Crop Science Research in Arid Regions

homepage: https://cropscience.uoz.ac.ir/

Research Article
Volume 7, Issue 2, 2025, P. 295-313

Effect of biochar and zeolite on some morphophysiological characteristics of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in response to drought stress

Somayeh Mansoori [a], Mahmoud Ramroudi [*b], Zeynab Mohkami [c], Mohammad Reza Asgharipour [b], Esmaeel Seyedabadi [b]

[a] M.Sc. Student, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran
[b] Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran
[c] Department of Agronomy and Plant Breeding, Agriculture Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Iran

[*]Corresponding Author: ramroudi24@uoz.ac.ir

Received: 12 March 2025 Accepted: 5 July 2025 **DOI: 10.22034/CSRAR.2025.512040.1476**

How to cite this article:
Mansoori, S., Ramroudi, M., Mohkami, Z., Asgharipour, M. R., and Seyedabadi, E. 2025. Effect of biochar and zeolite on some morphophysiological characteristics of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in response to drought stress. *Crop Science Research in Arid Regions*, *7*(2), 295-313. https://doi.org/10.22034/csrar.2025.512040.1476

Abstract

Introduction: Drought stress arises from an imbalance between soil water evaporation and the availability of moisture, triggering a cascade of morpho-physiological and biochemical changes in plants that impair their growth, development, and productivity. Among the most detrimental impacts of drought is the diminished uptake of essential nutrients, which leads to deficiencies that exacerbate plant stress and reduce agricultural yields. As global populations continue to rise, ensuring food security under the pressures of climate change—including increasingly frequent and severe droughts—requires innovative, sustainable, and cost-effective agricultural practices. Modern strategies such as the application of soil amendments like zeolite and biochar have emerged as promising tools to mitigate drought-induced stress. These amendments enhance soil water retention, improve nutrient availability, and bolster plant resilience, offering a practical approach to sustaining crop productivity in water-scarce environments. By improving soil health, water-holding capacity, and nutrient uptake, these methods not only support plant growth under adverse conditions but also contribute to long-term agricultural sustainability, addressing the urgent need to adapt to climate variability. This study was designed and conducted to investigate the effects of biochar and zeolite organic fertilizers on the morphophysiological characteristics of safflower under drought stress conditions.

Materials and Methods: The study was conducted during the 2022–2023 growing season at the Agricultural Research Institute of Zabol's research farm, as split-factorial design within a randomized complete block framework, replicated three times. The main factor consisted of three irrigation levels based on field capacity (FC): 100% (well-watered), 75% (moderate stress), and 50% (severe stress). Sub-factors included factorial combinations of zeolite and biochar, each applied at three levels: 0% (control), 2.5%, and 5% of the soil's bulk weight. These treatments were designed to assess their influence on agrophysiological traits under varying water availability. Data collection encompassed a range of parameters, including plant height, leaf area, chlorophyll content, seed yield, and oil

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

percentage. Statistical analysis was performed using SAS software (version 9.1), with mean comparisons conducted at a 5% significance level using the Least Significant Difference (LSD) test.
Results and Discussion: The findings revealed that drought stress significantly reduced total leaf chlorophyll content. A triple interaction (drought stress × biochar × zeolite) significantly influenced multiple traits, including plant height, leaf area, number of secondary branches, inflorescences per branch, thousand-seed weight, relative leaf water content, carotenoid levels, seed yield, and oil percentage. Mean comparisons highlighted that the highest seed yield was achieved under moderate drought (75% FC) with a combination of 2.5% biochar and 5% zeolite, suggesting an optimal balance of water conservation and nutrient enhancement. Conversely, the maximum oil percentage was recorded under full irrigation (100% FC) with 5% biochar and 5% zeolite, reflecting the synergistic effect of these amendments in well-watered conditions. The highest carotenoid content was observed under 100% FC with 2.5% zeolite and biochar, indicating improved photosynthetic efficiency. These results underscore the capacity of biochar and zeolite to mitigate drought-induced declines in morphophysiological traits and yield components by enhancing soil moisture retention and nutrient availability.
Conclusion: This study demonstrates that reduced soil moisture adversely affects safflower's morphophysiological characteristics and seed yield. However, the application of biochar and zeolite effectively counteracts these negative effects, particularly under intensified drought conditions. By improving water retention, nutrient uptake, and plant resilience, these amendments offer a viable strategy for sustaining crop productivity in arid and semi-arid regions. The findings advocate for the integration of biochar and zeolite into agricultural practices as a sustainable solution to enhance food security and adapt to climate change challenges.
Keywords: Carotenoid, Deficit irrigation, Oil percentage, Phenol, Soil amendment

تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک/ جلد هفتم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۴، ص ۳۱۳-۲۹۵

مقاله پژوهشی

تأثیر بیوچار و زئولیت بر برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) در پاسخ به تنش خشکی

سمیه منصوری[۱]، محمود رمرودی*[۲]، زینب محکمی[۳]، محمدرضا اصغری پور[۲]، اسماعیل سیدآبادی[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۲- گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۳- گروه زراعت و اصلاح نباتات، پژوهشکده کشاورزی، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران

* مسئول مکاتبه: ramroudi24@uoz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۴ **DOI: 10.22034/CSRAR.2025.512040.1476**

چکیده

این تحقیق با هدف ارزیابی تأثیرات بیوچار و زئولیت بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک گلرنگ تحت شرایط تنش خشکی، به‌صورت اسپلیت - فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۰۲-۱۴۰۱ در مزرعه تحقیقاتی پژوهشکده کشاورزی پژوهشگاه زابل انجام شد. تیمارهای مورد بررسی شامل سه سطح آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) به‌عنوان عامل اصلی و ترکیب سطوح مختلف زئولیت و بیوچار (صفر، ۲/۵ و ۵ درصد وزن مخصوص ظاهری خاک) به‌عنوان عامل فرعی بودند. یافته‌ها حاکی از آن بود که محتوای کلروفیل کل برگ تحت تأثیر تنش خشکی و زئولیت معنی‌دار شد. در حالی که میزان فنل برگ به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر متقابل بیوچار و زئولیت بود. علاوه بر این، اثر متقابل سه‌گانه تنش خشکی، بیوچار و زئولیت بر ارتفاع بوته، سطح برگ، تعداد شاخه‌های جانبی، تعداد گل‌آذین در شاخه‌های فرعی، وزن هزار دانه، محتوای نسبی آب برگ، کاروتنوئید، عملکرد دانه و درصد روغن معنی‌دار شد. بر اساس مقایسه میانگین‌ها، بیشترین عملکرد دانه در تیمار آبیاری پس از ۷۵ درصد ظرفیت زراعی به همراه استفاده از ۲/۵ درصد بیوچار و ۵ درصد زئولیت مشاهده شد. همچنین، بالاترین درصد روغن در تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی با کاربرد همزمان ۵ درصد بیوچار و زئولیت به‌دست آمد. در حالی که بیشترین مقدار کاروتنوئید در تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی با استفاده از ۲/۵ درصد بیوچار و زئولیت ثبت شد و بالاترین فنل کل از تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی توام با ۵ درصد بیوچار حاصل شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده ترکیبی از بیوچار و زئولیت در شرایط تشدید تنش خشکی می‌تواند اثرات نامطلوب ناشی از کم‌آبی را تعدیل کرده و بهبود چشمگیری در ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک گلرنگ ایجاد نماید.

