ساده سال‌های آزمایش، تیمارهای آبیاری، تیمارهای کودی و برهم‌کنش تیمارهای آبیاری و کودی در سطح یک درصد بر عملکرد زیستی و عملکرد برگ و گل گیاه بادرشوبیه معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین اثر سال‌های آزمایش نشان داد که به دلیل مطلوب بودن شرایط آب‌وهوایی در سال اول و بهبود محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، عملکرد زیستی و عملکرد برگ و گل به ترتیب ۱۷ و ۱۵/۵ درصد نسبت به سال دوم با افزایش مواجه شد (جدول ۴). مقایسه میانگین برهم‌کنش تیمارهای آبیاری و کود حکایت از افزایش عملکرد زیستی و عملکرد برگ و گل بادرشوبیه در تیمار آبیاری شاهد نسبت به دو سطح تنش در تمامی تیمارهای کودی داشت. همچنین، تیمارهای کودی تلفیقی در مقایسه با تیمار شاهد و کاربرد جداگانه کود، به طور معنی‌داری عملکرد زیستی و عملکرد برگ و گل را افزایش دادند. بیش‌ترین عملکرد زیستی با میانگین ۲۳۴۸ کیلوگرم بر هکتار، مربوط به ترکیب تیماری I₁F₈ بود و تیمار شاهد کودی ۵۱/۳ درصد کاهش در عملکرد زیستی در همان سطح آبیاری را به دنبال داشت. همچنین، در سطح آبیاری I₂ و I₃ کاربرد تیمار F₈ بیش‌ترین عملکرد زیستی، میانگین به ترتیب ۱۸۱۵/۸ و ۱۳۵۰/۶ کیلوگرم بر هکتار، را به خود اختصاص دادند که به ترتیب ۴۹/۷ و ۵۱/۸ درصد بیش‌تر از سطح صفر کود و آبیاری I₂ و I₃ بود (شکل ۳). همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، بیش‌ترین عملکرد برگ و گل بادرشوبیه به ترکیب تیماری I₁F₈ با میانگین ۱۷۹۲ کیلوگرم بر هکتار، اختصاص یافت که به ترتیب ۴۴ و ۸۲/۸ درصد در مقایسه با ترکیب‌های تیماری I₂F₁ و I₃F₁ افزایش داشت. کم‌ترین عملکرد برگ و گل نیز در هر سه سطح آبیاری برای عدم کاربرد کود ثبت شد و تیمار آبیاری طبیعی و عدم کاربرد کود به ترتیب ۱۹/۲ و ۴۲ درصد در مقایسه با ترکیب‌های تیماری I₂F₁ و I₃F₁ افزایش عملکرد برگ و گل را به دنبال داشت.



شکل ۳. برهم‌کنش تیمارهای آبیاری و کودی بر عملکرد زیستی بادرشبویه

حروف مشابه فاقد معنی‌داری براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

(I₁ و I₂ و I₃ به‌ترتیب آبیاری پس از ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد تخلیه رطوبتی، F₁، F₂، F₄، F₅، F₆، F₇ و F₈ به‌ترتیب شاهد، مایکوریزا، سودوموناس، بیوجار، مایکوریزا+ سودوموناس، مایکوریزا+ بیوجار، سودوموناس+ بیوجار و مایکوریزا+ سودوموناس+ بیوجار)



شکل ۴. برهم‌کنش تیمارهای آبیاری و کودی بر عملکرد برگ و گل بادرشبویه

حروف مشابه فاقد معنی‌داری براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

(I₁ و I₂ و I₃ به‌ترتیب آبیاری پس از ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد تخلیه رطوبتی، F₁، F₂، F₄، F₅، F₆، F₇ و F₈ به‌ترتیب شاهد، مایکوریزا، سودوموناس، بیوجار، مایکوریزا+ سودوموناس، مایکوریزا+ بیوجار، سودوموناس+ بیوجار و مایکوریزا+ سودوموناس+ بیوجار)

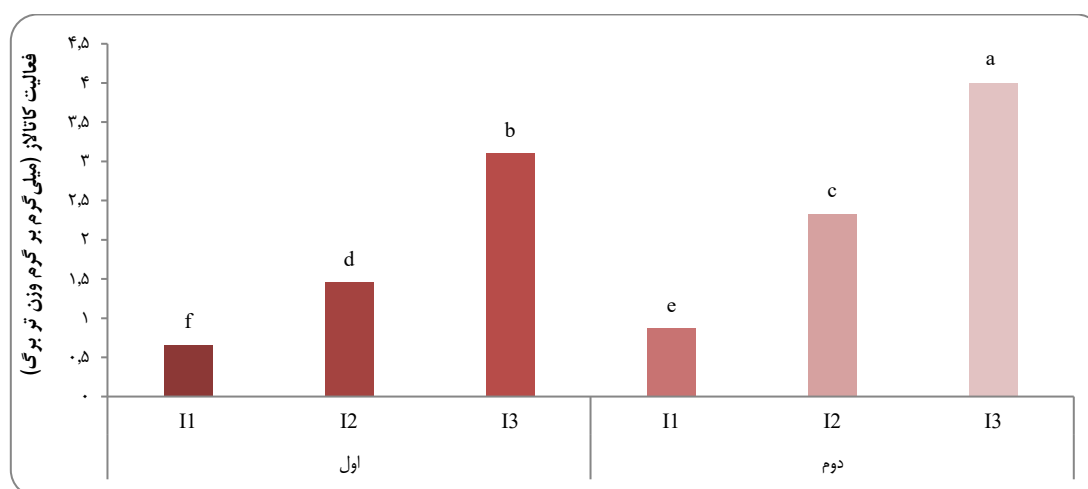
۷.۴. محتوای پرولین

مطابق با تجزیه واریانس مرکب (جدول ۳)، اثر سال‌های آزمایش، تیمارهای آبیاری و کودی در سطح یک درصد بر پرولین معنی‌دار بود. مقایسه میانگین اثر سال نشان داد که محتوای پرولین در سال اول در مقایسه با سال دوم به‌ترتیب ۲۰ و ۹/۵ درصد با کاهش مواجه شد (جدول ۴). همان‌گونه که در جدول (۵) مشاهده می‌شود، افزایش تنش خشکی منجر به کاهش محتوای پرولین شد، بیش‌ترین مقدار و پرولین با میانگین ۱۴ میلی‌گرم در گرم،

مربوط به تیمار I_3 بود. اعمال آبیاری‌های I_1 و I_2 به‌ترتیب ۵۷ و ۲۸/۵ درصد محتوای پرولین کم‌تری نسبت به تیمار I_3 به‌دنبال داشت. براساس مقایسه میانگین اثر تیمارهای کودی، کاربرد کودها به‌ویژه مصرف تلفیقی آنها منجر به کاهش معنی‌دار مقدار پرولین گیاه بادرشویه شد. تیمار F_1 ، با میانگین ۱۲/۸ میلی‌گرم در گرم، بیش‌ترین مقدار و پرولین را به‌خود اختصاص داد. تیمار شاهد با ۲۰ درصد کاهش در مقایسه با F_8 ، بیش‌ترین محتوای پرولین ۴۲/۲ درصد افزایش نسبت به F_8 را ثبت کرد (جدول ۶).

