

Research Paper

Studying the effect of vermicompost and biochar on growth, biochemical properties, and leaf element concentrations of juniper seedlings (*Juniperus excelsa*) under different irrigation regimes

Keivan Fazl Karimi¹, Vahid Etemad^{*,2} Anoushirvan Shirvany³, Fatemeh Ghaziani⁴ and Thomas Great Pypker⁵

1- Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran. (Karimikarimi124@gmail.com)

2,*- (Corresponding author) Associate Professor, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran. (vetemad@ut.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran. (shirvany@ut.ac.ir)

4- Department of Animal Sciences, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran. (Ghaziani@ut.ac.ir)

5- Department of Natural Sciences, Faculty of Science, Thompson Rivers University, Kamloops, Canada. (Tpypker@tru.ca)

Received: 18 July 2025

Accepted: 19 August 2025

Extended Abstract

Background and Objective: Persian juniper (*Juniperus excelsa* M. Bieb.) is a long-lived tree species that is highly tolerant of harsh environmental conditions and typically grows in mountainous regions. Owing to its ecological, medicinal, and industrial values, this species plays a critical role in mountain ecosystems. However, declining precipitation and ongoing climate change have increasingly threatened its survival. Therefore, improving management and nutritional practices to enhance the drought tolerance of juniper seedlings has become essential. The application of soil amendments such as biochar and vermicompost is considered an effective approach to mitigating the adverse effects of drought stress in plants. By improving the physical, chemical, and biological properties of soil, biochar and vermicompost can alleviate drought stress and promote plant growth. Although the individual effects of these amendments have been investigated in various plant species, their combined effects on drought-tolerant species such as juniper in arid regions have received limited attention. Accordingly, the present study aimed to evaluate the individual and combined effects of biochar and vermicompost on growth, biochemical traits, and leaf nutrient concentrations of juniper seedlings under different irrigation regimes.

Material and Methods: This study was conducted on two-year-old juniper seedlings as a factorial experiment arranged in a completely randomized design under greenhouse conditions at the Faculty of Natural Resources, University of Tehran (Karaj, Iran). Seedlings were subjected to three irrigation levels: 100% field capacity (full irrigation or control), 75% field capacity (mild drought stress), and 50% field capacity (severe drought stress). Soil amendment treatments included biochar (5% of pot volume), vermicompost (15% of pot volume), a combined application of biochar (2.5%) and vermicompost (7.5%), and a control without soil amendment. The measured traits included plant biomass, chlorophyll content, proline concentration, antioxidant enzyme activities, and leaf macronutrient concentrations.

Results: The results indicated that, in the absence of biochar and vermicompost, drought stress at 50% field capacity led to a significant reduction in growth and nutritional indices of juniper seedlings. Compared with the 100% field capacity treatment, shoot biomass decreased by 26%, root biomass by 20%, total chlorophyll by 18%, essential oil yield by 24%, and leaf nitrogen, phosphorus, and potassium concentrations by 29%, 25%, and 28%, respectively. In contrast, this level of drought stress increased proline content by 24% and enhanced the activities of the antioxidant enzymes catalase and superoxide dismutase by 97% and 105%, respectively. Moreover, the combined application of vermicompost and biochar produced more pronounced improvements in the measured traits than the individual application of either amendment. Under the 50% field capacity treatment, the combined amendment increased shoot biomass by 15%, root biomass by 14%, total chlorophyll by 13%, proline content by 12%, essential oil percentage by 11%, essential oil yield by 25%, and leaf nitrogen, phosphorus, and potassium concentrations by 24%, 21%, and 22%, respectively, compared with the non-amended control.

Conclusion: Although drought stress at 50% field capacity markedly reduced juniper growth and limited nutrient uptake in leaves, the results demonstrate that the combined use of vermicompost and biochar under drought conditions—particularly at 75% field capacity—can substantially mitigate the negative effects of water deficit. This combination significantly improves plant growth indices, enhances the uptake of essential nutrients in leaves, and increases essential oil production in juniper seedlings. As a result of these positive effects, water-use efficiency under stress conditions is improved, indicating that this approach is not only environmentally sustainable but also an effective and cost-efficient strategy for drought stress management. Overall, the findings suggest that the combined application of vermicompost and biochar represents a practical and reliable solution for maintaining seedling health and improving the performance of juniper in arid and semi-arid regions, and it is recommended as part of forest restoration and afforestation programs under conditions of limited water availability.

Keywords: Bioclimatic variable, Habitat suitability, Machine learning, Worldclim database.

How to Cite This Article: Fazl Karimi, K., Etemad, V., Shirvany, A., Ghaziani, F., and Piper, T.G. (2025). Studying the effect of vermicompost and biochar on growth, biochemical properties, and leaf element concentrations of juniper seedlings (*Juniperus excelsa*) under different irrigation regimes. Forest Research and Development, 11(3), 377-399. DOI: [10.30466/jfrd.2025.56166.1756](https://doi.org/10.30466/jfrd.2025.56166.1756)



Copyright ©2024 Fazl Karimi et al. Published by Urmia University.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

تأثیر ورمی کمپوست و بیوچار بر رشد، ویژگی‌های بیوشیمیایی و غلظت عناصر برگ‌ی نهال ارس (*Juniperus excelsa* M. Bieb.) تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

کیوان فضل کریمی^۱، وحید اعتماد^{۲*}، انوشیروان شیروانی^۳، فاطمه غازیانی^۴ و توماس گریت پیپر^۵

۱- دانشجوی دکتری، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. (karimikarimi124@gmail.com)

۲- دانشیار، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. (vetemad@ut.ac.ir)

۳- دانشیار، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. (shirvany@ut.ac.ir)

۴- گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. (ghaziani@ut.ac.ir)

۵- گروه علوم طبیعی، دانشکده علوم، دانشگاه تامپسون ریورز، کمپوس، کانادا. (tpypker@tru.ca)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۷

چکیده

مقدمه و هدف: ارس (*Juniperus excelsa* M. Bieb) درختی دیرزی و مقاوم به شرایط سخت محیطی است که در ارتفاعات می‌روید. این گونه به دلیل ارزش‌های زیست‌محیطی، دارویی و صنعتی، نقش مهمی در بوم‌سازگان‌های کوهستانی دارد. با این حال، کاهش بارندگی و تغییرات اقلیمی، بقای آن را تهدید کرده‌اند؛ از این رو، بهبود روش‌های مدیریتی و تغذیه‌ای برای افزایش مقاومت نهال‌های ارس در برابر خشکی ضروری است. بکارگیری اصلاح‌کننده‌هایی مانند بیوچار و ورمی‌کمپوست، روشی مؤثر برای کاهش اثرات تنش خشکی در گیاهان به‌شمار می‌رود. بیوچار و ورمی‌کمپوست با بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، به کاهش اثرات تنش خشکی و تقویت رشد گیاه کمک می‌کنند. اگرچه اثرات جداگانه این مواد بر گیاهان مختلف بررسی شده، اما تأثیر همزمان آن‌ها بر گونه‌های مقاومی مانند ارس در مناطق خشک کمتر بررسی شده است. این پژوهش با هدف بررسی اثرات جداگانه و ترکیبی بیوچار و ورمی‌کمپوست بر رشد، ویژگی‌های بیوشیمیایی و غلظت عناصر برگ‌ی نهال‌های ارس تحت سطوح مختلف آبیاری انجام شد.

مواد و روش‌ها: این پژوهش روی نهال‌های دوساله ارس به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی، در شرایط گلخانه‌ای دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران (کرج) انجام شد. نهال‌ها تحت سه سطح آبیاری شامل ۱۰۰ درصد (آبیاری کامل یا شاهد)، ۷۵ درصد (تنش ملایم خشکی) و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک (تنش شدید خشکی) قرار گرفتند. همچنین، تیمارهای اصلاح‌کننده خاک شامل بیوچار (پنج درصد حجم گلدان)، ورمی‌کمپوست (۱۵ درصد حجم گلدان)، ترکیب بیوچار (۲/۵ درصد) با

ورمی کمپوست (۷/۵ درصد) و شاهد (بدون اصلاح کننده خاک) اعمال شد. صفات مورد بررسی شامل وزن گیاه، محتوای کلروفیل، پرولین، فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و غلظت عناصر پرمصرف در برگ بود.

یافته‌ها: نتایج این پژوهش نشان داد که در نبود بیوچار و ورمی کمپوست، تنش خشکی در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک موجب کاهش معنی دار شاخص‌های رشدی و تغذیه‌ای نهال‌های ارس شد؛ به طوری که در نبود بیوچار و ورمی کمپوست، وزن اندام هوایی ۲۶ درصد، وزن ریشه ۲۰ درصد، کلروفیل کل ۱۸ درصد، عملکرد اسانس ۲۴ درصد، نیتروژن برگ ۲۹ درصد، فسفر برگ ۲۵ درصد و پتاسیم برگ ۲۸ درصد کاهش نسبت به تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی یافت. در مقابل، این سطح از تنش خشکی موجب افزایش محتوای پرولین به مقدار ۲۴ درصد و فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز به ترتیب ۹۷ و ۱۰۵ درصد شد. همچنین، کاربرد ترکیبی ورمی کمپوست و بیوچار نسبت به کاربرد جداگانه هر یک، اثرات بهتری در بهبود شاخص‌های مورد بررسی داشت؛ به طوری که در تیمار تنش ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، ترکیب این دو ماده موجب افزایش وزن اندام هوایی ۱۵ درصد، وزن ریشه ۱۴ درصد، کلروفیل کل ۱۳ درصد، پرولین ۱۲ درصد، درصد اسانس ۱۱ درصد، عملکرد اسانس ۲۵ درصد و غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم برگ به ترتیب ۲۴، ۲۱ و ۲۲ درصد نسبت به شرایط عدم استفاده آنها شد.

نتیجه‌گیری: هرچند تنش خشکی در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی سبب کاهش محسوس در رشد گیاه ارس شده و همچنین موجب کاهش جذب عناصر غذایی در برگ‌های آن می‌شود، اما نتایج نشان می‌دهد که استفاده همزمان از ورمی کمپوست و بیوچار تحت شرایط تنش خشکی شدیدتر، یعنی در سطح ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، می‌تواند تأثیرات منفی خشکی را به طور قابل توجهی کاهش دهد. این ترکیب بهبود زیادی در شاخص‌های رشد گیاه، افزایش جذب عناصر غذایی ضروری در برگ‌ها و همچنین بهبود عملکرد تولید اسانس در نهال‌های ارس ایجاد می‌کند. به واسطه این تأثیرات مثبت، بهره‌وری آب در این شرایط، که معمولاً تحت تنش قرار دارد، ارتقاء یافته و نشان می‌دهد که این روش، علاوه بر اینکه از نظر زیست‌محیطی پایدار است، روشی مؤثر و اقتصادی برای مدیریت تنش خشکی به شمار می‌آید. این یافته‌ها نشان می‌دهد که کاربرد همزمان ورمی کمپوست و بیوچار می‌تواند راهکاری عملی و قابل اطمینان برای حفظ سلامت و افزایش عملکرد نهال‌های ارس در مناطق خشک و نیمه خشک باشد و به عنوان بخشی از برنامه‌های احیای جنگل و بهبود کاشت در شرایط محدودیت آبی توصیه شود.