واژه‌های کلیدی: اصلاح کننده خاک، درصد روغن، فنل، کاروتنوئید، کم‌آبیاری

مقدمه

با افزایش جمعیت جهان و گسترش فعالیت‌های اقتصادی، رقابت برای دستیابی به منابع آب در حال تشدید است. تغییرات اقلیمی نیز از طریق کاهش بارش‌های منطقه‌ای و افزایش تبخیر ناشی از گرمایش جهانی، شرایط خشکی را وخیم‌تر می‌کند (Hussain *et al.*, 2016). برای پاسخگویی به نیازهای غذایی جمعیت رو به رشد و کاهش پیامدهای نامطلوب تغییرات اقلیمی مانند خشکسالی، توسعه راهکارهای اقتصادی و سازگار با محیط زیست ضروری است. این راهکارها باید بتوانند جذب مواد مغذی، سلامت خاک، ظرفیت نگهداری رطوبت، رشد و عملکرد محصولات را بهبود بخشند و کشاورزی پایدار را تقویت کنند (Singh *et al.*, 2022).

گلرنگ، به‌عنوان یک گیاه زراعی با پتانسیل بالا، به‌ویژه در مناطق گرم و خشک، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این گیاه به دلیل مقاومت بالا در برابر خشکی، شوری و قلیائیت خاک، گزینه مناسبی برای کشت در تناوب با سایر محصولات محسوب می‌شود (Khajehpour, 2006). گلرنگ با داشتن تیپ‌های بهاره و پاییزه و مقاومت به تنش‌های شوری و خشکی (Weiss, 2000)، آینده‌ای امیدوارکننده برای مناطق با محدودیت منابع آبی دارد.

تنش خشکی ناشی از عدم تعادل بین تبخیر از خاک و آب قابل دسترس است و باعث ایجاد تغییرات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاهان می‌شود که تأثیر منفی بر رشد و تولید آن‌ها دارد (Hussain *et al.*, 2016; Ashraf,

2010). خشکی منجر به بسته شدن روزنه‌ها، محدودیت تبادل گازی و کاهش فرآیند فتوسنتز می‌شود (Guo *et al.*, 2014). تحقیقات نشان داده‌اند که تنش خشکی در مرحله گلدهی، گرده‌افشانی را کاهش می‌دهد و با کاهش تعداد دانه‌های تشکیل‌شده، عملکرد دانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Abedi Baba-Arabi *et al.*, 2010; Joshan *et al.*, 2020). همچنین، تنش خشکی در مراحل زایشی باعث تسریع پیری و کاهش دوره پر شدن دانه‌ها می‌شود (Fanaei and Narouirad, 2014; Kar *et al.*, 2007). کاهش محتوای نسبی آب برگ و کلروفیل در گلرنگ تحت تنش خشکی نیز گزارش شده است (Mohammadi *et al.*, 2016). با افزایش شدت تنش خشکی، صفاتی مانند ارتفاع بوته، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و درصد روغن گلرنگ کاهش می‌یابد (Mohtashami and Tadayon, 2020; Khoshnam and Mamnoie, 2021; Joshan *et al.*, 2020). علاوه بر این، کاهش محتوای کلروفیل و کاروتنوئید برگ‌ها در گلرنگ تحت تنش خشکی مشاهده شده است (Toupchi Khosrowshahi *et al.*, 2020). از سوی دیگر، کاهش محتوای آب خاک باعث افزایش محتوای فنول‌های کل در گلرنگ می‌شود (Nazar *et al.*, 2020).

یکی از پیامدهای منفی تنش خشکی، کاهش جذب عناصر غذایی توسط گیاهان است که منجر به کمبود مواد مغذی می‌شود. استفاده از روش‌های نوین مانند کاربرد زئولیت و بیوچار می‌تولند به کاهش اثرات تنش‌های محیطی کمک کند و تغذیه گیاه را بهبود بخشد (Mahesh *et al.*, 2018; Murtaza *et al.*, 2023). زئولیت به دلیل ساختار متخلخل خود، قادر است آب و عناصر غذایی را در خود نگه دارد و به تعادل آب و مواد مغذی در خاک کمک کند. این ماده با رهاسازی تدریجی عناصر غذایی، از آبشویی نیتروژن جلوگیری می‌کند و در شرایط کم‌آبی، رشد و عملکرد محصولات را بهبود می‌بخشد (Mondal *et al.*, 2021).

بیوچار به‌عنوان یک ماده کربنی با ویژگی‌های منحصر به فرد مانند سطح ویژه بالا، ساختار متخلخل، ظرفیت تبادل کاتیونی بهتر و پایداری محیطی، گزینه مناسبی برای بهبود حاصلخیزی خاک و مدیریت زیست‌محیطی است. این ماده با افزایش آب در دسترس گیاهان، دفعات آبیاری را کاهش می‌دهد و رشد و عملکرد گیاهان را در شرایط نامساعد محیطی بهبود می‌بخشد (Zhang *et al.*, 2020; Abhishek *et al.*, 2022). مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از بیوچار می‌تواند به جای آبیاری ۱۰۰ درصد، با ۷۰ درصد نیاز آبی گیاه، همان میزان عملکرد را تأمین کند و در مصرف آب صرفه‌جویی نماید (Abbaspour *et al.*, 2017).