۴.۸. فعالیت آنزیم کاتالاز

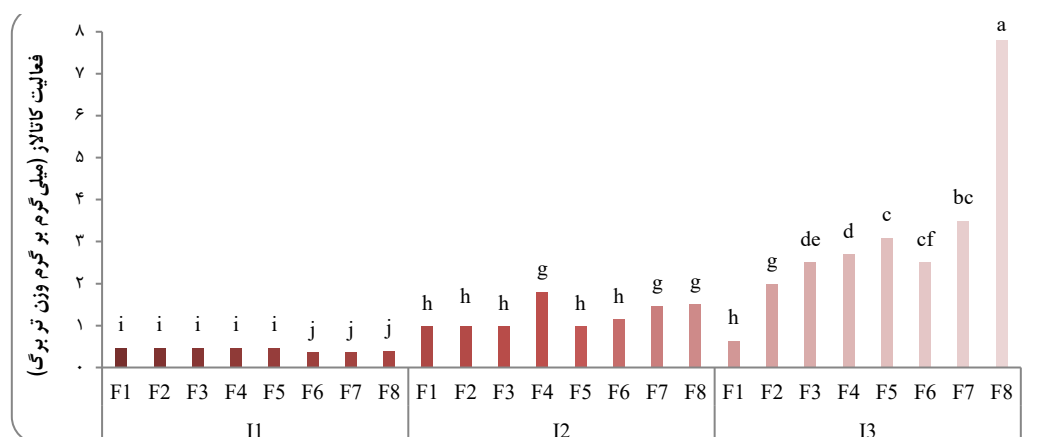
نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثر سال‌های آزمایش، تیمارهای آبیاری و کودی در سطح یک درصد بر فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار می‌باشد. برهم‌کنش سال و تیمارهای آبیاری بر فعالیت کاتالاز در سطح یک درصد معنی‌دار شد و برهم‌کنش تیمارهای آبیاری و تیمارهای کودی به‌ترتیب در سطح یک و پنج درصد بر فعالیت کاتالاز معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج هم‌چنین، نشان داد که در تمامی تیمارهای آبیاری، فعالیت کاتالاز در سال اول بیش‌تر از سال دوم بود. افزون بر این، در هر دو سال با کاهش آب در دسترس گیاه، فعالیت آنزیم به‌طور معنی‌داری افزایش داشت. بیش‌ترین مقدار فعالیت کاتالاز با میانگین ۴/۱ میلی‌گرم بر واحد پروتئین، در سال دوم و تیمار I_3 به‌دست آمد. تیمار شاهد در همان سال، ۸۵/۳ درصد فعالیت کم‌تری را نسبت به I_3 نشان داد. در سال اول نیز بیش‌ترین مقدار فعالیت کاتالاز در تیمار I_3 حاصل شد که ۲۴/۳ درصد کم‌تر از آبیاری مشابه در سال دوم بود، کم‌ترین مقدار فعالیت آنزیم در هر دو سال نیز برای تیمار شاهد ثبت شد (شکل ۵). براساس برهم‌کنش تیمارهای آبیاری و کودی، فعالیت آنزیم کاتالاز با افزایش شدت تنش خشکی به‌طور چشم‌گیری افزایش یافت، این در حالی بود که کاربرد تیمارهای کودی در شرایط تنش و عدم تنش افزایش فعالیت آنزیم را به‌دنبال داشت. بیش‌ترین فعالیت کاتالاز ۷/۶ میلی‌گرم بر واحد پروتئین، به ترکیب تیماری $I_3 \times F_8$ اختصاص یافت که با کاربرد ترکیب تیماری $I_3 \times F_1$ ۶۳ درصد کاهش، در مقدار فعالیت کاتالاز مشاهده شد. کم‌ترین مقدار فعالیت آنزیم نیز در تمامی تیمارهای کودی مربوط به زمانی بود که از آبیاری شاهد استفاده شد، اگرچه با کاربرد کودها در آبیاری شاهد، مقدار فعالیت کاتالاز تا حدی افزایش نشان داد (شکل ۶).



شکل ۵. برهم‌کنش سال و تیمارهای آبیاری بر فعالیت آنزیم کاتالاز بادرشویه

حروف مشابه فاقد معنی‌داری براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

(I_1 ، I_2 و I_3 به‌ترتیب آبیاری پس از ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد تخلیه رطوبتی)



شکل ۶. برهم‌کنش تیمارهای آبیاری و کودی بر فعالیت آنزیم کاتالاز بادرشویه

حروف مشابه فاقد معنی‌داری براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

(I1 و I2 به ترتیب آبیاری پس از ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد تخلیه رطوبتی، F1، F2، F3، F4، F5، F6، F7 و F8 به ترتیب شاهد، مایکوریزا، سودوموناس، بیوجار، مایکوریزا+ سودوموناس، مایکوریزا+ بیوجار، سودوموناس+ بیوجار و مایکوریزا+ سودوموناس+ بیوجار)

۵. بحث

مطابق با نتایج این پژوهش، کاهش مقدار کلروفیل در اثر تنش خشکی در گیاهان گزارش شده است. در پژوهشی دیگر، کاهش معنی‌دار محتوای کلروفیل a، b و کل گیاه سرخارگل^۱ در اثر تنش خشکی گزارش شد (طاووسی و همکاران، ۱۴۰۳). دلیل کاهش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی در اثر تنش خشکی می‌تواند مربوط به افزایش گونه‌های فعال اکسیژن و پراکسیداسیون لیپیدهای غشا باشد که و در نهایت، تجزیه کلروفیل را به دنبال دارد. همچنین، کاهش جذب عناصر معدنی در شرایط تنش از دیگر دلایل کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی بیان شده است (ابد-البار^۲ و همکاران، ۲۰۱۹). در این پژوهش، کاربرد هم‌زمان کودهای آلی و زیستی منجر به افزایش مقادیر کلروفیل شد. در راستای نتایج پژوهش حاضر، گزارش شده که مایکوریزا از طریق ایجاد رابطه همزیستی با گیاه، جذب مؤثر برخی از عناصر مغذی، از قبیل فسفر که در انتقال انرژی طی فرایند فتوسنتز نقش دارد، را افزایش می‌دهد. همچنین، مایکوریزا با سهولت روند جذب عناصری از قبیل منیزیم، جزو اصلی ساختار مولکول کلروفیل، به بهبود محتوای کلروفیل کمک می‌کند. به‌طور مشابه، قارچ‌های مایکوریزا با افزایش مقادیر قند، سطح هورمون‌های گیاهی از جمله سیتوکینین و جیبرلین منجر به تنظیم سطح کلروفیل در گیاه می‌شوند (صاحب حسن و همکاران، ۱۳۹۹). این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش هورمون‌های ذکرشده به‌ویژه سیتوکینین، باشد که منجر به بازشدن بیش‌تر روزه‌های هوایی، جابه‌جایی و تنظیم سطح کلروفیل و افزایش شدت فتوسنتز مربوط باشد (نظری ناسی و همکاران، ۱۳۹۷). افزایش مقدار پروتئین‌های دخیل در کلروپلاست در اثر کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاه از دلایل افزایش کلروفیل در گیاهان تیمار شده بیان شده است (بندہ حق^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). در بررسی صاحب‌حسن و همکاران (۱۳۹۹) افزایش محتوای کلروفیل a، b و کل در گیاه همیشه‌بهار^۴ در اثر کاربرد هم‌زمان مایکوریزا+ سودوموناس و ازتوباکتر مشاهده شد. همچنین، افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی در گیاه اسفناج^۵ در اثر کاربرد باکتری سودوموناس توسط اسدزاده و همکاران (۱۴۰۳) بیان شده است.