واژه‌های کلیدی: اصلاح کننده خاک، تنش خشکی، فعالیت آنزیمی، عملکرد اسانس.

مقدمه

تغییرات اقلیمی سبب افزایش شدت و فراوانی تنش‌های محیطی در مناطق مختلف شده است که این موضوع تهدیدی جدی برای رشد و بقا گونه‌های گیاهی با ارزش محسوب می‌شود. بررسی و پرداختن به این تنش‌ها در بستر تغییرات اقلیمی، زمینه‌ای علمی و به روز فراهم می‌کند که می‌تواند به درک بهتر واکنش‌های گیاهان و راهکارهای مقابله با آنها کمک کند. از مهم‌ترین تنش‌های محیطی که تحت‌تأثیر تغییرات اقلیمی قرار دارند، می‌توان خشکی را نام برد. تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و تولید گیاهان در جهان به‌شمار می‌آید (Saeidi Abueshaghi et al., 2023). کاهش دسترسی گیاه به آب سبب اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی حیاتی مانند فتوسنتز، جذب عناصر غذایی، سنتز پروتئین‌ها و انتقال مواد مغذی می‌شود. همچنین، خشکی موجب تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (Reactive oxygen species - ROS) و افزایش پراکسیداسیون لیپیدها شده که در نهایت به تخریب غشاهای سلولی و کاهش رشد منجر می‌شود (Sarwar et al., 2023; Cenciareli et al., 2025). گیاهان در پاسخ به خشکی، از طریق سازوکارهایی مانند افزایش محتوای پرولین، تغییرات در ترکیب اسیدهای آمینه، و فعالسازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، تلاش می‌کنند تا اثرات منفی این تنش را کاهش دهند (Cenciareli et al., 2025).

ورمی کمپوست و بیوچار مانند اصلاح‌کننده‌های آلی هستند که به‌طور چشمگیری می‌توانند مقاومت گیاه را نسبت به تنش خشکی افزایش دهند. ورمی کمپوست ماده‌ای آلی و غنی از عناصر غذایی است که از تجزیه ضایعات آلی توسط کرم‌های خاکی به‌دست می‌آید و موجب بهبود رشد و تغذیه گیاهان می‌شود.

ورمی کمپوست با دارا بودن ترکیبات زیستی فعال، آنزیم‌ها و میکروارگانیسم‌های مفید، موجب بهبود فعالیت‌های بیوشیمیایی گیاه و افزایش جذب عناصر غذایی می‌شود (Mohkami et al., 2024; Talaat et al., 2024). بیوچار کربنی پایدار است که از پیرولیز مواد زیستی مانند بقایای گیاهی در شرایط کم‌اکسیژن تولید می‌شود و با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، در افزایش بهره‌وری آب و مواد غذایی مؤثر است (Sultan et al., 2024). از سوی دیگر، بیوچار به‌عنوان ماده‌ای پایدار با سطح ویژه بالا، قابلیت نگهداری آب و عناصر غذایی را در خاک افزایش می‌دهد و موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌شود (Lalay et al., 2022; Khosropour et al., 2022). ترکیب این دو ماده می‌تواند اثرات هم‌افزایی ایجاد کرده و کارایی گیاه را در شرایط کم‌آبی افزایش دهد (Murtaza et al., 2024). استفاده از بیوچار و ورمی کمپوست در گونه‌های گیاهی که رویشگاه‌های حساس‌تر و شکننده‌تری دارند، اهمیت زیادی دارد (Hadinezhad et al., 2025) و این موضوع برای نهال ارس که بیشتر در معرض تنش خشکی قرار دارد، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. ارس (*Juniperus excelsa*) یکی از گونه‌های همیشه‌سبز و مقاوم به خشکی متعلق به خانواده Cupressaceae است که به‌طور طبیعی در مناطق کوهستانی و نیمه‌خشک ایران پراکنش دارد. این گونه به دلیل سیستم ریشه‌ای عمیق و سازگاری با خاک‌های فقیر و شرایط اقلیمی سخت، از اهمیت بالایی در تثبیت خاک، جلوگیری از فرسایش و حفظ پوشش گیاهی در بوم‌سازگان‌های شکننده برخوردار است (Zamani et al., 2025). از منظر زینتی، فرم تاج گسترده، برگ‌های سوزنی زیبا و سازگاری با شرایط خشک، آن را به گزینه‌ای مناسب برای طراحی فضای سبز پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل کرده است. از سوی دیگر، ارس

ورمی کمپوست و بیوجار بر نهال ارس در شرایط رژیم-های مختلف آبیاری منتشر نشده است. از این رو، هدف این پژوهش بررسی اثر توأم این دو ماده آلی بر رشد، ویژگی‌های بیوشیمیایی و جذب عناصر غذایی برگ نهال ارس تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در راستای مدیریت پایدار منابع طبیعی و تقویت پوشش گیاهی مقاوم به خشکی است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۴۰۱ در گلخانه پردیس منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی (Completely randomized design - CRD) اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل اعمال تنش خشکی در شرایط کنترل شده گلخانه‌ای بافت و پرپود ۱۶ ساعت روشنایی و هشت ساعت تاریکی، رطوبت نسبی بین ۶۵ تا ۸۰ درصد، و دمایی با بیشینه ۲۹ و کمینه ۱۸ درجه سانتی‌گراد بودند. برای کنترل دما از سیستم تهویه فن و پد استفاده شد. در این سامانه، فن‌هایی در یک سمت گلخانه هوای گرم را به بیرون می‌رانند و در سمت دیگر، هوای تازه از میان پدهای سلولزی مرطوب (مشابه کولر آبی) وارد گلخانه می‌شود. عبور هوا از این پدها سبب تبخیر آب و کاهش دمای آن شده و ضمن ورود به گلخانه، موجب افزایش رطوبت نسبی محیط می‌شود.

در این بررسی، نهال‌های دوساله ارس از نهالستان جلیلی (کرج) تهیه شد. تنش خشکی در سه سطح رطوبتی ۱۰۰ (شاهد)، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و مواد اصلاح‌کننده خاک در چهار سطح شامل بیوجار (پنج درصد حجمی گلدان)، ورمی کمپوست (۱۵ درصد حجمی گلدان) و ترکیب بیوجار (۲/۵ درصد) با ورمی کمپوست (۷/۵ درصد) و شاهد (بدون

دارای ترکیبات دارویی متعددی مانند فلاونوئیدها، ترپن‌ها، تانن‌ها و روغن‌های فرار است که اثرات آنتی‌اکسیدانی، ضدالتهابی، ضدباکتریایی و ادرارآور آن در بررسی‌های مختلف گزارش شده است (Shahhoseini and Rahimian Boogar, 2024). اسانس حاصل از میوه و برگ ارس در طب سنتی برای درمان بیماری‌هایی مانند مشکلات کلیوی، ناراحتی‌های گوارشی، آسم و بیماری‌های پوستی مورد استفاده قرار گرفته است (Naderian et al., 2024).

با وجود بررسی‌های متعددی که بر نقش مثبت مواد آلی از جمله ورمی کمپوست و بیوجار در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و ارتقاء مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های محیطی تأکید دارند، اطلاعات کافی در خصوص اثرات توأم این دو ماده بر پاسخ‌های بیوشیمیایی و تغذیه‌ای گونه‌های بومی مقاوم به خشکی مانند ارس، به‌ویژه تحت شرایط مختلف آبیاری، هنوز در دسترس نیست. پژوهش‌های قبلی نشان داد که ورمی کمپوست به‌عنوان منبعی سرشار از مواد آلی، عناصر غذایی و میکروارگانیسم‌های مفید است (Ghaffari et al., 2022; Mohkami et al., 2024; Ahmad et al., 2024)، در حالی که بیوجار به دلیل ویژگی‌های فیزیکی خاص خود در بهبود نگهداری آب و مواد غذایی و کاهش تنش‌های شیمیایی خاک مؤثر شناخته شده است (Sarwar et al., 2023; Zulfiqar et al., 2024; Gullap et al., 2024). کاربرد همزمان این دو ماده در گیاهانی مانند بادمجان (Ebrahimi et al., 2021; Murtaza et al., 2024)، باران طلایی (Dehestani-Ardakani et al., 2019) و بابونه (Naeemi Golzard et al., 2023) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که استفاده همزمان آن‌ها نسبت به کاربرد تکی از تأثیرگذاری بیشتری برخوردار است. با این حال، تاکنون گزارشی درباره اثر هم‌افزایی

اصلاح‌کننده خاک) اعمال شد. سطوح تیمارها براساس بهترین عملکرد در بررسی‌های پیشین انتخاب شد (Naeemi Golzard et al. 2023). نهال‌های سالم و یکنواخت انتخاب و به گلدان‌های هفت لیتری منتقل شدند. در مجموع ۱۲ تیمار آزمایشی (سه سطح رژیم آبیاری و چهار سطح اصلاح‌کننده خاک) انتخاب شد که هر تیمار شامل سه تکرار بود؛ بنابراین، در کل ۳۶ گلدان (گیاه) برای اجرای آزمایش استفاده شد. ویژگی‌های خاک مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. بیوچار و ورمی کمپوست به صورت مخلوط با خاک گلدان‌ها به کار رفتند. ویژگی‌های این مواد اصلاحی در جدول ۲ ارائه شده است. تنش خشکی، چهار ماه پس از انتقال نهال‌ها به گلدان آغاز شد و به مدت دو ماه ادامه داشت. در پایان دوره شش ماهه نگهداری، نمونه‌های مورد نظر برداشت شدند.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک گلدان‌ها

Table 1. Physical and chemical properties of potting soil

مقدار Value	شاخص Parameter
0.12	نیتروژن کل (درصد) Total nitrogen (%)
15.4	فسفر قابل جذب (میلی گرم در کیلوگرم) Absorbable phosphorus (mg/kg)
215	پتاسیم قابل جذب (میلی گرم در کیلوگرم) Absorbable potassium (mg/kg)
0.67	کربن آلی (درصد) Organic carbon (%)
47	لای (درصد) Silt (%)
27	رس (درصد) Clay (%)
26	شن (درصد) Sand (%)
1.2	هدایت الکتریکی (میلی موس) Electrical conductivity (milli-mΩ)
6.8	پتانسیل هیدروژن pH

جدول ۲- ترکیبات بیوچار و ورمی کمپوست مورد استفاده در بررسی حاضر

Table 2. Bio-char and vermicomposting compositions used in the present study

ورمی کمپوست Vermicompost	بیوچار Biochar	واحد Unit	شاخص Parameter
72.7	91.6	درصد Percentage	ماده آلی Organic matter
35	75.8	درصد Percentage	کربن آلی Organic carbon

ادامه جدول ۲.