کاربرد زئولیت و بیوچار در گیاهان زراعی مختلف نتایج مثبتی داشته است. به‌عنوان مثال، استفاده از زئولیت باعث افزایش تعداد شاخه‌های فرعی، ارتفاع بوته و تولید ماده خشک در کلزا شده است (Motghi *et al.*, 2020). همچنین، بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گلرنگ با کاربرد زئولیت گزارش شده است (Shahbaz *et al.*, 2018). زئولیت با افزایش شاخص سطح برگ، شاخص کلروفیل و کارایی فتوسنتزی در آفتابگردان، فراهمی نیتروژن را بهبود می‌بخشد (Gholamhoseini *et al.*, 2013). علاوه بر این، کاربرد زئولیت باعث افزایش عملکرد دانه و روغن در گلرنگ و کلزا شده است (Abasiyeh *et al.*, 2013; Shahsavari, 2019). بهبود عملکرد و اجزای عملکرد در گیاهانی مانند گندم و سویا نیز با استفاده از زئولیت گزارش شده است (Mehrab *et al.*, 2016; Nozari *et al.*, 2013).

با توجه به اهمیت گلرنگ به‌عنوان یک گیاه دانه‌روغنی مقاوم به خشکی و شرایط سخت (Hall, 2016) و سازگاری آن با مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند سیستان و بلوچستان، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر کودهای آلی بیوچار و زئولیت بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک گلرنگ تحت شرایط تنش خشکی طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال زراعی ۱۴۰۱-۰۲ در مزرعه تحقیقاتی پژوهشکده کشاورزی زابل، واقع در منطقه چاه‌نیمه، انجام شد. این مزرعه در موقعیت جغرافیایی ۶۱ درجه و ۲۹ دقیقه شرقی و ۳۱ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی با ارتفاع ۴۸۹ متر از سطح دریا قرار دارد. منطقه مورد مطالعه دارای آب‌وهوای گرم و خشک است که میانگین بارش سالانه آن ۵۷ میلی‌متر و میزان تبخیر سالانه آن ۴۷۵۰ میلی‌متر می‌باشد. دمای هوا در این منطقه در فصول سرد و گرم به ترتیب از ۹٫۵- درجه سانتی‌گراد تا ۴۹ درجه سانتی‌گراد در نوسان است.

پیش از آغاز عملیات کاشت، نمونه‌هایی از خاک مزرعه جمع‌آوری شد و برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه هیدرولوژی پژوهشگاه زابل ارسال گردید. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل خاک در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، بیوچار مورد استفاده در این پژوهش از شرکت فرح‌بخش شیراز تهیه شد و از نظر میزان عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). زئولیت کلسیک نیز از شرکت صنایع معدنی کانی‌پور سمنان خریداری شد و ویژگی‌های آن در جدول ۳ ثبت شده است.

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک (عمق۳۰-۰ سانتی‌متر)

Table 1- Physical and chemical properties of soil (0-30 cm)

بافت خاک Soil texture	پتاسیم K (ppm)	فسفر P(ppm)	نیتروژن N (%)	ماده آلی O.M (%)	pH	ظرفیت زراعی F.C (%)	هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)
رسی شنی Sandy clay	175	11.8	0.09	0.8	8.5	24	1.9

جدول ۲- میزان نیتروژن، فسفر و پتاسیم موجود در بیوچار

Table 2- Amount of nitrogen, phosphorus, and potassium in biochar

عناصر غذایی Nutrition	پتاسیم K (g/kg)	فسفر P(g/kg)	نیتروژن N(g/kg)	pH
میزان	1.45	1.15	1.7	7.45

جدول ۳- درصد وزنی ترکیبات زئولیت کلسیک مورد استفاده در آزمایش

Table 3- Weight percentage of calcium zeolite compounds used in experiment

فسفر P_2O_5	منگنز MnO	منیزیم Mgo	پتاسیم K_2o	کلسیم Cao	آهن Fe_2o_3	آلومینیوم Al_2O_3	سیلیس SiO_2
0.013	0.025	0.65	3.7	3.1	1.5	8	71

این آزمایش به‌صورت اسپلیت - فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل سه سطح آبیاری پس از (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) به‌عنوان عامل اصلی و ترکیب سطوح مختلف کودهای زئولیت و بیوچار (صفر، ۲/۵ و ۵ درصد وزن مخصوص ظاهری خاک) به‌عنوان عامل فرعی بودند.

برای آماده‌سازی بستر کشت، زمین با گاوآهن برگردان‌دار شخم زده شد و سپس دو بار دیسک عمود بر هم برای خرد کردن کلوخه‌ها انجام گرفت. هر کرت آزمایشی شامل ۶ ردیف کاشت به طول ۴ متر با فاصله بین ردیف‌های ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها روی ردیف ۲۰ سانتی‌متر بود. کشت در اواسط آبان‌ماه انجام شد.

پیش از کشت، نمونه‌برداری از خاک از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری مزرعه انجام شد. نمونه‌ها برای تعیین منحنی رطوبتی خاک به آزمایشگاه هیدرولوژی پژوهشگاه زابل ارسال شدند و نقاط پتانسیلی خاک و میزان رطوبت موجود به‌صورت وزنی تعیین گردید. هر دو هفته یک‌بار نمونه‌برداری از خاک انجام شد و بر اساس درصد وزنی رطوبت، زمان رسیدن به هر یک از سطوح آبیاری محاسبه شد. سپس، آب مورد نیاز به‌صورت کنترل‌شده از مرحله ۶-۷ برگی به کرت‌ها اعمال گردید. پس از کاشت، عملیات زراعی مانند کنترل علف‌های هرز به‌صورت یکسان در تمام کرت‌ها انجام شد.

در مرحله گلدهی، با در نظر گرفتن اثرات حاشیه‌ای، نمونه‌برداری از بوته‌های خطوط داخلی از سه بوته هر کرت انجام شد. ویژگی‌های مانند محتوای نسبی آب برگ، کلروفیل کل برگ و فنل کل اندازه‌گیری شدند. میزان شاخص کلروفیل از برگ‌های جوان و کاملاً توسعه‌یافته با استفاده از دستگاه کلروفیل‌متر (SPAD-502) ساخت شرکت - Minolta ژاپن اندازه‌گیری شد. محتوای کلروفیل کل و کاروتنوئید نیز با استفاده از روش Arnon (1967) تعیین گردید. درصد روغن دانه با روش استخراج با حلال و دستگاه سوکسوله اندازه‌گیری شد (Joshi *et al.*, 1998).