1. *Echinacea purpurea* L.
2. Abd-Elbar
3. Bandehagh
4. *Calendula officinalis*
5. *Spinacia oleracea* L.

در بررسی کاربرد بیوچار و هیومیک‌اسید جهت افزایش تحمل به تنش خشکی در گل آهار^۱، نتایج نشان داد که کاربرد هیومیک‌اسید و بیوچار به‌تنهایی بر محتوای کلروفیل معنی‌دار نبود، درحالی‌که برهم‌کنش دو عامل در سطح پنج درصد بر مقدار کلروفیل a، b و کل معنی‌دار شد (کشاورزفرد و همکاران، ۱۳۹۹). افزایش معنی‌دار مقدار کلروفیل را در اثر کاربرد بیوچار می‌تواند مربوط به افزایش تبادل گازی برگ صورت گرفته باشد. افزون بر این، گزارش شده است که استفاده از بیوچار در خاک حتی بیش‌تر از کاربرد مواد آلی منجر به باروری خاک و ذخیره مواد غذایی می‌شود (عباس‌نسب و همکاران، ۱۴۰۰).

نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش تنش خشکی، ارتفاع بوته گیاه با کاهش معنی‌دار مواجه شد، این موضوع می‌تواند مربوط به کاهش آماس سلولی در اثر کمبود آب باشد که در نهایت، کاهش رشد و توسعه سلول به‌ویژه ارتفاع ساقه را به‌دنبال دارد (یوسف‌زاده و پیرایی، ۱۴۰۱). مطابق با نتایج، گرجینی شبانکاره^۲ و همکاران (۲۰۱۷) کاهش ارتفاع بوته گیاه بادرنبویه^۳ را در شرایط تنش خشکی گزارش کردند. در بررسی اثر تنش خشکی بر ویژگی‌های مورفولوژیک و فیتوشیمیایی بادرنبویه، نتایج نشان داد که با افزایش دور آبیاری ارتفاع گیاه کاهش یافت و تیمار آبیاری با دور سه و نه روز به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین ارتفاع گیاه، ۵۹/۵ و ۴۳/۲ سانتی‌متر، را تولید کردند (یوسف‌زاده و پیرایی، ۱۴۰۱).

نتایج هم‌چنین، نشان داد که کاربرد تلفیقی کودهای آلی و زیستی منجر به افزایش ارتفاع بوته گیاه بادرنبویه در مقایسه با کاربرد جداگانه آن‌ها و هم‌چنین، تیمار شاهد شد، فعالیت ریزجانداران مفید خاک از قبیل قارچ‌های میکوریزا و سایر حل‌کننده‌های فسفات، در راستای فراهم‌سازی عناصر غذایی گیاه از جمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم عمل کرده و منجر به بهبود رشد و عملکرد گیاه می‌شود (بخشی‌پور و همکاران، ۱۴۰۰). همسو با نتایج، رضوانی‌مقدم^۴ و همکاران (۲۰۲۰) اعلام کردند که در گیاه گل گاو زبان ایرانی^۵ کاربرد کودهای آلی عملکرد تر و خشک گیاه، ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی و تعداد گل در بوته را افزایش داد. در پژوهشی بر کاربرد ذغال زیستی و میکوریزا در شرایط تنش خشکی در گیاه نخود، افزایش تمامی ویژگی‌های مورفولوژیک از قبیل ارتفاع بوته در اثر کاربرد هم‌زمان کودهای زیستی مشاهده شد (هاشمی^۶ و همکاران، ۲۰۱۹). زارع‌پور و همکاران (۱۴۰۳) افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته گیاه دارویی بومادران^۷ را در اثر کاربرد باکتری‌های محرک رشد نسبت به شاهد گزارش کردند. پژوهش‌ها هم‌چنین، نشان می‌دهد که کودهای آلی از قبیل بیوچار با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله اسیدیته، ظرفیت تبادل کاتیونی و افزایش فعالیت ریزجانداران منجر به افزایش دسترسی به مواد مغذی و افزایش باروری خاک و در نهایت، بهبود رشد رویشی گیاه می‌شود (رحیمی گاودانه‌گردانی^۸ و همکاران، ۲۰۲۰).

تنش خشکی ویژگی‌های رویشی گیاه را به‌دلیل اختلال در فتوسنتز و کاهش تولید مواد فتوسنتزی جهت انتقال به بخش‌های در حال رشد کاهش می‌دهد (یوسف‌زاده و پیرایی، ۱۴۰۱؛ راگالی و همکاران، ۲۰۲۳). این در حالی است که کاربرد کودهای زیستی و آلی، به‌ویژه کاربرد هم‌زمان آنها، منجر به کاهش اثر سوء تنش بر رشد رویشی گیاهان می‌شود. مطابق با نتایج این پژوهش، در بررسی کاربرد هم‌زمان بیوچار و ورمی‌کمپوست بر گیاه کاملینا^۹ مشخص شد که کاربرد تلفیقی هر دو کود در شرایط دیم افزایش ویژگی‌های رویشی گیاه را به‌دنبال داشت (حضرتی و همکاران، ۱۴۰۱). گزارش

1. Zinnia
2. Gorgini shabankareh
3. *Melissa officinalis* L.
4. Rezvani Moghaddam
5. *Echium amoenum*
6. Hashemi
7. *Achillea millefolium* L.
8. Rahimi Gavdanehgodari
9. *Camelina sativa*