Continued Table 2.

شاخص Parameter	واحد Unit	بیوچار Biochar	ورمی کمپوست Vermicompost
نیتروژن Nitrogen	درصد Percentage	0.45	2.9
نترات Nitrate	میلی گرم در کیلوگرم Milligrams per kilogram	64	3100
سولفور Sulfur	میلی گرم در کیلوگرم Milligrams per kilogram	940	520
سدیم Sodium	درصد Percentage	0.52	0.3
پتاسیم Potassium	درصد Percentage	20	0.54
فسفر Phosphorus	درصد Percentage	0.37	0.44
هدایت الکتریکی Electrical conductivity	میلی زیمنس بر متر Millisiemens per meter	37.5	175
پتانسیل هیدروژن pH	-	9.5	6.5
خاکستر کل Total ash	درصد Percentage	8.4	27.3
چگالی ظاهری Bulk density	گرم بر سانتی متر مکعب Grams per cubic centimeter	0.207	0.131

وزن تر اندام هوایی و ریشه

پس از پایان دوره نگهداری نهال، وزن تر اندام هوایی (ساقه، گل و برگ) و ریشه با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه گیری شد. اندام هوایی با قیچی از یقه گیاه جدا شده و ریشه ها پس از جدا کردن از خاک وزن شدند.

محتوای کلروفیل برگ

محتوای کلروفیل برگ با روش آرنون (Arnon, 1949) اندازه گیری شد. ۰/۱ گرم برگ با سه میلی لیتر استون ۸۰ درصد آسیاب و حجم عصاره به ۱۵ میلی لیتر رسید. پس از سانتریفیوژ، جذب در طول موج های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر با اسپکتروفتومتر خوانده شد و کلروفیل کل طبق رابطه ۲ محاسبه شد.

مقدار رطوبت وزنی خاک در سطوح مختلف با

استفاده از دستگاه صفحات فشاری اندازه گیری شد. در ابتدا وزن خاک خشک و درصد رطوبت در ظرفیت زراعی تعیین شد و سپس وزن نرمال مورد نیاز هر گلدان در هر سطح رطوبتی محاسبه شد. این محاسبات براساس رابطه زیر انجام شد (Xie et al., 2018):

$$V_n = (FC - PWP) * V_p * F \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در رابطه بالا V_n مقدار آب داده شده (بر حسب متر مکعب) به هر بستر در هر نوبت آبیاری است. FC رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی است (۳۲ درصد)، PWP نقطه پژمردگی دائم (۱۷ درصد)، V_p حجم گلدان (هفت لیتر)، F ضریب مدیریت آبیاری که در آبیاری مطلوب ۰/۵ است. مقدار آب مورد نیاز برای تیمار شاهد ۵۲۵ میلی لیتر بود.

(NBT) اندازه‌گیری شد. جذب محلول واکنش در طول موج ۵۶۰ نانومتر پس از ۱۸ دقیقه تابش نور خوانده شد.

درصد اسانس و عملکرد اسانس

اندام هوایی پس از برداشت دو هفته در سایه خشک و سپس اسانس به وسیله دستگاه کلونجر استخراج شد (سه ساعت). اسانس با دی‌کلرومتان و سولفات سدیم بی‌آب خشک شده و وزن شد. عملکرد اسانس از حاصل ضرب درصد اسانس در وزن خشک محاسبه شد (Sefidkon et al., 2006).

عناصر برگ‌ی

نمونه برگ‌ها پس از خشک شدن و آسیاب شدن، برای اندازه‌گیری عناصر پرمصرف آماده شدند. پتاسیم با روش خاکستر کردن در ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و اندازه‌گیری با فلیم‌فوتومتر (Chapman and Pratt, 1962) و نیتروژن با روش کج‌دال (Sparks et al., 1996) و فسفر با خاکستر کردن در ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، افزودن معرف بارتن و اندازه‌گیری جذب در ۴۵۰ نانومتر با اسپکتروفوتومتر (Minocha et al., 2007) اندازه‌گیری شدند.

تحلیل‌های آماری

این بررسی بر روی گونه ارس به‌صورت فاکتوریل و بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام گرفت. تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹.۳ انجام شد. برای بررسی داده‌ها از تجزیه واریانس دوطرفه (Two-way ANOVA) در سطح خطای پنج درصد و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD استفاده شد. همچنین، نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel ترسیم شدند.

نتایج

وزن گیاه

$$\text{Total chlorophyll (mg/g FW)} = 1000 \times W [(20.2 \times A645) + (8.02 \times A663)] \times V \quad \text{رابطه (۲)}$$

هر گرم برگ تر در رابطه بالا، A: مقدار جذب در طول‌موج‌موردنظر، V: حجم نهایی استون ۸۰ درصد برحسب میلی‌لیتر و W: اندازه برگ تازه برحسب گرم است.

محتوای نسبی آب برگ (RWC)

برگ‌های کامل پس از وزن اولیه در آب مقطر به مدت ۲۴ ساعت در چهار درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا وزن اشباع (SW) ثبت شود، سپس به مدت ۲۴ ساعت در آون ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک و وزن خشک (DW) ثبت شد RWC با فرمول زیر محاسبه شد (Ritchie et al., 1990):

$$\text{RWC} = (FW - DW) / (SW - DW) \times 100 \quad \text{رابطه (۳)}$$

پرولین برگ

پرولین با روش Bates et al. (1973) اندازه‌گیری شد. ۱/۰ گرم از بافت تر ریشه و اندام هوایی جداگانه در ۱۰ میلی‌لیتر سولفوسالسیک اسید سه درصد آسیاب شد، سپس پس از سانتریفیوژ، عصاره با معرف نین هیدرین و استیک اسید مخلوط و در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت انکوبه شد. پس از خنک‌سازی و استخراج با تولوئن، جذب در ۵۲۰ نانومتر اندازه‌گیری و مقدار پرولین بر اساس منحنی استاندارد محاسبه شد.

فعالیت آنزیم کاتالاز

نمونه‌های گیاهی در نیتروژن مایع خرد شده و با بافر فسفات سدیم (pH=6) مخلوط و سانتریفیوژ شدند. فعالیت کاتالاز با استفاده از اسپکتروفوتومتر در طول موج ۲۴۰ نانومتر و به مدت ۳۰ ثانیه اندازه‌گیری شد (Mueller et al., 1997).

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD)

فعالیت این آنزیم با روش Giannopolitis و Ries (1977) بر اساس مهار واکنش احیای نیتروبلوتترازولیوم

افزایش ۱۰، ۱۱ و ۱۵ درصدی وزن اندام هوایی نسبت به تیمار بدون بیوپچارو ورمی کمپوست شد (شکل ۱ الف). این روند برای وزن ریشه نیز مشاهده شد، به طوری که وزن ریشه در تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به مقدار ۲۰ درصد کاهش یافت، درحالی که تیمار ۷۵ درصد ظرفیت زراعی تفاوت معنی داری نسبت به ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی نشان نداد. استفاده همزمان از بیوپچارو ورمی کمپوست در گیاهان تحت تنش ۵۰ درصد ظرفیت زراعی سبب افزایش ۲۷ درصدی وزن ریشه نسبت به عدم کاربرد اصلاح کننده خاک شد (شکل ۱ ب).

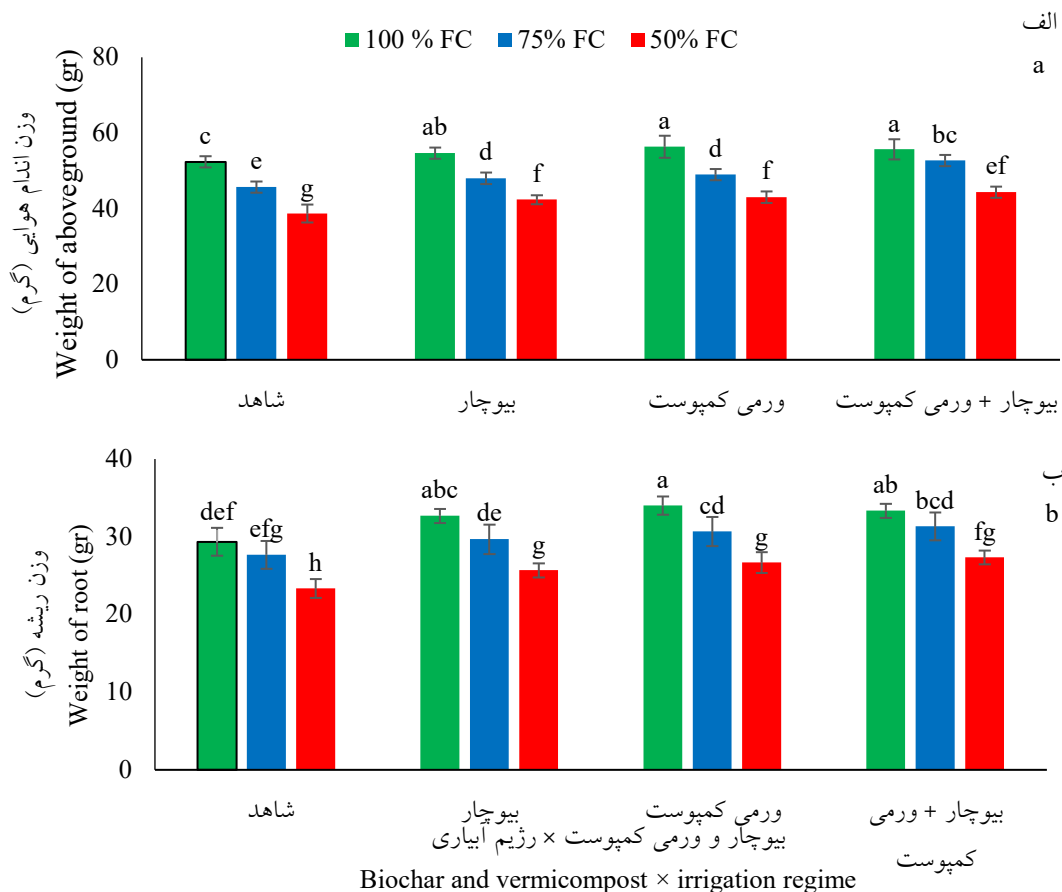
اثر تنش خشکی و اصلاح کننده خاک بر وزن گیاه معنی دار شد (جدول ۳). وزن اندام هوایی و ریشه در اثر تنش خشکی نسبت به تیمار شاهد کاهش معنی داری یافت، درحالی که با کاربرد ترکیبی بیوپچارو ورمی کمپوست افزایش پیدا کرد. در گیاهانی که بدون مصرف بیوپچارو ورمی کمپوست بودند، تنش خشکی در سطوح ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب سبب کاهش ۱۲ و ۲۶ درصدی وزن اندام هوایی نسبت به تیمار شاهد شد. در گیاهان تحت تنش ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، استفاده از بیوپچارو ورمی کمپوست و ترکیب آنها به ترتیب سبب