در زمان رسیدگی فیزیولوژیک، ویژگی‌هایی شامل ارتفاع بوته، سطح برگ، تعداد شاخه‌های فرعی در بوته، تعداد گل در بوته و وزن هزار دانه اندازه‌گیری شد. برای این منظور، ۱۰ بوته به‌صورت تصادفی از هر کرت انتخاب و برداشت شد. برداشت نهایی در دهه اول خردادماه انجام گرفت. به‌منظور محاسبه عملکرد دانه، بوته‌های وسط هر کرت (با حذف اثرات حاشیه‌ای) برداشت شدند و پس از خشک‌شدن در آون، عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار محاسبه گردید. داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹.۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. مقایسه میانگین‌ها در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از آزمون LSD انجام شد.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که ارتفاع بوته تحت تأثیر اثر متقابل سه‌گانه تنش خشکی × بیوچار × زئولیت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). بر اساس مقایسه میانگین‌ها، کمترین ارتفاع بوته (۵۸/۱ سانتی‌متر) مربوط به تیمار آبیاری پس از ۵۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با عدم استفاده از بیوچار و زئولیت بود. در مقابل، بیشترین ارتفاع بوته در تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی با کاربرد ۵ درصد زئولیت و بیوچار مشاهده شد (جدول ۵). این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از بیوچار و زئولیت تأثیر معنی‌داری در کاهش اثرات منفی تنش خشکی بر ارتفاع بوته دارد.

با توجه به نتایج، می‌توان بیان کرد که اولین واکنش گیاه به تنش خشکی، کاهش رشد رویشی است که این یافته با نتایج سایر پژوهش‌ها هم‌خوانی دارد (Ahmad *et al.*, 2013; Batool *et al.*, 2015). تنش خشکی با ایجاد تغییرات در وضعیت آب سلولی گیاه، باعث کاهش رشد ساقه و ارتفاع بوته می‌شود (Ahmad *et al.*, 2013). مطالعات نشان داده‌اند که افزایش شدت تنش خشکی به‌طور قابل توجهی ارتفاع بوته و تعداد شاخه‌های گلرنگ را کاهش می‌دهد (Kaykhazhaleh *et al.*, 2022; Nabipour *et al.*, 2017). همچنین، برهمکنش تنش خشکی و کود بیوچار بر تعداد ساقه و ارتفاع ساقه گل گاوزبان اروپایی (*Borago officinalis* L.) تأثیر معنی‌داری داشته است (Taghizadeh Tabari *et al.*, 2020).

بر اساس نتایج تحقیقی، بیشترین طول ساقه گیاه پنیر (*Malva sylvestris*) در شرایط آبیاری متداول و با کاربرد زئولیت به‌دست آمد (Ahmadi Azar *et al.*, 2015). همچنین، در شرایط تنش خشکی، کاربرد بیوچار در گندم باعث بهبود معنی‌دار رشد و ویژگی‌های مرتبط با عملکرد شد و بیشترین ارتفاع بوته با کاربرد ۳۸ گرم بر کیلوگرم بیوچار حاصل گردید (Olmo *et al.*, 2014). این یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از زئولیت و بیوچار می‌تواند به کاهش اثرات منفی تنش خشکی بر رشد گیاهان کمک کند.

سطح برگ در بوته

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار برهمکنش سه‌عاملی تنش خشکی، بیوچار و زئولیت بر سطح برگ در سطح احتمال یک درصد بود (جدول ۴). بر اساس مقایسه میانگین‌ها، بیشترین سطح برگ (۱۹۱۵/۶ سانتی‌متر مربع بر متر مربع) در تیماری مشاهده شد که آبیاری پس از ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی انجام شده و همراه با مصرف ۵ درصد بیوچار و ۲/۵ درصد زئولیت بود. در مقابل، کمترین مقدار سطح برگ (۵۶۳ سانتی‌متر مربع بر متر مربع) در تیمار آبیاری پس از ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و بدون استفاده از بیوچار و زئولیت ثبت شد (جدول ۵). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که استفاده از بیوچار در شرایط تنش خشکی می‌تواند باعث افزایش ارتفاع بوته و سطح برگ در گیاهانی نظیر بامیه (Batool *et al.*, 2015) و ذرت (Haider *et al.*, 2015) شود. علاوه بر این، تحقیقات دیگری نیز بهبود عملکرد و زیست‌توده گندم را در اثر کاربرد بیوچار تأیید کرده‌اند (Olmo *et al.*, 2014). این یافته‌ها حاکی از آن است که بیوچار می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود رشد گیاهان در شرایط تنش خشکی مورد استفاده قرار گیرد.

تعداد شاخه‌های فرعی در بوته

تعداد شاخه‌های فرعی نیز تحت تأثیر برهمکنش سه‌عاملی تنش خشکی، بیوچار و زئولیت در سطح احتمال پنج درصد قرار گرفت و تفاوت‌های معنی‌داری بین تیمارها مشاهده شد (جدول ۴). با افزایش شدت تنش خشکی (کاهش آبیاری از ۱۰۰ به ۵۰

درصد ظرفیت زراعی)، تعداد شاخه‌های فرعی در تیمارهای کودی کاهش یافت. کمترین تعداد شاخه‌های فرعی در تیمار شاهد (بدون استفاده از بیوچار و زئولیت) و تحت شرایط آبیاری پس از ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد. در مقابل، بیشترین تعداد شاخه‌های فرعی در تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی توام با کاربرد ۵ درصد بیوچار و زئولیت به‌دست آمد (جدول ۵).

افزایش مقدار بیوچار و زئولیت در شرایط تنش شدید خشکی (آبیاری پس از ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) تأثیرات منفی تنش را به‌طور محسوسی کاهش داد. به‌ویژه، با افزایش میزان مصرف این کودها از صفر به ۵ درصد در شرایط تنش شدید، تعداد شاخه‌های فرعی بهبود قابل توجهی یافت (جدول ۵). این نتایج با یافته‌های تحقیقاتی که نشان می‌دهند اثرات مثبت کودها در شرایط تنش شدید خشکی بیشتر نمایان می‌شود، هم‌خوانی دارد (Kaykhazhaleh *et al.*, 2022).