شده که بیوچار سرشار از مواد معدنی بوده و در صورتی که شرایط خاک مطلوب نباشد، این مواد غیر قابل‌ذب می‌شود. درحالی‌که کاربرد هم‌زمان بیوچار با سایر کودهای زیستی می‌تواند با بهبود شرایط فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک بر مقدار جذب مواد معدنی توسط ریشه‌های گیاه بیفزاید که افزایش رشد کمی و کیفی گیاهان را به دنبال خواهد داشت (کایوالا^۱ و همکاران، ۲۰۱۴). در پژوهش‌های مختلف هم‌چنین، نشان دادند که گیاهان میکوریزایی در مقایسه با گیاهان غیرمیکوریزایی رشد و عملکرد مطلوب‌تری را در شرایط تنش‌های محیطی، به‌ویژه در خاک‌هایی با حاصلخیزی کم به دنبال داشتند (سلیمی و همکاران، ۱۳۹۹؛ پاندیت^۲ و همکاران، ۲۰۱۸). در گیاه چای‌ترش^۳ تلقیح با قارچ میکوریزای آربوسکولار و باکتری محرک رشد سودوموناس منجر به افزایش شاخص‌های رشد گیاه در شرایط تنش خشکی شد (صنایعی و همکاران، ۱۳۹۹). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که دلیل برتری تیمارهای هم‌زمان بیوچار به کودهای زیستی می‌تواند به دلیل تحریک فعالیت ریزجانداران مفید خاک در اثر کاربرد بیوچار و در نتیجه، ایفای نقش مهم این ریزجانداران در چرخه عناصر غذایی خاک باشد (سلیمی و همکاران، ۱۳۹۹).

براساس نتایج این پژوهش، بیش‌ترین ویژگی‌های رویشی گیاه چای‌ترش و گیاه کاملینا در تیمار آبیاری طبیعی و کم‌ترین مقادیر در شرایط تنش آبی گزارش شده است (حضرتی و همکاران، ۱۴۰۱؛ صنایعی و همکاران، ۱۳۹۹). این در حالی است که چندین پژوهش اثبات کرده‌اند که کاربرد تلفیقی کودهای زیستی با کودهای آلی و یا کاربرد هم‌زمان قارچ میکوریزا با باکتری‌های محرک رشد منجر به بهبود رشد رویشی گیاهان می‌شوند (اسرا و همکاران، ۲۰۲۳؛ یانگ^۴ و همکاران، ۲۰۲۴). پژوهش‌گران اظهار داشتند که بخشی از افزایش رشد گیاه در شرایط کاربرد کودهای زیستی می‌تواند مربوط به رابطه مثبت بین باکتری‌های محرک رشد و میکوریزا باشد. بدین صورت که باکتری‌های محرک رشد با تولید ترکیب‌هایی منجر به افزایش ترشح ریشه و تحریک و رشد هیف‌های قارچ و نفوذ مطلوب آن‌ها در ریشه گیاهان می‌شود. از سوی دیگر، قارچ‌های میکوریزا با افزایش فعالیت باکتری‌های محرک رشد، افزایش رشد گیاهان را به دنبال خواهد شد (صنایعی و همکاران، ۱۳۹۹). هم‌چنین، پژوهش‌هایی در لوبیا (ونک^۵ و لمان^۶، ۲۰۱۵) و گندم (مادر^۷ و همکاران، ۲۰۰۰) بهبود رشد گیاه در اثر کاربرد هم‌زمان بیوچار و میکوریزا را گزارش کردند.

نتایج بررسی حاضر نشان داد که با کاهش دسترسی گیاه به آب در سال دوم و تنش آبیاری از مقدار عملکرد زیستی و عملکرد برگ و گل گیاه در مقایسه با شرایط افزایش بارندگی سال اول و تیمار شاهد کاسته شد. دلیل کاهش عملکرد برگ و گل گیاهان در اثر تنش خشکی، افزایش مقاومت روزنه‌ای و کاهش فتوسنتز عنوان شده است. هم‌چنین، کاهش عملکرد زیستی می‌تواند به دلیل کاهش فشار آماس سلول ناشی از کاهش سطح آب نسبی برگ رخ دهد (مسلمی و همکاران، ۱۴۰۱). مطابق با نتایج، مسلمی و همکاران (۱۴۰۱) کاهش عملکرد برگ و گل و عملکرد زیستی گیاه زیره سبز^۸ در شرایط تنش نسبت به آبیاری شاهد گزارش شده است. هم‌چنین، ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۶) اظهار داشتند که عملکرد گل گیاه همیشه بهار در شرایط تنش خشکی با کاهش معنی‌دار مواجه شد.

همسو با نتایج این پژوهش، افزایش عملکرد زیستی گیاه بادرنجبویه در کاربرد باکتری‌های محرک رشد توسط نیکبخت و همکاران (۱۴۰۱) گزارش شد. این پژوهش‌گران اعلام کردند که کودهای زیستی از طریق سنتز هورمون‌های

1. Cayuela
2. Pandit
3. *Hibiscus sabdariffa* L.
4. Yang
5. Vanek
6. Lehmann
7. Mader
8. *Cuminum cyminum* L.

رشد و شاخص‌های رشدی گیاه را افزایش می‌دهند. هورمون اکسین تقسیم سلولی را افزایش داده و جبرلین و مشتق‌های آن منجر به رشد طولی و در نتیجه، افزایش عملکرد زیستی می‌شود. همچنین، گزارش شده است که مصرف بیوچار با سایر کودهای زیستی و شیمیایی منجر به بهبود عملکرد گیاهان زراعی می‌شود. کاربرد بیوچار به‌ویژه در شرایط تنش خشکی با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی و عملکرد را ارتقا می‌دهد (داورپناه و همکاران، ۱۴۰۴). همسو با نتایج، داورپناه و همکاران (۱۴۰۴) افزایش معنی‌دار عملکرد برگ ذرت را در کاربرد هم‌زمان بیوچار با کودهای دامی و شیمیایی گزارش کردند.

براساس نتایج یافته‌های این پژوهش، در سایر پژوهش‌ها نیز افزایش مقدار پرولین در شرایط تنش خشکی گزارش شده است (کشاورزفرد و همکاران، ۱۳۹۹؛ هوآنگ و همکاران، ۲۰۲۲). کاهش پرولین با کاربرد تیمارهای کودی در این پژوهش می‌تواند مربوط به کاهش نیاز گیاه به تجمع اسمولیت‌ها و نشان‌دهنده تسهیل شرایط زیستی باشد (آنبوگانشان و همکاران، ۲۰۲۴). گزارش شده که کاربرد بیوچار با بهبود نگهداری آب و ساختار خاک و فراهم‌سازی میکروزیستگاه مناسب برای میکروب‌ها، توان بقا و فعالیت باکتری‌های مفید را افزایش می‌دهد. مایکوریزا نیز با گسترش شبکه هیف، آب و عناصر غذایی را به‌نحو مطلوب‌تری برای گیاه فراهم می‌کند. PGPRها از قبیل گونه‌های *Pseudomonas* با تولید فاکتورهای رشد IAA، آنزیم‌های کاهش اتیلن ACC-دمیناز و القای سازوکارهای دفاعی میزبان، پاسخ‌های مربوط به تنش را تعدیل می‌کنند. این سه عامل در ترکیب با هم می‌توانند به‌صورت هم‌افزایی موجب افزایش حذف رادیکال‌های فعال و کاهش پراکسیداسیون شوند که به‌طور معمول با افزایش فعالیت کاتالاز و پراکسیداز/آسکوربات پراکسیداز و با کاهش محتوای H_2O_2 همراه می‌باشد (آنبوگانشان و همکاران، ۲۰۲۴). در مجموع، کاربرد تلفیقی این سه عامل منجر به افزایش فعالیت کاتالاز و پراکسیداز می‌شود و بنابراین، مقاومت گیاهان در برابر خشکی تقویت می‌شود (خاجیان^۱ و همکاران، ۲۰۲۴).