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر تنش خشکی و اصلاح کننده خاک بر وزن تر گیاه، کلروفیل و پرولین برگ
Table 3. Results of variance analysis of the effect of drought stress and soil amendment on plant fresh weight, chlorophyll and leaf proline

میانگین مربعات Mean squares		درجه آزادی Df		منابع تغییرات Sources of changes	
پرولین Proline	کلروفیل Chlorophyll	وزن تر ریشه Root fresh weight	وزن تر اندام هوایی Fresh weight of aboveground parts		
4239 **	0.24 **	132.52 **	482 **	2	تنش خشکی Drought stress
1856 **	0.04 **	28.64 **	85.4 **	3	اصلاح کننده خاک Soil conditioner
26.8 ns	0.06 ns	0.56 ns	3.2 *	6	تنش خشکی × اصلاح کننده خاک Drought stress × soil conditioner
66.5	0.0009	1.77	1.55	24	خطا Error
4.56	2.07	2.54	2.57	-	ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)

** نشان دهنده معناداری در سطح یک درصد است، * بیانگر معناداری در سطح ۵ درصد بوده و ns عدم معناداری را نشان می دهد.

** denotes significance at the 1% level, * denotes significance at the 5% level, and ns indicates non-significance.



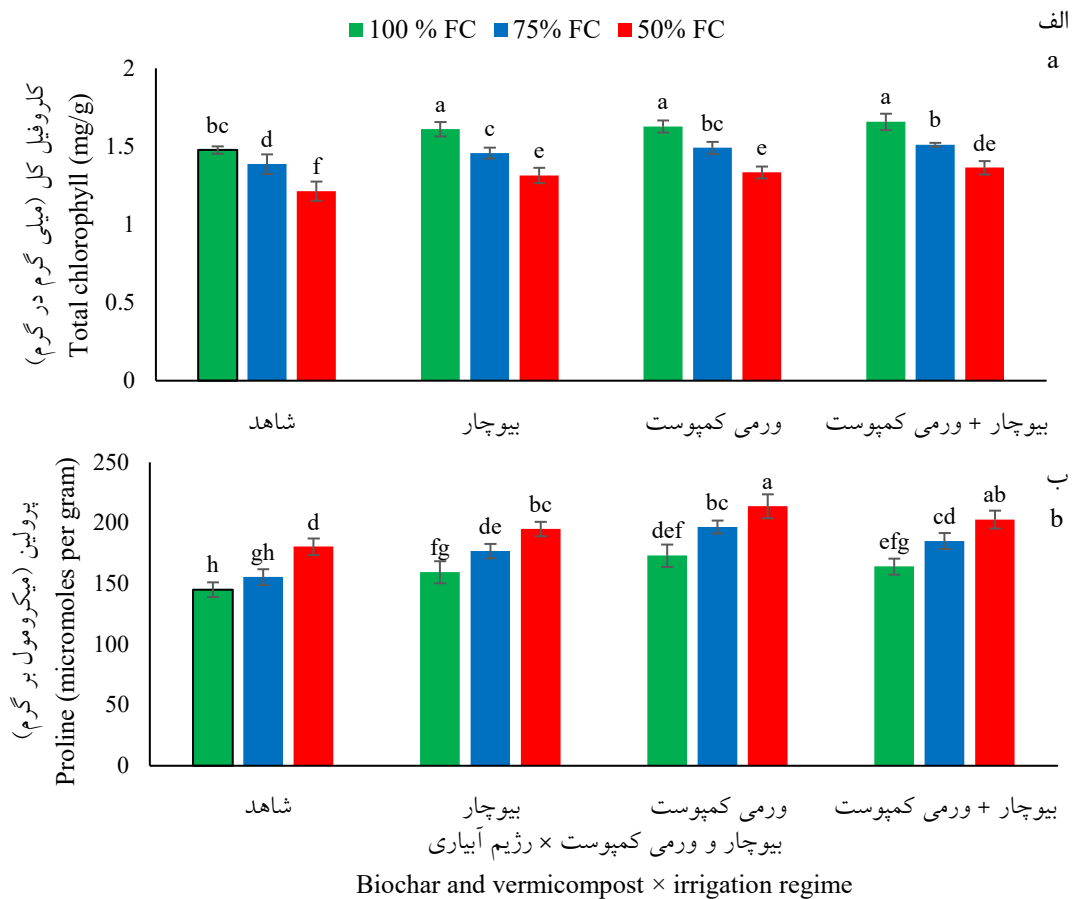
شکل ۱- وزن اندام هوایی (الف) و وزن ریشه (ب) گیاه ارس تحت تأثیر کاربرد بیوچار و ورمی کمپوست در شرایط مختلف آبیاری. حروف لاتین متفاوت روی ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P \leq 0.05$) در آزمون LSD هستند و بارها نشان‌دهنده خطای استاندارد آزمایش هستند.

Figure 1. Shoot weight (a) and root weight (b) of juniper plant under the influence of biochar and vermicompost application under different irrigation conditions. Different Latin letters on the bars indicate significant differences ($P \leq 0.05$) in LSD test and bars indicate standard errors.

افزایش ۱۰، ۱۱ و ۱۴ درصدی کلروفیل کل نسبت به تیمار بدون این مواد شد (شکل ۲الف). مقدار پرولین با اعمال تنش خشکی و استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک افزایش یافت، به‌طوری که بیشترین مقدار پرولین در تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با کاربرد ورمی کمپوست مشاهده شد که نسبت به شاهد ۴۷ درصد افزایش داشت. همچنین، کاربرد همزمان بیوچار و ورمی کمپوست در همین سطح تنش موجب افزایش ۴۰ درصدی پرولین نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۲ب).

کلروفیل و پرولین

اثر تنش خشکی و اصلاح‌کننده خاک بر کلروفیل و پرولین معنی‌دار شد (جدول ۴). کلروفیل کل در اثر تنش خشکی کاهش معنی‌داری نشان داد، اما با کاربرد بیوچار و ورمی کمپوست افزایش یافت ($P \leq 0.05$). در تیمارهای بدون استفاده از بیوچار و ورمی کمپوست، تنش خشکی در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی باعث کاهش ۱۸ درصدی کلروفیل کل نسبت به تیمار شاهد شد. در گیاهان تحت تنش ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، کاربرد بیوچار، ورمی کمپوست و ترکیب آنها به‌ترتیب موجب



شکل ۲- کلروفیل (الف) و پرولین (ب) گیاه ارس تحت تأثیر کاربرد بیوچار و ورمی کمپوست در شرایط مختلف آبیاری. حروف لاتین متفاوت روی ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P \leq 0.05$) در آزمون LSD هستند و بارها نشان‌دهنده خطای استاندارد آزمایش هستند.

Figure 2. Chlorophyll (a) and proline (b) of juniper plants affected by biochar and vermicompost application under different irrigation conditions. Different Latin letters on the bars indicate significant differences ($P \leq 0.05$) in LSD test and bars indicate standard errors.

فعالیت آنزیمی

فعالیت آنزیمی تحت تأثیر اثرات تنش خشکی و اصلاح‌کننده خاک قرار گرفت (جدول ۴). کاربرد بیوچار و ورمی کمپوست در شرایط بدون تنش موجب افزایش فعالیت این آنزیم‌ها شد، درحالی‌که در شرایط تنش خشکی، این مواد با تعدیل واکنش‌های دفاعی گیاه و جلوگیری از افزایش بیش از حد فعالیت آنزیم‌ها، نقش تنظیم‌کننده‌ای ایفا کردند. در تیمارهای فاقد بیوچار و ورمی کمپوست، تنش خشکی در سطوح ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب باعث کاهش ۳۶ و ۱۰۵ درصدی فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتازنسبت به

تیمار شاهد شد. در شرایط تنش ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، استفاده از بیوچار، ورمی کمپوست و ترکیب آن‌ها به ترتیب سبب کاهش ۱۸، ۱۹ و ۲۳ درصدی فعالیت سوپراکسید دیسموتازنسبت به تیمار بدون این مواد شد (شکل ۳، الف). همچنین، در همان تیمارهای فاقد بیوچار و ورمی کمپوست، تنش خشکی در سطوح ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب موجب کاهش ۳۰ و ۹۷ درصدی فعالیت آنزیم کاتالازنسبت به تیمار شاهد شد. در گیاهان تحت تنش ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، کاربرد بیوچار، ورمی کمپوست و ترکیب آن‌ها

به ترتیب سبب کاهش ۱۸، ۲۲ و ۲۴ درصدی فعالیت کاتالاز نسبت به تیمار بدون این مواد شد (شکل ۳، ب).