تعداد شاخه‌های فرعی به عنوان شاخصی از رشد رویشی گیاه، تحت تأثیر تنش خشکی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (Gomes-Sanchez *et al.*, 2000; Sargazi *et al.*, 2023). این کاهش رشد رویشی می‌تواند به عنوان مکانیسمی برای افزایش تحمل گیاه به شرایط تنش تفسیر شود. مطالعات مختلف نیز کاهش تعداد شاخه‌های فرعی را در اثر تنش خشکی تأیید کرده‌اند (Jain *et al.*, 2010; Rezvani Moghaddam *et al.*, 2005). همچنین، تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از کودهای آلی مانند اسید هیومیک می‌تواند تعداد شاخه‌های فرعی را در گلرنگ بهبود بخشد (Sargazi *et al.*, 2023).

تعداد گل‌آذین در شاخه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهمکنش سه‌عاملی تنش خشکی، بیوچار و زئولیت در سطح احتمال پنج درصد تأثیر معنی‌داری بر تعداد گل‌آذین در شاخه داشت (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تیمار آبیاری پس از ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و بدون استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک (بیوچار و زئولیت) باعث کاهش تعداد گل‌آذین در شاخه نسبت به تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با کاربرد این اصلاح‌کننده‌ها شد (جدول ۵). این یافته‌ها بیانگر تأثیر مثبت بیوچار و زئولیت در افزایش تعداد گل‌آذین در گیاه گلرنگ است. مرحله گلدهی یکی از حساس‌ترین مراحل نمو گیاه به تنش خشکی محسوب می‌شود. تنش خشکی در این مرحله با کاهش دسترسی گیاه به آب، سبب کاهش تعداد گل‌آذین و افزایش ریزش گل‌ها می‌گردد. در نتیجه، تعداد گل‌آذین در شاخه به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. این نتایج با یافته‌های تحقیق دیگری هم‌سو می‌باشد (Jain *et al.*, 2010).

وزن هزار دانه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، برهمکنش سه‌عاملی تنش خشکی، بیوچار و زئولیت در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری بر وزن هزار دانه داشت (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که وزن هزار دانه در تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با کاربرد اصلاح‌کننده‌های خاک نسبت به تیمارهای آبیاری پس از ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با کاربرد این اصلاح‌کننده‌ها افزایش یافت. بیشترین وزن هزار دانه در تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با کاربرد ۵ درصد بیوچار و ۲/۵ درصد زئولیت مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد کودی در شرایط تنش شدید خشکی، افزایش ۵۶/۸۲ درصدی را نشان داد (جدول ۵).

در شرایط تنش خشکی، منابع تأمین‌کننده مواد فتوسنتزی برای دانه‌ها کاهش می‌یابد، که این امر ناشی از اختلال در انتقال مواد غذایی بوده و در نهایت سبب کاهش وزن دانه می‌شود. (Khavari *et al.*, 2021). همچنین، تحقیقات نشان داده‌اند که تنش خشکی با کوتاه‌کردن دوره پر شدن دانه، وزن دانه را کاهش می‌دهد (Ahmadi and Bahrani, 2009). به‌طور کلی، کاهش رطوبت خاک باعث ایجاد تغییرات مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاهان می‌شود که در نهایت کاهش وزن دانه را به دنبال دارد (Rezvani Moghaddam *et al.*, 2005).

بر اساس مقایسه میانگین‌ها، تغییرات وزن هزار دانه در اثر کاربرد بیوچار و زئولیت تحت شرایط تنش خشکی قابل توجه بود (جدول ۵). این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این اصلاح‌کننده‌ها می‌تواند اثرات منفی تنش خشکی را تعدیل کرده و از کاهش وزن هزار دانه جلوگیری کند. این یافته‌ها با نتایج تحقیق دیگری هم‌خوانی دارد و تأیید می‌کند که کاربرد زئولیت می‌تواند تأثیر مثبتی بر وزن هزار دانه در شرایط تنش خشکی داشته باشد (Abasiyeh *et al.*, 2013).

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی × بیوچار × زئولیت در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه داشت (جدول ۴). بر اساس مقایسه میانگین‌ها، بیشترین عملکرد دانه (۱۹۶۰ کیلوگرم بر هکتار) در تیمار آبیاری پس از ۷۵ درصد ظرفیت زراعی همراه با کاربرد ۲/۵ درصد بیوچار و ۵ درصد زئولیت به‌دست آمد. در مقابل، کمترین عملکرد دانه (۵۶۰ کیلوگرم بر هکتار) در تیمار آبیاری پس از ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم کاربرد بیوچار و زئولیت مشاهده شد (جدول ۶). گزارش‌ها نشان می‌دهند که با استفاده از بیوچار می‌توان به جای آبیاری ۱۰۰ درصد، آبیاری پس از ۷۰ درصد نیاز آبی گیاه را انجام داد و همان میزان عملکرد را با صرفه‌جویی در مصرف آب به‌دست آورد (Abbaspour *et al.*, 2017). همچنین، نتایج تحقیقات دیگر نشان داده است که کاربرد بیوچار باعث افزایش رشد، عملکرد و تولید میوه در گوجه‌فرنگی (Agbna *et al.*, 2017) و افزایش رشد کلزای زمستانه (Bamminger *et al.*, 2016) در شرایط خشکی شده است. علاوه بر این، استفاده از بیوچار در شرایط دیم باعث افزایش تولید بذر در آفتابگردان شده است (Paneque *et al.*, 2016).

جدول ۴-تجزیه واریانس برخی ویژگی‌های مرفوفیزیولوژیکی و عملکرد گلرنگ در تنش خشکی و کود بیوچار و زئولیت

Table 4-Analysis of variance (ANOVA) of some morphophysiological traits and yield of safflower under drought stress, biochar, and zeolite treatments