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی با ایجاد اختلال در جذب مواد مغذی و ساخت کلروفیل منجر به کاهش ویژگی‌های رویشی و عملکرد گیاه دارویی بادرشویه می‌شود. تنش خشکی ۵۰ و ۷۵ درصد تخلیه رطوبتی به‌طور معنی‌داری ویژگی‌های رشدی، شاخص کلروفیل و عملکرد بادرشویه را نسبت به آبیاری طبیعی کاهش داد. بررسی تیمارهای کودی نیز نشان داد که کاربرد سه‌گانه سودوموناس، مایکوریزا و بیوچار توانست بخشی از پیامدهای منفی تنش را تعدیل کنند. این ترکیب از طریق بهبود جذب عناصر غذایی، افزایش ظرفیت نگهداشت آب خاک، بهبود رشد ریشه و تقویت سامانه دفاع آنتی‌اکسیدانی منجر به افزایش تحمل گیاه در برابر خشکی و ممانعت از کاهش قابل‌توجه عملکرد شد. در نتیجه، کاربرد هم‌زمان این سه عامل زیستی به‌عنوان یک استراتژی سازگار با محیط‌زیست می‌تواند نقش مهمی در ارتقای پایدار تولید گیاهان دارویی در شرایط تنش کم‌آبی ایفا کند. با توجه به تأثیر مثبت و معنی‌دار کاربرد تلفیقی سودوموناس، مایکوریزا و بیوچار در کاهش اثرات سوء تنش خشکی و افزایش عملکرد کمی و کیفی گیاه بادرشویه، پیشنهاد می‌شود که در برنامه‌های به‌نژادی و ترویجی مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور، استفاده هم‌زمان از این سه عامل به‌عنوان یک راه‌کار سازگار با محیط‌زیست در الگوی کشت این گیاه دارویی گنجانده شود. همچنین، با توجه به کاهش معنی‌دار رنگیزه‌های فتوسنتزی و عملکرد در تیمارهای تنش شدید (۷۵ درصد تخلیه رطوبتی)، توصیه می‌شود که آبیاری گیاه در مراحل حساس رشد (به‌ویژه مرحله گلدهی) در سطح ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی مدیریت شود تا ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب، افت عملکرد قابل‌قبولی حاصل گردد. انجام پژوهش‌های تکمیلی در شرایط اقلیمی مختلف و خاک‌های با بافت متفاوت، بررسی تأثیر این تیمارها بر ترکیب‌های مؤثره

اسانس و نیز ارزیابی اقتصادی کاربرد تلفیقی این کودها نسبت به کودهای شیمیایی، برای ارائه توصیه‌های نهایی و کاربردی‌تر به کشاورزان و بهره‌برداران ضروری به‌نظر می‌رسد.

۷. تشکر و قدردانی

از همکاری صمیمانه و حمایت ارزشمند کارکنان پژوهش دانشگاه آزاد اسلامی واحد فسا در اجرای این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

- ابراهیمی، مهدی؛ زمانی، غلامرضا و علیزاده، زهره (۱۳۹۶). مطالعه اثر تنش خشکی بر صفات فیزیولوژیک و عملکردی همیشه‌بهار (*Calendula officinalis* L.). تحقیقات گیاهان دارویی و معطر/ایران، ۳۳(۳)، ۵۰۸-۴۹۲.
- اسدزاده، کوثر؛ نادیان قمشه، حبیب‌اله؛ کشاورز توحید، وحید و سیاه‌پوش، عبدالرضا (۱۴۰۳). تأثیر باکتری‌های محرک رشد گیاهی، فیلتر کیک و علف‌کش بر رنگیزه‌های فتوسنتزی و مؤلفه‌های رشدی گیاه اسفناج. به‌زراعی کشاورزی، ۲۶(۱)، ۱۹۷-۲۱۲.
- بخشی‌پور، فاطمه؛ مومیوند، حسن؛ صداقتی، ابراهیم و احتشام‌نیا، عبدالله (۱۴۰۰). تأثیر کاربرد ذغال زیستی و قارچ‌های میکوریزای بومی و غیربومی بر رشد توده و برخی خصوصیات ریخت‌شناسی و فیزیولوژیکی دو رقم جعفری در شرایط گلخانه. پژوهش‌های تولید گیاهی، ۲۸(۲)، ۲۱-۱.
- حضرتی، سعید؛ ذاکر، کاظم؛ حبیب‌زاده، فرهاد و صادقی بختوری، امیررضا (۱۴۰۱). تأثیر کاربرد هم‌زمان بیوجار و ورمی‌کمپوست بر رشد و عملکرد برگ و گل گیاه روغنی کاملینا (*Camelina sativa*) به‌صورت دیم‌کاری در استان آذربایجان شرقی. فرآیند و کارکرد گیاهی، ۱۱(۵۱)، ۷۷-۹۱.
- خاشعی سیوکی، عباس؛ شهیدی، علی؛ یعقوب‌زاده، مصطفی و دستورانی، مهدی (۱۳۹۸). کاربرد بیوجار و سطوح مدیریت آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه دارویی زنیان (*Trachyspermum ammi*). آبیاری و زهکشی/ایران، ۲(۱۳)، ۳۱۹-۳۲۸.
- دورپناه، سید جلیل؛ رضوانی مقدم، پرویز؛ خرم دل، سرور؛ نصیری محلاتی، مهدی و نباتی، جعفر (۱۴۰۴). ارزیابی تأثیر مدیریت تلفیقی بیوجار و منابع کودی مختلف بر عملکرد و شاخص‌های کیفی ذرت علوفه‌ای. پژوهش‌های علوم دامی/ایران، انتشار آنلاین.
- دهقانی تفتی، احمدرضا؛ محمودی، سهراب؛ علیخانی، حسینعلی و صالحی، معصومه (۱۳۹۷). بررسی اثر شوری و کودهای زیستی بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه دارویی اسفرزه (*Plantago ovata* Forsk.) در شرایط مزرعه. تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۱۱(۲)، ۴۲۱-۴۳۳.
- زارع‌پور، محسن؛ رحیمی، محمدمهدی؛ عبدی‌پور، مسلم و کلیدری، عبدالصمد (۱۴۰۳). بررسی اثر کاربرد باکتری‌های محرک رشد و سالیسیلیک‌اسید بر خصوصیات زراعی و محتوای اسانس بومادران در شرایط تنش خشکی. علوم و فنون باغبانی/ایران، ۲۵(۱)، ۲۴-۱.
- سلیمی، قباد؛ فیضیان، محمد و علی اصغرزاده، ناصر (۱۳۹۹). تأثیر تلقیح با قارچ میکوریزا بر جذب عناصر غذایی و وی اسانس گیاه بادرشبو (*Dracocephalum moldavica*) تحت تنش خشکی. اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی، ۱۴(۳)، ۳۲۵-۳۴۴.
- صاحب حسن، مهدی؛ سلاح‌ورزی، یحیی؛ نباتی، جعفر و عزیزی، مجید (۱۳۹۹). تأثیر تنش خشکی و برخی کودهای زیستی (باکتری *Pseudomonas fluorescens*، باکتری *Azotobactore chroococcum* و قارچ مایکوریزا) بر رشد، رنگدانه‌های فتوسنتزی و برخی صفات فیزیوشیمیایی گل همیشه‌بهار. فرآیند و کارکرد گیاهی، ۹(۳۶)، ۱۳۵-۱۵۱.