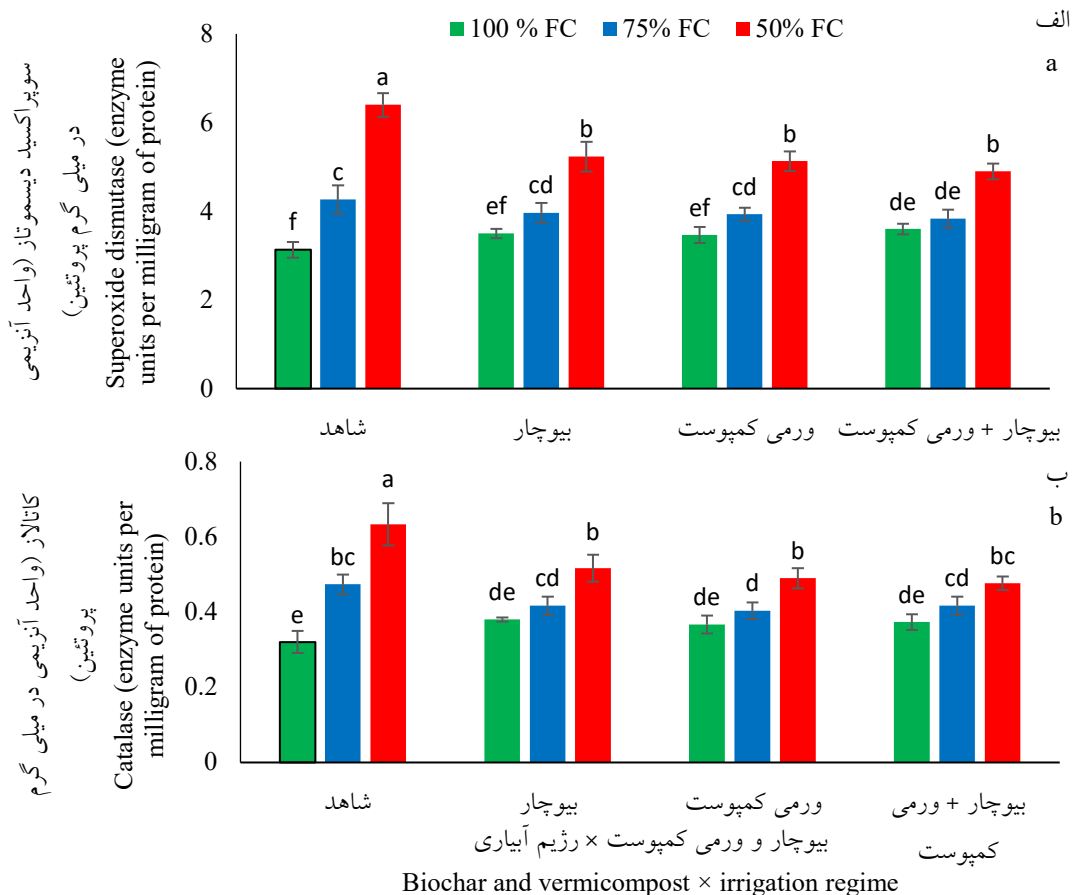
جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر تنش خشکی و اصلاح‌کننده خاک بر سوپراکسیداز دیسموتاز، کاتالاز، اسانس و عملکرد اسانس

Table 4. Results of analysis of variance of the effect of drought stress and soil amendment on Superoxidase dismutase, catalase, essential oils and essential oil performance

میانگین مربعات Mean squares				درجه آزادی df	منابع تغییرات Sources of changes
عملکرد اسانس Essential oil performance	اسانس Essential oil	کاتالاز Catalase	سوپراکسید دیسموتاز Superoxide dismutase		
303 **	0.005 **	0.08 **	12.6 **	2	تنش خشکی Drought stress
113 **	0.002 **	0.005 **	0.43 **	3	اصلاح‌کننده خاک Soil conditioner
3.35 ns	0.001 ns	0.007 ns	0.57 **	6	تنش خشکی × اصلاح‌کننده خاک Drought stress × soil conditioner
5.13	0.0002	0.001	0.06	24	خطا Error
5.69	5.24	8.95	5.95	-	ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation(%)

** بیانگر معنی‌داری در سطح یک درصد، * بیانگر معنی‌داری در سطح پنج درصد، ns بیانگر عدم معنی‌داری است.

**indicates significance at the 1% level, * indicates significance at the 5% level, ns indicates non-significance.



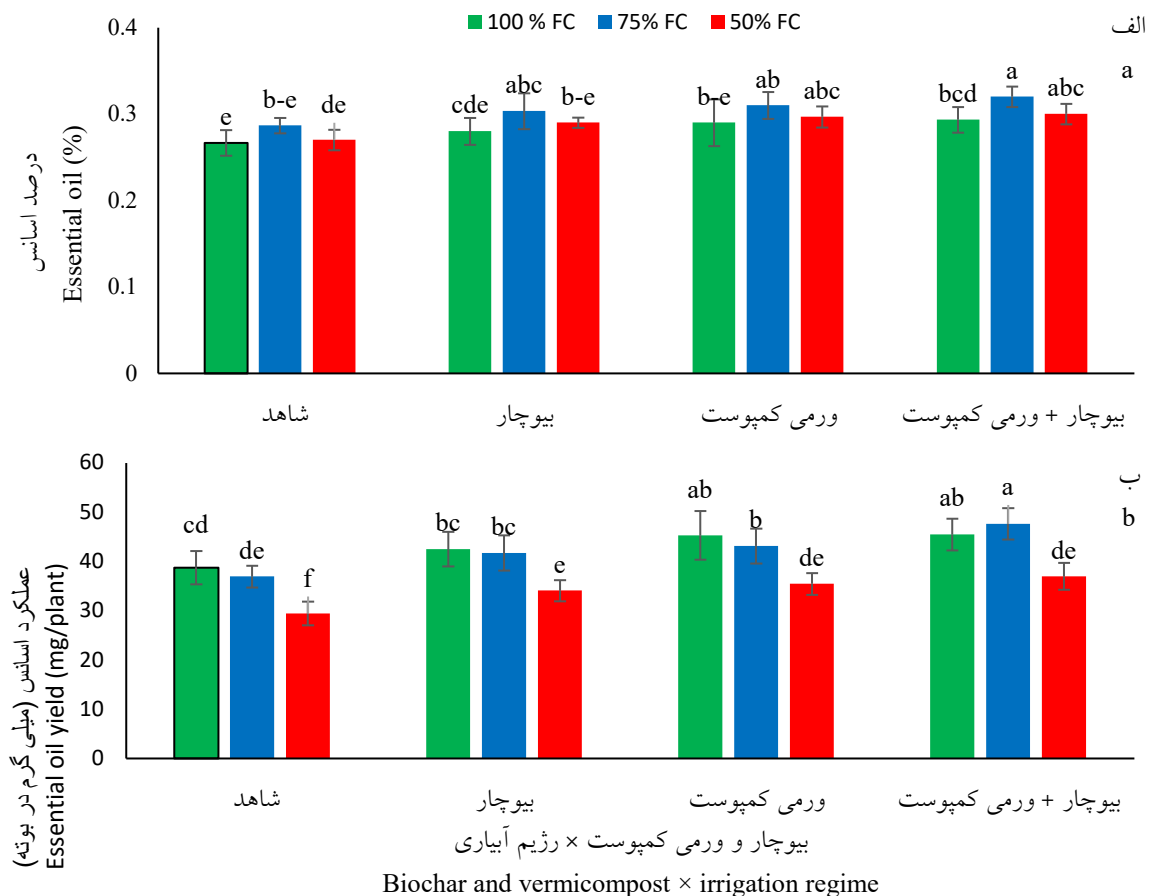
شکل ۳- فعالیت کاتالاز (الف) و فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (ب) گیاه ارس تحت تأثیر کاربرد بیوچار و ورمی کمپوست در شرایط مختلف آبیاری. حروف لاتین متفاوت روی ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P \leq 0.05$) در آزمون LSD هستند و بارها نشان‌دهنده خطای استاندارد آزمایش هستند.

Figure 3. Catalase activity (a) and superoxide dismutase activity (b) of juniper plant under the influence of biochar and vermicompost application under different irrigation conditions. Different Latin letters on the bars indicate significant differences ($P \leq 0.05$) in LSD test and bars indicate standard errors.

باعث افزایش ۲۰ درصدی درصد اسانس نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۴، الف). عملکرد اسانس با کاربرد ترکیبی ورمی کمپوست و بیوچار افزایش یافت، اما تنش ۵۰ درصد ظرفیت زراعی موجب کاهش آن شد. در شرایطی که از ترکیب ورمی کمپوست و بیوچار استفاده نشد، تنش ۵۰ درصد ظرفیت زراعی سبب کاهش ۲۴ درصدی عملکرد اسانس نسبت به شاهد شد. در مقابل، کاربرد همزمان ورمی کمپوست و بیوچار همراه با تنش ۷۵ درصد ظرفیت زراعی باعث افزایش عملکرد اسانس تا حدود ۲۳ درصد نسبت به شاهد شد (شکل ۴، ب).

اسانس

درصد و عملکرد اسانس تحت تأثیر اثرات تنش خشکی و اصلاح‌کننده خاک قرار گرفت (جدول ۴). درصد اسانس در اثر تنش رطوبتی ۷۵ درصد ظرفیت زراعی افزایش یافت، اما تنش ۵۰ درصد ظرفیت زراعی اختلاف معنی‌داری نشان نداد. همچنین، کاربرد بیوچار و ورمی کمپوست موجب افزایش معنی‌دار محتوای اسانس در سطوح تنش ۷۵ و ۵۰ درصد درصد ظرفیت زراعی شد ($P \leq 0.05$). استفاده ترکیبی از ورمی کمپوست و بیوچار در شرایط تنش ۷۵ درصد ظرفیت زراعی،



شکل ۴- درصد اسانس (الف) و عملکرد اسانس (ب) گیاه ارس تحت تأثیر کاربرد بیوپچار و ورمی کمپوست در شرایط مختلف آبیاری. حروف لاتین متفاوت روی ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P \leq 0.05$) در آزمون LSD هستند و بارها نشان‌دهنده خطای استاندارد آزمایش هستند.

Figure 4. Essential oil percentage (a) and essential oil yield (b) of juniper plant under the influence of biochar and vermicompost application under different irrigation conditions. Different Latin letters on the bars indicate significant differences ($P \leq 0.05$) in LSD test and bars indicate standard errors

عناصر پرمصرف

سبب افزایش ۲۰، ۸ و ۲۴ درصدی نیتروژن برگ نسبت به تیمار فاقد این مواد شد (شکل ۵، الف). همچنین در تیمارهای بدون کاربرد بیوپچار و ورمی کمپوست، تنش خشکی در سطوح ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب موجب کاهش ۱۲ و ۲۵ درصدی فسفر برگ نسبت به تیمار شاهد شد. در شرایط تنش ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، کاربرد ترکیبی بیوپچار و ورمی کمپوست موجب افزایش ۲۱ درصدی فسفر برگ نسبت به تیمار بدون اصلاح‌کننده خاک شد (شکل ۵، ب). علاوه بر این، تنش ۵۰ درصد ظرفیت زراعی موجب کاهش ۲۸

تجزیه واریانس عناصر برگ‌ی ارس در جدول ۵ نشان داده شده است. عناصر پرمصرف در اثر تنش خشکی کاهش معنی‌داری نشان دادند، اما با کاربرد بیوپچار و ورمی کمپوست افزایش یافتند ($P \leq 0.05$). در تیمارهای فاقد بیوپچار و ورمی کمپوست، تنش خشکی در سطوح ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب موجب کاهش ۱۱ و ۲۸ درصدی نیتروژن برگ نسبت به تیمار شاهد شد. در گیاهان تحت تنش ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، کاربرد بیوپچار، ورمی کمپوست و ترکیب آن‌ها به ترتیب

درصدی پتاسیم برگ شد، اما استفاده از بیوچار، ۱۰، ۱۸ و ۲۲ درصدی نسبت به شرایط بدون کاربرد ورمی کمپوست و ترکیب آن‌ها به ترتیب سبب افزایش اصلاح‌کننده خاک شد (شکل ۵، ج).