منبع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of Squares										
		ارتفاع گیاه Plant height	سطح برگ Leaf area	تعداد شاخه فرعی No. sub-branch	تعدادگل آذین در شاخه No. inflorescences per branch	وزن هزاردانه ۱۰۰۰ 1000-seed weight	عملکرد دانه Seed yield	کلروفیل برگ Chlorophyll total	کارتنوئید Carotenoid	محتوی آب نسبی Relative water content	فنل کل Total Phenole	درصد روغن Oil percentage
تکرار Replication	2	0.16*	119.008**	10.75**	0.11**	7.01ns	51056**	2.23ns	1095**	270.6**	17.09ns	13.60ns
تنش خشکی Drought stress (D)	2	1.27**	15.60**	159**	4.59**	33.75*	2514760**	53.016*	153**	250.85*	21.94**	402.35**
خطای اول Ea	4	0.07	56.42	5.8	0.82	7.37	137204	0.48	262	104.2	79.91	39311
بیوچار Biochar (B)	2	0.26**	14.808**	48.9**	15.59**	15.86**	1367353**	10.26*	135*	411.26**	44.91**	92149**
زئولیت Zeolite (Z)	2	0.094**	43.21**	111**	2.25**	3.52*	419916*	22.24*	396ns	107.22**	8.1ns	17748ns
D×B	4	0.18**	7.88**	19.7**	2.96*	19.83**	299234*	2.35**	38**	120.72ns	255**	25564ns
D×Z	4	0.13*	5.33*	26.98*	1.46**	21.28**	441975*	2.17**	25.17**	374.83*	88.2ns	2066ns
B×Z	4	0.5**	15.89**	16.5**	1.5**	16.32**	441190*	1.33**	76.05**	105.67*	91.7ns	2575ns
D×B×Z	8	0.17**	126.51**	20.4*	1.94*	12.24**	481449**	0.48**	291.36*	359.4**	251ns	35143**
خطای دوم Eb	48	1.91	0.22	7.8	0.85	7.27	91745	0.83	7.58	35.8	12.3	960
CV(%)	-	7.14	15.53	7.67	14.22	9.43	10.74	0.53	4.62	3.62	6.81	11.8

ns ، * و **: به‌ترتیب بدون اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

ns, *, and **: indicate no significant difference, significant difference at the 5% probability level, and significant difference at the 1% probability level, respectively

کاربرد زئولیت در کشت کلزا تحت تنش خشکی باعث افزایش عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و عملکرد روغن شده است (Shahsavari, 2019). همچنین، نتایج تحقیقات نشان داده است که استفاده از زئولیت در شرایط آبیاری با آب فاضلاب، عملکرد دانه و شاخص سطح برگ در سورگوم را افزایش می‌دهد (GhassemiSahebi *et al.*, 2020).

گزارش‌های متعددی وجود دارد که نشـــان می‌دهد اســـتفاده از بیوچار در شـــرایط کمبود آب می‌تواند باعث افزایش رشـــد، زیست‌توده، عملکرد گیاه، فتوسنتز، جذب عناصر غذایی و بهبود ویژگی‌های تبادلات گازی شـــود. بیوچار با افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک و بهبود خصوصیات فیزیکی و بیوشیمیایی خاک، اثرات منفی تنش خشکی را کاهش می‌دهد (Ali *et al.*, 2017). همچنین، افزایش عملکرد و جذب عناصـــر غذایی در چغندرقند با کاربرد بیوچار گزارش شـده اسـت (Durukan *et al.*, 2020).

با توجه به نتایج این تحقیق و مطالعات پیشـــین، می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد بیوچار و زئولیت در شرایط تنش خشکی می‌تولند به‌طور قابل توجهی عملکرد دانه را بهبود بخشـــد. این کودها با افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک، بهبود جذب عناصر غذایی و کاهش اثرات منفی تنش خشـــکی، نقش مؤثری در افزایش عملکرد گیاهان زراعی ایفا می‌کنند.

جدول ۵- مقایسه میانگین برهمکنش برخی ویژگی‌های مرفوفیزیولوژیکی و عملکرد گلرنگ تحت تنش خشکی و کود بیوچار و زئولیت

Table 5- Means comparison of some qualitative traits of safflower under drought stress, biochar, and zeolite treatments

تنش خشکی Drought stress (%FC)	بیوچار (درصد حجمی) Biochar	زئولیت (درصد حجمی) Zeolite	ارتفاع بوته Plant height (cm)	سطح برگ Leaf area ($cm^2.cm^2$)	تعداد شاخه فرعی No. branch per plant	تعداد گل‌آذین در شاخه No inflorescence per branch	وزن هزار دانه 1000-seed weight(g)
	0	0	67.1 g	1295 b	6.0 c	11.0 cd	37.95 b
	0	2.5	79.0 f	1380 c	6.5 b	12.1 c	38.80 a
	0	5	79.6 f	1400 c	6.5 b	12.0 c	40.42 a
	2.5	0	78.1 f	1520 c	5.0 c	11.0 cd	37.23 b
100	2.5	2.5	88.0 d	1720 ab	5.6 c	11.1 c	39.59 a
	2.5	5	88. 9 d	1630 b	6.0 bc	15.0 b	40.27 a
	5	0	88.0 d	1637 b	6.5 b	12.0 c	40.36 a
	5	2.5	105.0 a	1915.6 a	9.0 a	15.1 b	44.0 a
	5	5	107.1 a	1830 a	9.1 a	19.9 a	40.10 a
	0	0	65.0 g	700 f	6.0 bc	15.1 b	34.80 b
	0	2.5	85.1 d	705 f	8.5 ab	18.0 ab	35.63 ab
	0	5	89.0 d	799 e	6.2 bc	15.0 b	37.39 a
	2.5	0	86.9 e	897 e	5.5 c	11.0 cd	36.49 ab
75	2.5	2.5	91.0 c	938 de	6.1 bc	11.1 cd	34.80 b
	2.5	5	95.1 b	1064 d	6.5 b	14.0 bc	31.59 b
	5	0	88.9 d	1080 d	6.1 bc	15.9 b	33.98 b
	5	2.5	90.0 c	1164 cd	6.4 b	15.0 b	37.18 a
	5	5	88.9 d	1298 c	7.0 b	15.1 b	35.41 ab
	0	0	58.1 h	563 g	4.1 c	9.5 e	19.00 f
	0	2.5	81.0 d	580 g	6.0 bc	11.0 cd	19.89 f
	0	5	85.1 d	551 g	5.5 c	12.0 c	20.15 f
	2.5	0	85.9 d	573 g	6.0 bc	10.0 d	23.11 e
50	2.5	2.5	85.9 d	590 g	6.1 bc	11.5 c	25.74 e
	2.5	5	87.1 d	597 g	6.0 bc	12.1 c	27.16 d
	5	0	80.0 de	603 fg	7.0 b	12.0 c	28.24 cd
	5	2.5	80.9 de	624 fg	7.0 b	10.1 d	30.17 c
	5	5	91.1 c	620 fg	8.0 a	13.0 bc	31.02 c

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار با هم ندارند.

In each column, the averages with the same letters do not have a significant difference based on the LSD test at the five percent probability level.