صنایعی، سارا؛ برمکی، مرتضی؛ عبادی خزینه قدیم، علی و ترابی گیگلو، موسی (۱۳۹۹). اثر تنش خشکی و تلقیح قارچ‌های میکوریزا و باکتری سودوموناس بر برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک چای ترش (*Hibiscus sabdariffa* L.). دانش کشاورزی و تولید پایدار، ۳۰(۲)، ۷۱-۸۹.

طاووسی، رضوانه؛ سیاری، محمد و عزیزی، علی (۱۴۰۳). اثر تنش خشکی بر برخی ویژگی‌های رشدی و فیتوشیمیایی گیاه سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.). تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۱۷(۳)، ۶۳۷-۶۱۹.

کشاورز فرد، سپیده؛ سلگی، موسی؛ باقری، حسین و شهرجردی، ایمان (۱۳۹۹). کاربرد بیوچار و هیومیک‌اسید برای افزایش مقاومت به تنش خشکی در گل آهار. زیست‌شناسی کاربردی، ۳۳(۱)، ۱۴۸-۱۷۴.

گلستانی، مسعود (۱۳۹۹). ارزیابی عملکرد و برخی از صفات زراعی اکوتیپ‌های گیاه بادرشبو (*Dracocephalum moldavica* L.) تحت شرایط تنش خشکی. اصلاح گیاهان زراعی، ۱۲(۲۶)، ۱۹۳-۲۰۴.

عباس نسب، زهرا؛ عابدی، مهدی و ساداتی، سید احسان (۱۴۰۰). اثر بیوچار بر برخی صفات مورفوفیزیولوژیک و فیزیولوژیک دو گونه علف پشمکی (*Bromus tomentellus*) و یونجه (*Medicago sativa*). فرآیند و کارکرد گیاهی، ۱۰(۴۱)، ۱۴۵-۱۵۵.

عسکر نژاد، مرضیه؛ سودایی‌زاده، حمید؛ مصلح آرانی، اصغر؛ یزدانی بیوکی، رستم و ماوندی، پریناز (۱۳۹۸). اثر سیلیکون بر افزایش تحمل به خشکی گیاه دارویی استویا (*Stevia rebaudiana* Bertoni) تحت تنش رطوبتی. تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۱۲(۳)، ۸۶۳-۸۴۷.

مسلمی، الهام؛ اکبریان، محمدمهدی؛ راوری، سید ذبیح اله، یاورزاده، محمدرضا و مدافع بهزادی، نادر (۱۴۰۱). بررسی تأثیر تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد اکوتیپ‌های گیاه دارویی *Cuminum cyminum* L. در شرایط آب‌وهوایی استان کرمان. اکوفیتوشیمی گیاهان دارویی، ۱۰(۴۰)، ۱۰۷-۱۱۹.

میرطیپی، محمد؛ بستانی، امیر؛ دیانت، مرجان و آزادی، امین (۱۴۰۱). تأثیر تنش خشکی، کود زیستی و نانو کود پتاسیم بر شاخص سطح برگ، وزن هزار دانه، شاخص برداشت و کیفیت دانه کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.). تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی، ۱۲(۱)، ۱۵۰-۱۳۳.

نظری ناسی، حسین؛ امیرنیا، رضا و زردشتی، محمدرضا (۱۳۹۷). اثر تنش خشکی و کودهای زیستی بر برخی صفات فیزیولوژیک و عملکرد دانه کدوی پوست کاغذی. به‌زراعی کشاورزی، ۲۰(۱)، ۲۱۷-۲۰۵.

نیکبخت، نیلوفر، دانش شهرکی، عبدالرزاق و کوهی دهکردی، مهرآنا (۱۴۰۱). اثر تنش خشکی و باکتری‌های ریزوسفری ارتقادهنده رشد گیاه بر خصوصیات آگرومورفولوژیک بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.). تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۱۵(۲)، ۳۹۳-۴۰۵.

یوسف‌زاده، سعید و پیرایی، مرضیه (۱۴۰۱). اثر محلول‌پاشی کود ارگانیک بمباردیر بر خصوصیات مورفولوژیک و فیتوشیمیایی گیاه بادرشبو (*Dracocephalum moldavica* L.). تحت تنش کم‌آبی، علوم گیاهان زراعی/ایران، ۵۳(۱)، ۲۳۳-۲۱۹.

References

- Abbasnasab, Z., Abedi, M., & Sadati, S. E. (2021). Effect of biochar on some morphological and physiological traits in *Medicago sativa* and *Bromus tomentellus*, *Plant Process and Function*, 10(41), 145-156. (In Persian).
- Abd-Elbar, O. H., Farag, R. E., & Shehata, S. A. (2019). Effect of putrescine application on some growth, biochemical and anatomical characteristics of *Thymus vulgaris* L. under drought stress. *Annals of Agricultural Sciences*, 64(2), 129-137.
- Ahmadian, H., Kholesro, Sh., & Heidari, Gh. (2024). Improving the nutritional management and yield of *Ricinus communis* L. using *Arbuscular mycorrhizal* fungus and organic fertilizers, *Agricultural Engineering*, 47(4), 511-531. (In Persian).
- Alipour, A., Rahimi, M. M., Hosseini, M., & Bahrani, A. (2021). Mycorrhizal fungi and growth-promoting bacteria improves fennel essential oil yield under water stress. *Industrial Crops and Products*, 170, 1-11.