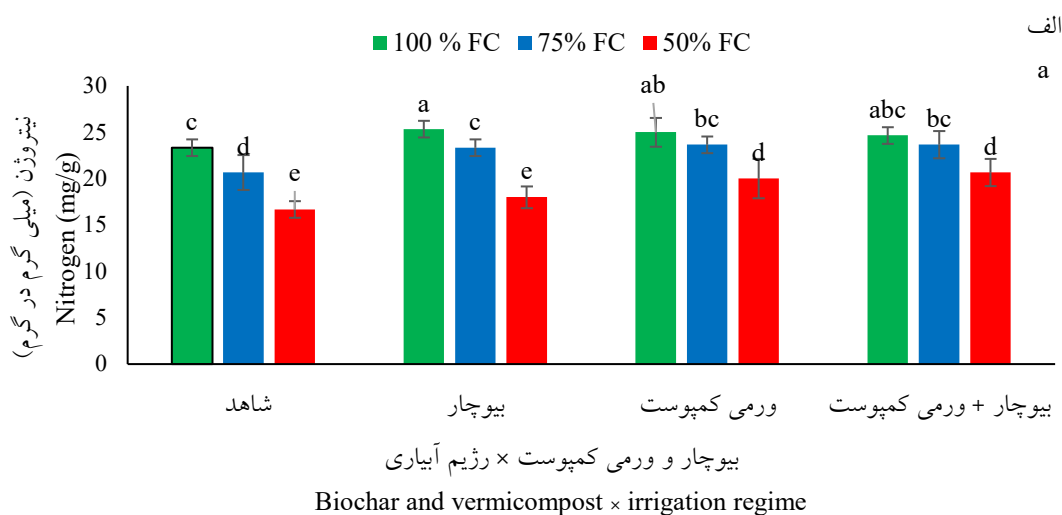
جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس اثر تنش خشکی و اصلاح‌کننده خاک بر نیتروژن، فسفر و پتاسیم

Table 5. Results of variance analysis of the effect of drought stress and soil amendment on Nitrogen, phosphorus and potassium

میانگین مربعات Mean squares			درجه آزادی df	منابع تغییرات Sources of changes
پتاسیم Potassium	فسفر Phosphorus	نیتروژن Nitrogen		
183.03 **	5.25 **	104.2 **	2	تنش خشکی Drought stress
19.66 **	0.89 **	14.91 **	3	اصلاح‌کننده خاک Soil conditioner
1.52 ns	0.01 ns	1.91 *	6	تنش خشکی × اصلاح‌کننده خاک Drought stress × soil conditioner
2.15	0.05	0.71	24	خطا Error
4.92	4.57	3.84	-	ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)

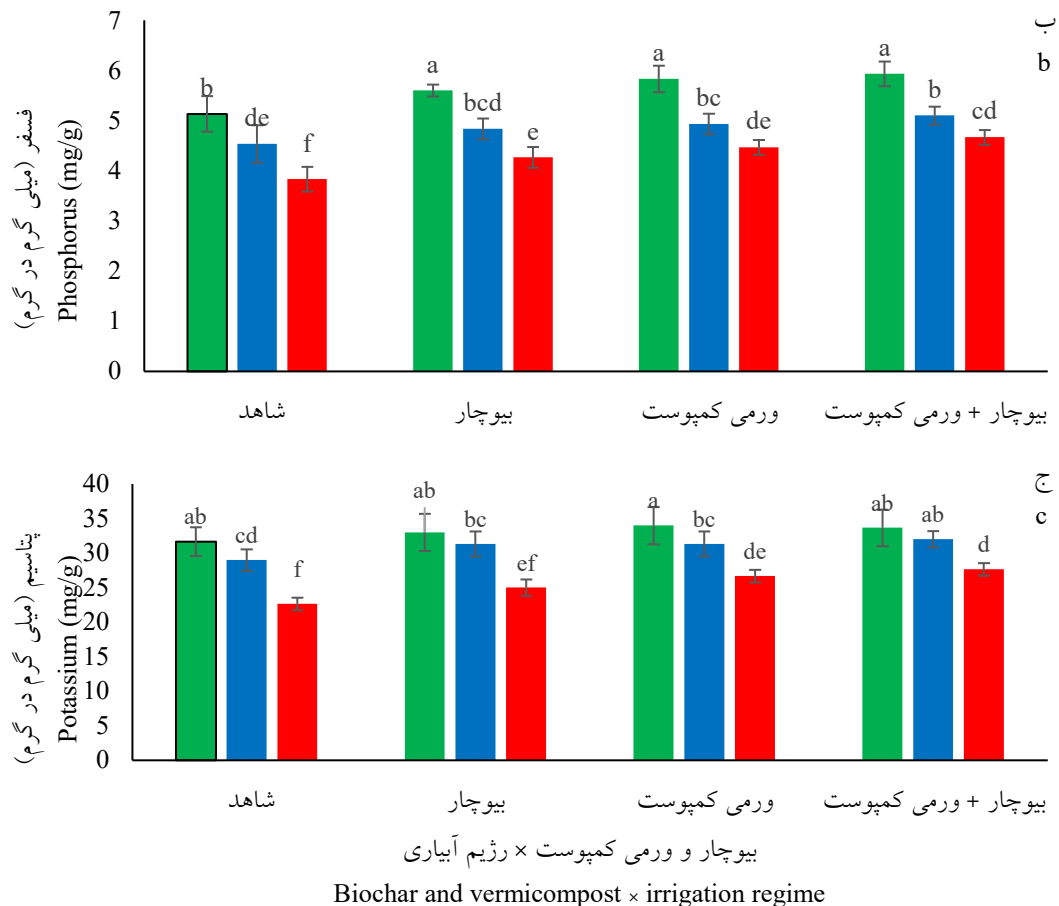
** بیانگر معنی‌داری در سطح یک درصد، * بیانگر معنی‌داری در سطح پنج درصد، ns بیانگر عدم معنی‌داری است.

** indicates significance at the 1% level, * indicates significance at the 5% level, ns indicates non-significance.



شکل ۵- عناصر برگ گیاه ارس تحت تأثیر کاربرد بیوچار و ورمی کمپوست در شرایط مختلف آبیاری. حروف لاتین متفاوت روی ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P \leq 0.05$) در آزمون LSD هستند و بارها نشان‌دهنده خطای استاندارد آزمایش هستند.

Figure 5. Leaf elements of juniper plant under the influence of biochar and vermicompost application under different irrigation conditions. Different Latin letters on the bars indicate significant differences ($P \leq 0.05$) in LSD test and bars indicate standard errors.



ادامه شکل ۵.

Continued Figure 5.

بحث

کاهش نرخ تعرق و کاهش تولید ماده خشک می‌شود، که در نهایت به کاهش رشد و وزن اندام‌های هوایی و زیرزمینی منجر می‌شود (Sarwar et al., 2023). در مقابل، کاربرد ورمی کمپوست و بیوچار، به‌ویژه به صورت ترکیبی، توانست اثرات منفی تنش خشکی را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد و وزن گیاه را افزایش دهد. این اثر مثبت احتمالاً به بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب، بهبود تهویه، و افزایش دسترسی گیاه به عناصر غذایی مربوط می‌شود (Mohkami et al., 2024). بیوچار با دارا بودن ساختار متخلخل، توانایی بالایی در حفظ رطوبت دارد، و ورمی کمپوست نیز با تأمین مواد آلی و میکروارگانیسم‌های مفید، رشد ریشه و جذب عناصر را

بیوچار و ورمی کمپوست به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های خاک، نقش مهمی در کاهش اثرات تنش خشکی در گیاهان ایفا می‌کنند (Ebrahimi et al., 2021)؛ این موضوع به‌ویژه برای گیاهانی مانند ارس که دارای ارزش جنگلی، زینتی و دارویی هستند، از اهمیت بیشتری برخوردار است. تنش سبب کاهش وزن اندام هوایی و ریشه گیاه ارس شد. کاهش وزن گیاه در شرایط تنش خشکی، به‌ویژه در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، احتمالاً ناشی از کاهش دسترسی به آب، کاهش جذب عناصر غذایی، و اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیک مانند فتوسنتز و تعادل آبی گیاه است (Mohkami et al., 2024). تنش خشکی موجب بسته‌شدن روزنه‌ها،

از بیوچار و ورمی کمپوست موجب افزایش مقدار کلروفیل در برگ‌های بابونه شده و در نتیجه، توان گیاه در مقابله با تنش خشکی ارتقاء یافته است که با نتایج این بررسی مطابقت دارد.

در این پژوهش، مشاهده شد که تنش خشکی همراه با کاربرد بیوچار و ورمی کمپوست موجب افزایش محتوای پرولین در برگ‌های گیاه ارس شد. این افزایش پرولین به عنوان یکی از سازوکارهای دفاعی گیاه برای مقابله با تنش خشکی شناخته می‌شود، چراکه پرولین با تنظیم اسمزی، حفظ پایداری ساختارهای سلولی و حذف رادیکال‌های آزاد، به گیاه در حفظ فعالیت‌های فیزیولوژیکی کمک می‌کند (Ahmad et al., 2024). بیوچار و ورمی کمپوست با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، مانند افزایش ظرفیت نگهداری آب، بهبود تغذیه گیاه و تحریک فعالیت میکروبی، می‌توانند موجب تقویت پاسخ‌های دفاعی مانند تولید بیشتر پرولین شوند. بنابراین، افزایش پرولین در این شرایط، حاصل برهم‌کنش تنش محیطی و بهبود شرایط تغذیه‌ای و فیزیولوژیکی ناشی از کاربرد مواد آلی اصلاح‌کننده است (Lalay et al., 2022; Behzadi et al., 2023).

فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز در گیاهان ارس تحت تنش خشکی افزایش شد. تنش خشکی منجر به افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن مانند سوپراکسید و پراکسید هیدروژن در گیاه می‌شود. تجمع این ترکیبات می‌تواند به ساختارهای سلولی آسیب بزند، بنابراین گیاه با فعالسازی سیستم آنتی‌اکسیدانی آنزیمی خود، مانند آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز، با این تنش مقابله می‌کند. آنزیم کاتالاز با تجزیه پراکسید هیدروژن به آب و اکسیژن مولکولی، نقش مهمی در حذف گونه‌های فعال اکسیژن ایفا می‌کند. همچنین، آنزیم سوپراکسید دیسموتاز رادیکال سوپراکسید را به پراکسید هیدروژن و اکسیژن

بهبود می‌بخشد. اثر هم‌افزای این دو ماده آلی، شرایط بهتری را برای رشد گیاه حتی در شرایط محدودیت آبی فراهم می‌کند (Khosropour et al., 2022; Mohkami et al., 2024). Ebrahimi و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که کاربرد جداگانه بیوچار و ورمی کمپوست موجب تعدیل اثرات تنش خشکی از طریق افزایش وزن گیاه شد. نتایج این پژوهش نیز نشان داد که ترکیب این دو ماده، به عنوان بهترین تیمار، بیشترین تأثیر را در افزایش وزن گیاه ارس داشت.

تنش خشکی، به‌ویژه در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، موجب کاهش معنی‌دار مقدار کلروفیل ارس شد. این کاهش می‌تواند به دلایلی مانند تولید گونه‌های فعال اکسیژن، تخریب ساختار کلروپلاست‌ها، کاهش جذب عناصر غذایی ضروری مانند نیتروژن و منیزیم، و محدود شدن سنتز کلروفیل در شرایط تنش خشکی مرتبط باشد (Murtaza et al., 2024). کاهش کلروفیل یکی از نشانه‌های اولیه آسیب فیزیولوژیکی ناشی از تنش آبی است که می‌تواند باعث کاهش ظرفیت فتوسنتزی گیاه شود (Ghaffari et al., 2022). در مقابل، کاربرد ورمی کمپوست و بیوچار، به‌ویژه استفاده‌ی ترکیبی از آن‌ها، توانست باعث افزایش معنی‌دار مقدار کلروفیل در شرایط تنش شود. این اثر مثبت احتمالاً به بهبود تغذیه گیاهی، افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک، و کاهش اثرات تنش اکسیداتیو مربوط می‌شود (Anwar et al., 2023). ورمی کمپوست با فراهم کردن عناصر غذایی ضروری از جمله نیتروژن، و بیوچار با بهبود ساختار خاک و حفظ رطوبت، شرایط مطلوب‌تری را برای سنتز و پایداری کلروفیل فراهم می‌سازند (Ghaffari et al., 2022). ترکیب این دو ماده، با اثر هم‌افزا، عملکرد فتوسنتزی گیاه را در شرایط محدودیت آبی حفظ می‌کند (Murtaza et al., 2024). در پژوهشی Naeemi et al (2023) بیان کردند که استفاده همزمان

تبدیل می‌کند، که گامی کلیدی در مهار آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش‌های زیستی و غیرزیستی به‌شمار می‌رود (Talaat et al., 2024). کاربرد بیوچار و ورمی کمپوست نیز با بهبود شرایط فیزیولوژیکی گیاه، به‌ویژه از طریق افزایش دسترسی به عناصر غذایی، تحریک رشد ریشه، و حمایت از فعالیت میکروبی سودمند در ریزوسفر، موجب تقویت فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود. این مواد آلی ممکن است از طریق بهبود وضعیت تغذیه‌ای، افزایش تولید هورمون‌های گیاهی، یا القای پاسخ‌های سیستمیک دفاعی، توان گیاه را در مقابله با استرس اکسیداتیو تقویت کرده و فعالیت آنزیم‌هایی مانند کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز را افزایش دهند (Zulfiqar et al., 2022; Rehaman et al., 2023). بر اساس نتایج Naeemi Golzard et al. (2023)، در شرایط تنش شدید (۵۰ درصد ظرفیت زراعی)، کاربرد ورمی کمپوست و بیوچار موجب کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شد. این کاهش فعالیت آنزیمی به این دلیل تفسیر شد که استفاده از این مواد آلی با بهبود شرایط فیزیولوژیکی گیاه، تولید گونه‌های فعال اکسیژن را در سلول‌ها کاهش می‌دهد. با کاهش سطح تنش اکسیداتیو، نیاز گیاه به فعالیت بالای آنزیم‌های دفاعی نیز کاهش می‌یابد و در نتیجه، فعالیت آنزیم‌هایی مانند کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز کاهش پیدا می‌کند. این یافته‌ها با نتایج این پژوهش هم‌راستا بوده و نشان می‌دهد که تیمارهای آلی می‌توانند با نزدیک کردن وضعیت گیاه به شرایط نرمال، از شدت پاسخ‌های تنشی بکاهد (Amirfakhrian et al., 2024).

درصد اسانس در شرایط تنش متوسط (۷۵ درصد ظرفیت زراعی) افزایش یافت، اما در تنش شدید (۵۰ درصد ظرفیت زراعی) تغییر معنی‌داری نداشت. این موضوع می‌تواند به پاسخ سازشی گیاه به تنش‌های

ملایم مرتبط باشد، به‌گونه‌ای که در تنش متوسط، گیاه با افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه مانند اسانس، از خود دفاع می‌کند. اما در شرایط تنش شدید، انرژی و منابع گیاه بیشتر صرف حفظ بقا شده و بنابراین تغییر چشم‌گیری در درصد اسانس مشاهده نمی‌شود (Peymaei et al., 2024). در پژوهشی مشابه،

Shahmohammadi et al. (2024) بیان کردند که تنش خشکی متوسط سبب افزایش درصد اسانس و تنش شدید سبب کاهش آن در گیاه سرخدار شد و همچنین عملکرد اسانس در شرایط تنش کاهش یافت. در مقابل، عملکرد اسانس در تنش شدید کاهش یافت که احتمالاً ناشی از کاهش رشد و زیست‌توده گیاه در اثر کمبود شدید آب است. کاهش ماده خشک منجر به کاهش کل اسانس تولیدی می‌شود، حتی اگر درصد آن ثابت باقی بماند (Babashpour-Asl et al., 2022). کاربرد ورمی کمپوست و بیوچار، به‌ویژه به‌صورت همزمان، توانست با ایجاد محیطی مساعد در اطراف ریشه، به بهبود تولید اسانس کمک کند. این مواد آلی با افزایش ظرفیت نگهداری آب و ارتقای دسترسی گیاه به مواد مغذی، نه تنها از افت عملکرد در شرایط کم‌آبی جلوگیری کردند، بلکه شرایط را برای افزایش تولید ترکیبات معطر نیز فراهم ساختند. به نظر می‌رسد این ترکیب آلی، با کاهش آثار منفی تنش خشکی بر فرایندهای متابولیکی، نقش مؤثری در پایداری و ارتقاء کیفیت اسانس ایفا کرده است (Heidarzadeh et al., 2022; Haghaninia et al., 2024).

در شرایط تنش خشکی، کاهش قابل توجه در غلظت عناصر پرمصرف مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم در بافت‌های گیاهی مشاهده می‌شود. این پدیده بیشتر ناشی از کاهش جذب آب و کاهش انتقال عناصر غذایی به ناحیه ریشه، محدود شدن رشد و توسعه ریشه‌ها، و

به‌ویژه به‌صورت ترکیبی، توانست تا حد زیادی این اثرات منفی را کاهش دهد و منجر به بهبود شاخص‌های رشد، افزایش فعالیت آنزیمی، حفظ تعادل اسمزی و افزایش غلظت عناصر غذایی (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) گردد. بررسی دقیق‌تر نتایج نشان می‌دهد که ترکیب ورمی‌کمپوست و بیوپچار عملکرد بهتری نسبت به کاربرد جداگانه هرکدام از آن‌ها داشته است، به‌ویژه در شرایط تنش متوسط خشکی (۷۵ درصد ظرفیت زراعی). بر این اساس، استفاده همزمان از این دو اصلاح‌کننده به‌عنوان یک راهکار مدیریتی مؤثر پیشنهاد می‌شود، چراکه علاوه بر بهبود عملکرد گیاه، به‌ویژه تولید اسانس، می‌تواند نقش مهمی در مصرف بهینه آب ایفا کند.

از نظر کاربردی، نتایج این پژوهش به‌ویژه برای نهالستان‌های تولید نهال ارس و همچنین عرصه‌های جنگلی که کاشت نهال ارس در آنها انجام می‌شود، قابل استفاده است. علاوه بر آن، این یافته‌ها می‌توانند به سایر عرصه‌های جنگلی که مستعد کشت گونه‌های مقاوم یا نیمه‌مقاوم به خشکی هستند نیز تعمیم یابند. همچنین، مدیریت تولید اسانس گونه‌های اسانس‌دار با استفاده از این نوع کودها و بهینه‌سازی مصرف آب می‌تواند از نظر اقتصادی نیز دارای اهمیت باشد.

References

- Ahmad, A.; Aslam, Z.; Abbas, R. N.; Bellitürk, K.; Hussain, S.; Hussain, S.; Elshikh, M. S., Enhancing wheat crop resilience to drought stress through cellulolytic microbe-enriched cow dung vermicompost. *ACS omega* **2024**, 9(2), 2123-2133.
- Amirfakhrian, Z., Abdossi, V., Mohammadi Torkashvand, A., Weisany, W., & Ghanbari Jahromi, M. Co-applied magnesium nanoparticles and biochar modulate salinity stress via regulating yield, biochemical attribute, and fatty

همچنین کاهش فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک‌زی است (Babalik and Göktürk Baydar, 2024). خشکی موجب اختلال در فرآیندهای زیستی خاک از جمله معدنی‌سازی مواد آلی و آزادسازی عناصر غذایی می‌شود که در نتیجه، دسترسی گیاه به این عناصر محدود می‌شود (Boutasknit et al., 2024). با این حال، کاربرد ورمی‌کمپوست و بیوپچار در شرایط تنش خشکی موجب بهبود معنی‌داری در غلظت عناصر غذایی پرمصرف در گیاهان شد. ورمی‌کمپوست با تأمین مستقیم عناصر غذایی، افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک، و تحریک فعالیت زیستی خاک، جذب عناصر را تسهیل می‌کند. افزون بر نقش آن‌ها در بهبود ویژگی‌های خاک، بیوپچار و ورمی‌کمپوست با افزایش فعالیت آنزیم‌های خاک، تحریک رشد ریشه، و بهبود تعادل میکروبی خاک، به افزایش تحمل گیاه نسبت به تنش‌های محیطی کمک می‌کنند (Rohim et al., 2024; Gullap et al., 2024).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی، به‌ویژه در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، اثرات منفی قابل‌توجهی بر رشد، ویژگی‌های فیزیولوژیکی و غلظت عناصر غذایی نهال‌های ارس دارد. درمقابل، استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی مانند ورمی‌کمپوست و بیوپچار،

- acid profile of *Physalis alkekengi* L. *Environmental Science and Pollution Research*, **2024**, 31(22), 31806-31817.
- Anwar, T.; Shehzadi, A.; Qureshi, H.; Shah, M. N.; Danish, S.; Salmen, S. H.; Ansari, M. J., Alleviation of cadmium and drought stress in wheat by improving growth and chlorophyll contents amended with GA3 enriched deashed biochar. *Scientific Reports* **2023**, 13(1), 18503.
- Arnon, D. I., Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant physiology* **1949**, 24(1), 1.