کلروفیل کل برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل سه‌گانه تنش خشکی × بیوچار × زئولیت در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری بر رنگیزه‌های فتوسنتزی گلرنگ داشت (جدول ۴). بیشترین میزان کلروفیل کل (۱۲/۴۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بافت) در تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با کاربرد ۲/۵ درصد بیوچار و ۵ درصدزئولیت مشاهده شد. در مقابل، تنش خشکی باعث کاهش کلروفیل کل در برگ‌های گلرنگ گردید و کمترین میزان کلروفیل (۴/۸۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بافت) در تیمار آبیاری پس از ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم کاربرد کود به‌دست آمد (جدول ۶). این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط تنش خشکی، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی تحت تأثیر کاربرد بیوچار و زئولیت قرار گرفته است.

نتایج تحقیقات نشان داده است که کلروفیل کل برگ ذرت به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر کاربرد بیوچار قرار می‌گیرد (Mradvisi, 2016). در بسیاری از گونه‌های گیاهی، کاهش تولید گیاه در شرایط تنش خشکی معمولاً با کاهش ظرفیت فتوسنتزی مرتبط است (Ghasemi Masarmi *et al.*, 2022). هرچه گیاه سطح برگ بیشتری داشته باشد، از انرژی خورشیدی بیشتری استفاده کرده و فتوسنتز بیشتری انجام می‌دهد. برعکس، با کاهش دوره رشد گیاه تحت تأثیر تنش خشکی، برگ‌ها سریع‌تر رنگیزه‌های سبز خود را از دست داده و میزان کلروفیل کاهش می‌یابد. تنش خشکی باعث اختلال یا حتی آسیب به اجزای فتوسنتزی گلرنگ شده و بر کارایی کوانتومی فتوسیستم‌های فتوسنتزی تأثیر منفی می‌گذارد (Sibi *et al.*, 2012).

در شرایط تنش خشکی، فعالیت‌های فتوشیمیایی گیاه مهار می‌شود. محتوای کلروفیل برگ تغییر کرده و فعالیت آنزیم‌های چرخه کالوین در فرآیند فتوسنتز کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج تحقیقات، کلروفیل برگ به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های نشان‌دهنده فشارهای محیطی وارد بر گیاه شناخته می‌شود. مقدار کلروفیل برگ در گیاهان تحت تنش کاهش یافته و این کاهش باعث کاهش جذب نور توسط گیاه می‌شود (Ghasemi Masarmi *et al.*, 2022).

تحت شرایط تنش خشکی، تغییراتی مانند کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی و کاهش راندمان کوانتومی در گیاهان رخ می‌دهد (Guo *et al.*, 2016). نتایج تحقیقات نشان داده است که با افزایش میزان زئولیت، افزایش محتوای نسبی کلروفیل برگ مشاهده می‌شود. این افزایش در فعالیت‌های فتوسنتزی ممکن است ناشی از نقش زئولیت در سنتز پیش‌سازهای رنگیزه‌های کلروفیل باشد (Kumar and Kumar, 2008).

کاروتنوئیدها

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که میزان کاروتنوئید تحت تأثیر اثر متقابل سه‌گانه تنش خشکی × بیوچار × زئولیت قرار گرفت (جدول ۴). بر اساس مقایسه میانگین‌ها، بیشترین میزان کاروتنوئید (۲/۶۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بافت) در تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با کاربرد ۲/۵ درصد بیوچار و زئولیت مشاهده شد (جدول ۶).

کاروتنوئیدها نقش مهمی در حفاظت گیاهان در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از تنش خشکی ایفا می‌کنند. این ترکیبات در سمیت‌زدایی از کلروفیل برگ مؤثر بوده و با کاهش اثرات سمی رادیکال‌های آزاد، به حفظ سلامت سلول‌های گیاهی کمک می‌کنند (Mansourifar *et al.*, 2012; Ghasemi Masarmi *et al.*, 2022). نتایج تحقیقات نشان داده است که کاربرد بیوچار می‌تواند باعث بهبود محتوای رنگیزه‌های آنتوسیانین، کاروتنوئیدها و کلروفیل در گیاهان شود. به‌عنوان مثال، در اسفناج، استفاده از بیوچار منجر به افزایش این رنگیزه‌ها شده است (Younis *et al.*, 2015). این یافته‌ها نشان می‌دهد که بیوچار می‌تواند با بهبود وضعیت رنگیزه‌های فتوسنتزی، مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی مانند خشکی را افزایش دهد. با توجه به نتایج این تحقیق و مطالعات پیشین، می‌توان نتیجه گرفت که کاروتنوئیدها به‌عنوان ترکیبات محافظتی در شرایط تنش خشکی عمل می‌کنند و کاربرد بیوچار و زئولیت می‌تواند به افزایش محتوای این رنگیزه‌ها و بهبود مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی کمک کند.

محتوای نسبی آب برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که محتوای نسبی آب برگ به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر متقابل سه‌گانه تنش خشکی × بیوچار × زئولیت قرار گرفت (جدول ۴). بر اساس مقایسه میانگین‌ها، بالاترین محتوای نسبی آب برگ (۷۴/۱ درصد) در

تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با کاربرد ۵ درصد بیوچار مشاهده شد. در مقابل، کمترین محتوای نسبی آب برگ (۴۱/۸ درصد) در تیمار آبیاری پس از ۵۰ درصد ظرفیت زراعی توام با ۵ درصد بیوچار و عدم کاربرد کود به‌دست آمد (جدول ۶).

محتوای نسبی آب برگ و پتانسیل آب برگ در گلرنگ تحت تأثیر کمبود آب کاهش یافت. این یافته‌ها با نتایج سایر تحقیقات هم‌خوانی دارد که نشان می‌دهند تنش خشکی باعث کاهش محتوای نسبی آب برگ و کاهش عملکرد گیاهان دارویی مانند بادرنجبویه می‌شود (Munne-Bosch *et al.*, 1999). گیاهانی که محتوای نسبی آب برگ بالاتری دارند، توانایی بیشتری برای مقابله با تنش خشکی از خود نشان می‌دهند. تنش خشکی با کاهش جذب آب از خاک توسط ریشه‌ها یا افزایش تعرق از سطح برگ‌ها، محتوای نسبی آب را در گیاهانی مانند کلزا (Batool *et al.*, 2022)، گلرنگ (Beyyavas *et al.*, 2011)، جو (Abdelaal *et al.*, 2020) و ذرت (Tayyab *et al.*, 2020) کاهش می‌دهد.