- Anbuganesan, V., Vishnupradeep, R., Bruno, L. B., Sharmila, K., Freitas, H., & Rajkumar, M. (2024). Combined Application of Biochar and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Improves Heavy Metal and Drought Stress Tolerance in *Zea mays*. *Plants*, 13(8), 1143.
- Asadzadeh, K., Nadian Ghomsheh, Keshavarz-Tohid, V., & Siahpoosh, A. (2024). The effect of plant growth-promoting rizobacteria, filter cake, and herbicide on the photosynthetic pigments and growth components of Spinach plants, *Journal of Crops Improvement*, 26(1), 197-212. (In Persian).
- Askarnejad, M., Sodaeeizadeh, H., Mosleh Arani, A., Yazdani Biouki, R., & Mavandi, P. (2019). Effects of silicon in improving drought tolerance of Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) under moisture stress, *Environmental Stress in Crops Sciences*, 12(3), 847-863. (In Persian).
- Bakhshipour, F., Mumivand, H., Sedaghati, E., & Ehteshamnia, A. (2021). Effects of biochar and native non-native mycorrhizal fungi on growth, biomass and some morphological and physiological characteristics of two Parsley cultivars under greenhouse, *Journal of Plant Production Research*, 28(2), 1-21. (In Persian).
- Bandehagh, A., Toorchi, M., Farajzadeh, D., Dehghanian, Z., & Pirzad, S. (2018). Effect of *Pseudomonas fluorescens* FY32 bacteria on leaf proteome pattern of rapeseed under salinity stress. *Genetic Engineering and Biosafety Journal*, 7(2), 203-216.
- Bates, L. S., Waldren, R.P., & Tear, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207.
- Boroujeni, Y. K., Boroujeni, V. N., Rastegari, A. A., Yadav, N., & Yadav, A. N. (2021). Soil microbes with multifarious plant growth promoting attributes for enhanced production of food crops. *In Soil Microbiomes for Sustainable Agriculture*, 41, 55-83.
- Burd, G. I., Dixon, D. G., & Glick, B. R. (2000). Plant growth promoting bacteria that decrease heavy metal toxicity in plants. *Canadian Journal of Microbiology*, 46, 237-245.
- Cakmak, I., & Horst, W. (1991). Effect of aluminum on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase and peroxidase activities in root tip of soybean. *Plant Physiology*, 83, 463-468.
- Cayuela, M., Van Zwieten, L., Singh, B., Jeffery, S., Roig, A., & Sanchez -Monedero, M. A. (2014). Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 191, 5 -16.
- Davarpanah, S. J., Rezvani Moghadam, P., Khorramdel, S., Nassiri Mahallati, M., & Nabati, J. (2026). Evaluation of the effect of integrated biochar and fertilizer management on forage corn yield and Quality, *Iranian Journal of Animal Science Research*, Available Online. (In Persian).
- Dehghani Tafti, A., Mahmoodi, S., Alikhani, H., & Salehi, M. (2018). The effect of salinity and bio-fertilizers on yield and yield components of Isabgol (*Plantago ovata* Forsk.) under field conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 11(2), 421-433. (In Persian).
- Ebrahimi, M., Zamani, Gh. R., & Alizadeh, Z. (2017). A study on the effects of water deficit on physiological and yield-related traits of pot Marigold (*Calendula officinalis* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 33(3), 492-508. (In Persian).
- ElSayed, A. I., El-Hamahmy, M. A. M., Rafudeen, M. S., Mohamed, A. H., & Omar, A. A. (2019). The Impact of Drought Stress on Antioxidant Responses and Accumulation of Flavonolignans in Milk Thistle (*Silybum marianum* (L.) Gaertn). *Plants*, 8(12), 611.
- Esraa, E. Ammar, Hadeer, A. Rady, Ahmad, M. Khattab, Mohamed, H. Amer, Sohila, A. Mohamed, Nour, I. Elodamy, Ammar, AL-Farga, & Ahmed, A. A. Aioub. (2023). A comprehensive overview of eco-friendly bio-fertilizers extracted from living organisms, *Environmental Science and Pollution Research*, 30(53), 113119-113137.
- Ghilavizadeh, A., Darzi, M. T., & Hadi, M. H. S. (2013). Effects of bio fertilizer and plant density on essential oil content and yield traits of Ajowan (*Carum copticum*). *Middle-East Journal of Scientific Research*, 14(11), 1508-1512.
- Golestani, M. (2020). Evaluation of yield and some agronomical traits in *Dracocephalum moldavica* L. ecotypes under drought stress condition. *Journal of Crop Breeding*, 12(36), 193-204. (In Persian).
- Gorgini Shabankareh, H., Sabouri, F., Saedi, F., & Fakheri, B. A. (2017). Effects of different levels of humic acid on growth indices and essential oil of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) under different irrigation regimes. *Journal of Crop Science Research in Arid Regions*, 1(2), 166-176.
- Hashem, A., Kumar, A., Al-Dbass, A. M., Alqarawi, A. A., Al-Arjani, A. B. F., Singh, G., & Abd-Allah, E. F. (2019). *Arbuscular mycorrhizal* fungi and biochar improves drought tolerance in chickpea. *Saudi Journal of Biological Science*, 26(3), 614-624.