- Babalik, Z.; Göktürk Baydar, N., Drought and salt stress alter the mineral composition of grapevines. *Journal of Plant Nutrition* **2024**, 47(12), 1981-1995.
- Babashpour-Asl, M.; Farajzadeh-Memari-Tabrizi, E.; Yousefpour-Dokhanieh, A., Foliar-applied selenium nanoparticles alleviate cadmium stress through changes in physio-biochemical status and essential oil profile of coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves. *Environmental Science and Pollution Research* **2022**, 29(53), 80021-80031.
- Bates, L. S.; Waldren, R. P. A.; Teare, I. D., Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and soil* **1973**, 39, 205-207.
- Behzadi, Y.; Salehi, A.; Dehnavi, M. M.; Balouchi, H., Improvement of biochemical and antioxidant responses of borage (*Borago officinalis* L.) under drought stress conditions with the use of vermicompost and zinc sulfate. *Physiology and Molecular Biology of Plants* **2023**, 29(12), 1881-1896.
- Boutasknit, A.; Benaffari, W.; Anli, M.; Ouamnina, A.; Assouguem, A.; Lahlali, R.; Meddich, A., Comparative Effects of Compost and Arbuscular Mycorrhizal Fungi Versus NPK on Agro-Physiological, Biochemical and Tolerance Responses of Tomatoes to Drought. *Phyton* **2024**, (0031-9457), 93(12).
- Cenciareli, L. C.; Justi, M. S.; Ferreira-Silva, S. L.; de Almeida, L. F. R.; Neto, M. C. L., Physiological and biochemical changes associated with the induction of facultative CAM in *Pereskia aculeata* under drought stress and recovery. *Plant Physiology and Biochemistry* **2025**, 222, 109681.
- Chapman, J. C., The effect of potassium and nitrogen fertilizers on the yield, fruit quality and leaf analysis of Imperial mandarins. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **1982**, 22(117), 331-336.
- Dehestani-Ardakani, M.; Dashti, M.; Shirmardi, M.; Momenpour, A., (2019). Effect of cow manure and vermicompost on increasing salt tolerance of golden rain tree. *Forest Research and Development* **2019**, 5(4), 541-556.
- Ebrahimi, M.; Souri, M. K.; Mousavi, A.; Sahebani, N., Biochar and vermicompost improve growth and physiological traits of eggplant (*Solanum melongena* L.) under deficit irrigation. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* **2021**, 8, 1-14.
- Ghaffari, H.; Tadayon, M. R.; Bahador, M.; Razmjoo, J., Biochemical and yield response of sugar beet to drought stress and foliar application of vermicompost tea. *Plant Stress* **2022**, 5, 100087.
- Giannopolitis, C. N.; Ries, S. K., Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. *Plant physiology* **1977**, 59(2), 309-314.
- Gullap, M. K.; Severoglu, S.; Karabacak, T.; Yazici, A.; Ekinci, M.; Turan, M.; Yildirim, E., Biochar derived from hazelnut shells mitigates the impact of drought stress on soybean seedlings. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* **2024**, 52(1), 19-37.
- Hadinezhad, P.; Asadi, H.; Hojati, S. M.; Tafazoli, M.; Yousefpour, R., Factors affecting tree drought stress in Hyrcanian forests. *Forest Research and Development* **2025**, 10(4), 431-451.
- Haghaninia, M.; Javanmard, A.; Radicetti, E.; Rasouli, F.; Ruiz-Lozano, J. M.; Sabbatini, P., Adoption of arbuscular mycorrhizal fungi and biochar for alleviating the agro-physiological response of lavender (*Lavandula angustifolia* L.) subjected to drought stress. *Plant Stress* **2024**, 12, 100461.
- Heidarzadeh, A.; Modarres-Sanavy, S. A. M.; Mokhtassi-Bidgoli, A., Changes in yield and essential oil compositions of *dracocephalum kotschy* boiss in response to azocompost, vermicompost, nitroxin, and urea under water deficit stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* **2022**, 22(1), 896-913.
- Khosropour, E.; Weisany, W.; Tahir, N. A. R.; Hakimi, L., Vermicompost and biochar can alleviate cadmium stress through minimizing its uptake and optimizing biochemical properties in *Berberis integerrima bunge*. *Environmental Science and Pollution Research* **2022**, 29(12), 17476-17486.
- Lalay, G.; Ullah, S.; Ahmed, I., Physiological and biochemical responses of *Brassica napus* L. to drought-induced stress by the application of biochar and Plant Growth Promoting Rhizobacteria. *Microscopy research and technique* **2022**, 85(4), 1267-1281.
- Minocha, N.; Kaur, P.; Satyanarayana, T.; Kunze, G., Acid phosphatase production by recombinant *Arxula adenivorans*. *Applied Microbiology and Biotechnology* **2007**, 76, 387-393.

- Mohkami, A., Yazdanpanah, N., & Saeidnejad, A. H., The Effect of Vermicompost and Biochar Application on Morphophysiological Characteristics of Quinoa under Drought Stress Conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research* **2007**, 53(1), 129-140. (In Persian)
- Mueller, S.; Riedel, H. D.; Stremmel, W., Determination of catalase activity at physiological hydrogen peroxide concentrations. *Analytical biochemistry* **1997**, 245(1), 55-60.
- Murtaza, G.; Usman, M.; Ahmed, Z.; Zulfikar, F.; Moosa, A.; Iqbal, R.; Deng, G., Synergistic impact of vermicompost and different woody-biochar boosts eggplant growth traits and physiological-related parameters under deficit irrigation. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* **2024**, 1-22.
- Naderian, M.; Hafez Ghoran, S.; Abdjan, M. I.; Sabahi, Z.; Moein, S.; Jassbi, A. R.; Moein, M., A new labdane diterpenoid, in vitro and in silico cytotoxicity, and protease inhibitory effects of phytochemicals from *Juniperus polycarpus* K. Koch leaves. *Natural Product Research* **2024**, 1-12.
- Naeemi Golzard, M.; Ghanbari Jahromi, M.; Kalateh Jari, S., Effect of biochar and vermicompost on growth parameters and physiological characteristics of feverfew (*Tanacetum parthenium* L.) under drought stress. *Journal of Ornamental Plants* **2023**, 13 (2), 109-120.
- Peymaei, M.; Sarabi, V.; Hashempour, H., Improvement of the yield and essential oil of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) using external proline, uniconazole and methyl jasmonate under drought stress conditions. *Scientia Horticulturae* **2024**, 323, 112488.
- Rehaman, A.; Fatma, M.; Jan, A. T.; Shah, A. A.; Asgher, M.; Khan, N. A., Co-application of nitric oxide and vermicompost improves photosynthetic functions, antioxidants, and nitrogen metabolism in maize (*Zea mays* L.) grown under drought stress. *Journal of Plant Growth Regulation* **2023**, 42(6), 3888-3907.
- Ritchie, S. W.; Nguyen, H. T.; Holaday, A. S., Leaf water content and gas-exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop science* **1990**, 30(1), 105-111.
- Rohim, F. M.; Mahmoud, T. S. M.; Tong, Y.; Saleh, S. A., Influence of Moringa seed cake and vermicompost on soil microbial activity, growth, and productivity of 'Anna' apple trees. *Applied Fruit Science* **2024**, 66(1), 1-11.
- Saeidi Abueshaghi, Z.; Pilehvar, B.; Sayedena, S. V., Vegetative and physiological responses of purple seedlings to water stress. *Forest Research and Development* **2023**, 9(3), 349-363.
- Sarwar, G.; Anwar, T.; Malik, M.; Rehman, H. U.; Danish, S.; Alahmadi, T. A.; Ansari, M. J., Evaluation of potassium-enriched biochar and GA3 effectiveness for Improving wheat growth under drought stress. *BMC Plant Biology* **2023**, 23(1), 615.
- Sefidkon, F.; Abbasi, K.; Khaniki, G. B., Influence of drying and extraction methods on yield and chemical composition of the essential oil of *Satureja hortensis*. *Food chemistry* **2006**, 99(1), 19-23.
- Shahhoseini, R.; Rahimian Boogar, A., Phytochemical Analysis of Normal and Natural Mutant Types of *Juniperus polycarpus*. *Journal of Medicinal plants and By-Products* **2024**, 14(4), 357-362.
- Shahmohammadi, F.; Ghanbari Jahromi, M., Farhadpour, M., Kalateh Jari, S., & Torkashvand, A. M. Biochemical responses and dynamics of the taxol biosynthesis pathway genes in *Taxus baccata* L. plants sprayed with melatonin under drought stress. *Plant and Soil*, **2024**, 1-19.
- Sparks, R.; Bottoms, A.; Hay, W., *Prisons and the Problem of Order*. Clarendon Press. **1996**.
- Sultan, H.; Li, Y.; Ahmed, W.; Shah, A.; Faizan, M.; Ahmad, A.; Khan, M. N., Biochar and nano biochar: Enhancing salt resilience in plants and soil while mitigating greenhouse gas emissions: A comprehensive review. *Journal of Environmental Management* **2024**, 355, 120448.
- Talaat, N. B.; Abdel-Salam, S. A., An innovative, sustainable, and environmentally friendly approach for wheat drought tolerance using vermicompost and effective microorganisms: upregulating the antioxidant defense machinery, glyoxalase system, and osmotic regulatory substances. *BMC Plant Biology* **2024**, 24(1), 866.
- Zamani, S. M.; Mojerlou, S.; Alizadeh, M.; Ghanaei, S., First report of charcoal disease caused by *Biscogniauxia mediterranea* (De

- Not.) Kuntze on *Juniperus excelsa* M. Bieb. in Iran. *Trees* **2025**,39(1), 17.
- Zulfiqar, B.; Raza, M. A. S.; Saleem, M. F.; Aslam, M. U.; Iqbal, R.; Muhammad, F.; Khan, I. H., Biochar enhances wheat crop productivity by mitigating the effects of drought: Insights into physiological and antioxidant defense mechanisms. *PloS One* **2022**, 17(4), e0267819.