- Hazrati, S., Zaker, K., Habibzadeh, F., & Sadeghi Bakhtevvari, A. R. (2022). Effects of simultaneous application of biochar and vermicompost on the growth and grain yield of *Camelina* (*Camelina sativa*) oil plant under rainfed condition in East Azarbaijan province. *Plant Process and Function*, 11(51), 77-92. (In Persian).
- Huang, G., Zhang, L., Wang, X., Zhou, Y., & Chen, Y. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance active ingredients of medicinal plants: A quantitative analysis. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1276918.
- Keshavarz Fard, S., Solgi, M., Bagheri, H., & Shahrjerdi, I. (2019). The application of biochar with humic acid for resistance to drought stress in *Zinnia*. *Applied Biology*, 33(1), 148-174. (In Persian).
- Khashei, A., Shahidi, A., Yaghoobzadeh, M., & Dastourani, M. (2019). Effect of biochar application and yield components of medicinal plant (*Trachyspermum ammi*). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(2), 319-328. (In Persian).
- Mader, P., Edenhofer, S., Boller, T., Wiemken, A., & Niggli, U. (2000). *Arbuscular mycorrhizal* in a long-term field trial comparing low -input (organic biological) and high input (conventional) farming systems in a crop rotation. *Biology and Fertility of Soils*, 31, 150 -156.
- Malik, L., Hussain, S., Shahid, M., Mahmood, F., Ali, H. M., Malik, M., Sanaullah, M., Zahid, Z., & Shahzad, T. (2024). Co-applied biochar and drought tolerant PGPRs induced more improvement in soil quality and wheat production than their individual applications under drought conditions. *Peer Journal of Life & Environment*, 12, e18171.
- Mirtayebi, M., Bostani, A., Diyanat, M., & Azadi, A. (2022). Effect of Drought Stress, Biofertilizer and Potassium Nano Fertilizer on Leaf Area Index, 1000-Seed Weight, Harvest Index and Quality of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) Seed. *Journal of Crop Production and Processing*, 12(1), 133-150. (In Persian).
- Mohammadi-Cheraghabadi, M., Modarres-Sanavy, S. A. M., Sefidkon, F., Rashidi-Monfared, S., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2021). Improving water deficit tolerance of *Salvia officinalis* L. using putrescine. *Scientific Reports*, 11, 21997.
- Moslemi, E. Akbrian, M. M. Ravari, S. Z. Yavarzadeh, M. R., & Modafeh-Behzadi, N. (2022). Investigation of the effect of drought stress on yield and yield components of *Cuminum cyminum* L. ecotypes in climatic conditions of Kerman province. *Eco-phytochemical of Medicinal Plants*, 10(4), 107-119. (In Persian).
- Narayanasamy, S., Thankappan, S., Kumaravel, S., Ragupathi, S., & Uthandi, S. (2023). Complete genome sequence analysis of a plant growth-promoting phylloplane *Bacillus altitudinis* FD48 offers mechanistic insights into priming drought stress tolerance in rice. *Genomics*, 115(1), 110550.
- Nazari Nasi, H., Amirnia, R., & Zardashti, M. R. (2018). Effect of drought stress and biofertilizers on some physiological characteristics and grain yield of medicinal pumpkin plants. *Journal of crops improvement*, 20(1), 205-217. (In Persian).
- Nikbakht, N., Danesh Shahraki, A., & Koochi Dehkordi, M. (2022). The effect of drought stress and plant growth promoting rhizobacteria on agro-morphological characters of Lemon balm (*Melissa officinalis* L.). *Environmental Stress in Crop Sciences*, 15(2), 393-405. (In Persian).
- Pandit, N. R., Mulder, J., Elizabeth Hal, S., Martinsen, V., Schmidt, H. P., & Corneliseen, G., (2018). Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress in a moderately acidic low-input Nepalese soil. *Science of the Total Environment*, 625, 1380-1389.
- Rahimi Gavdanehgodari, M., Modarres-Sanavy, S. A. M., Aghaalikhani, M., & Heidarzadeh, A. (2020). The Effects of Urea, Vermicompost and Azocompost on Some Traits of Sweet Corn Cultivars, under Water Deficit Stress. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 30(1), 57-71.
- Rezvani Moghaddam, P., Shabahang, J., Lashgari, A., & Aghhavani-Shajari, M. (2020). Response of *Echium amoenum* L. as a Medicinal Plant to Organic Fertilizers and Plant Density. *Journal of Agroecology*, 12(1), 161-178.
- Ragályi, P., Szabó, A., Rékási, M., Csathó, P., & Csontos, P. (2023). Effect of different macronutrient supply levels on the drought tolerance of rainfed grass based on biomass production, water use efficiency and microelement content. *Horticulture*, 9(1337), 1-15.
- Rasouli-Sadaghiani, M., Ghasemi Pirbalouti, A., Shahsavani, M., & Rezaei-Adl, F. (2023). Effect of biochar and arbuscular mycorrhizal fungi on essential oil yield and quality of *Nigella sativa* L. under drought stress. *Agriculture*, 14, 1801.

- Saffari, M., Gholami, H., & Ramezani, P. (2023). Biochar application improves growth, essential oil content, and phenolic compounds of peppermint (*Mentha piperita* L.) in contaminated soils. *Journal of Environmental Management*, 334, 117389.
- Sahib Hasan, M. Selahvarzi, Y. Nabati, J., & Aziz, M. (2020). Effect of drought and some bio fertilizers (*Pseudomonas fluorescens*, *Azotobactera chroococcum* and mycorrhiza) on growth, photosynthetic pigments and some physiochemical traits of *Calendula officinalis*. *Plant Process and Function*, 9(36), 135-152. (In Persian).
- Salimi, G., Fizian, M., & Aliasgharzad, N. (2020). Effect of arbuscular mycorrhiza inoculation on nutrient uptake and essential oil composition of Dragonhead (*Dracophaelum moldavica* L.) under drought stress. *Journal of Crop Ecophysiology*, 14(3), 325-344. (In Persian).
- Sanayei, S., Barmaki, M., Ebadi Khazine Gadim, A., & Torabi Giglou, M. (2020). Effect of drought stress and inoculation of mycorrhizal and *Pseudomonas* Spp. On some morpho-physiological characteristics of Roselle (*Hibiscus sabdaiiffa* L.). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 30(2), 71-89. (In Persian).
- Schenck, N. C., & Perez, K. (1990). Manual for the identification of VA mycorrhizal fungi. Synergistic Publishing Gainesville, Florida, USA.
- Sun, C. X., Chen, X., Cao, M. M., Li, M. Q., & Zhang, Y. L. (2017). Growth and metabolic responses of maize roots to straw biochar application at different rates. *Journal of Plant and Soil*, 416, 487-502.
- Tavosi, R., Sayyari, M., & Azizi, A. (2024). Impact of drought stress on some growth and phytochemical characteristics of the Coneflower (*Echinacea purpurea* L.). *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 17(3), 619-637. (In Persian).
- Vanek, S. J., & Lehmann, J. (2015). Phosphorus availability to beans via interactions between mycorrhizas and biochar. *Plant Soil*, 395(2), 105 -123.
- Yang, M., Song, Y., Ma, H., Li, Z., Jiawei, D., Yin, T., Niu, K., Sun, S., Qi, J., Lu, G., Fazal, A., Yang, Y., & Wen, Z. (2024). Unveiling the hidden world: How *Arbuscular mycorrhizal* fungi and its regulated core fungi modify the composition and metabolism of soybean *Rhizosphere microbiome*. *Environmental Microbiome*, 19(78), 1-20.
- Yousefzadeh, S., & Piryaei, M. (2022). Influence of foliar application of organic fertilizer BOMBARDIER on morphological and phytochemical traits of dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) under water deficit. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 53(1), 219-233. (In Persian).
- Zaman, Q. U., Rehman, M., Feng, Y., Liu, Z., Murtaza, G., Sultan, K., Ashraf, K., Elshikh, M. S., Al Farraj, D. A., Rizwan, M., Iqbal, R., & Deng, G. (2024). Combined application of biochar and peatmoss for mitigation of drought stress in tobacco. *BMC Plant Biology*, 24, Article 862.
- Zarpour, M., Rahimi, M. M., Abdipour, M., & Kelidari, A. S. (2024). Effect of application of plant growth-promoting rhizobacteria and salicylic acid on agronomic properties and essential oil content of Yarrow (*Achillea millefolium* L.) under drought stress conditions. *Iranian Journal of Horticultural Science and Technology*, 25(1), 1-24. (In Persian).