جدول ۶- مقایسه میانگین برهمکنش برخی ویژگی‌های مرفوفیزیولوژیکی و عملکرد گلرنگ تحت تنش خشکی و کود بیوچار و زئولیت

Table 6- Means comparison some morophysiological traits and yield of safflower under drought stress, biochar, and zeolite treatment

تنش خشکی Drought stress (%FC)	بیوچار (درصد حجمی) Biochar	زئولیت (درصد حجمی) Zeolite	عملکرد Yield (kg ha^{-1})	کلروفیل Chlorophyll total (mg.g^{-1} FW)	کاروتنوئید Carotenoid (mg.g^{-1} FW)	محتوی آب نسبی Relative water content (%)	درصد روغن Oil percentage
	0	0	1320 ^{f}	9.63 $^{d-i}$	0.94 ^{cd}	66.58 ^{cd}	25.32 ^{b}
	0	2.5	1418 ^{e}	10.78 $^{b-e}$	2.32 ^{b}	70.55 ^{ab}	26.72 ^{b}
	0	5	1450 ^{e}	10.52 $^{b-g}$	2.34 ^{b}	68.71 ^{b}	26.48 ^{b}
	2.5	0	1430 ^{e}	10.67 $^{b-f}$	0.80 ^{bd}	71.38 ^{a}	27.72 ^{ab}
100	2.5	2.5	1457 ^{e}	10.93 $^{a-d}$	2.64 ^{a}	70.5 ^{a}	29.54 ^{a}
	2.5	5	1520 ^{d}	11.71 ^{ab}	1.82 ^{de}	71.43 ^{ab}	25.74 ^{b}
	5	0	1432 ^{e}	10.61 $^{b-f}$	1.84 ^{ce}	74.11 ^{a}	26.52 b
	5	2.5	1447 ^{e}	11.30 ^{abc}	2.13 ^{bc}	68.52 ^{b}	28.82 ^{a}
	5	5	1598 ^{d}	12.43 ^{a}	2.14 ^{bc}	69.74 ^{b}	32.79 ^{a}
	0	0	1490 ^{de}	8.26 ^{ijk}	2.09 ^{bd}	68.0 ^{c}	18.6 ^{d}
	0	2.5	1573 ^{d}	9.60 $^{d-i}$	1.26 ^{g}	66.4 ^{cd}	19.71 ^{cd}
	0	5	1652 ^{cd}	9.70 $^{d-i}$	1.49 ^{fg}	65.1 ^{d}	20.18 ^{cd}
	2.5	0	1680 ^{cd}	9.22 $^{f-k}$	1.93 ^{ce}	63.02 ^{de}	21.94 ^{c}
75	2.5	2.5	1720 ^{c}	10.14 $^{c-g}$	1.63 ^{ef}	61.8 ^{e}	23.74 ^{c}
	2.5	5	1960 ^{a}	9.54 $^{d-i}$	1.63 ^{ef}	60.7 ^{e}	22.6 ^{c}
	5	0	1830 ^{b}	9.07 $^{h-k}$	1.50 ^{fg}	60.3 ^{e}	25.4 ^{b}
	5	2.5	1856 ^{b}	10.80 $^{b-e}$	1.23 ^{g}	63.0 ^{de}	28.3 ^{a}
	5	5	1900 ^{ab}	10.97 $^{a-d}$	1.18 ^{h}	65.0 ^{d}	31.8 ^{a}
	0	0	560 ^{i}	4.89 ^{m}	1.07 ^{i}	51.0 ^{f}	10.9 ^{g}
	0	2.5	581 ^{hi}	7.90 ^{kl}	1.05 ^{i}	49.8 ^{f}	12.11 ^{fg}
	0	5	592 ^{hi}	8.74 ^{hijk}	1.00 ^{j}	48.3 ^{fg}	14.3 ^{f}
	2.5	0	590 ^{hi}	8.24 ^{ijk}	0.98 ^{j}	49.0 ^{f}	15.0 ^{f}
50	2.5	2.5	603 ^{h}	9.42 $^{e-j}$	0.87 ^{k}	50.0 ^{f}	15.8 ^{f}
	2.5	5	632 ^{h}	9.93 $^{c-g}$	0.85 ^{k}	43.1 ^{h}	16.5 ^{e}
	5	0	689 ^{hf}	6.730 ^{l}	0.73 ^{kl}	41.8 ^{h}	17.31 ^{de}
	5	2.5	691 ^{h}	7.95 ^{jkl}	0.69 ^{l}	42.35 ^{h}	17.5 ^{de}
	5	5	789 ^{g}	9.60 $^{d-i}$	0.60 ^{l}	43.0 ^{h}	18.79 ^{d}

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار با هم ندارند.

In each column, the averages with the same letters do not have a significant difference based on the LSD test at the five percent probability level.

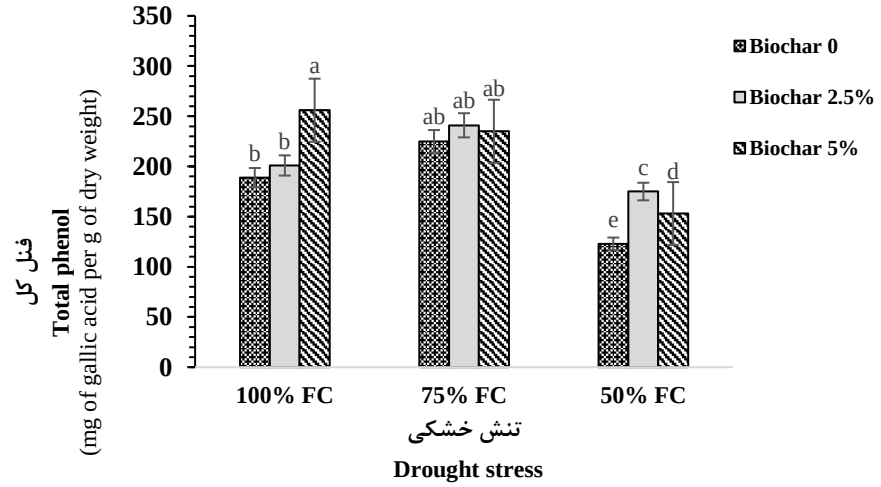
در واکنش گلرنگ بهاره به رژیم‌های مختلف آبیاری گزارش شده است که تنش خشکی باعث کاهش سرعت فتوسنتز و محتوای نسبی آب برگ می‌شود (Singh *et al.*, 2016). از سوی دیگر، افزایش محتوای نسبی آب برگ و فعالیت فتوسنتزی در دانهال‌های کلم با کاربرد بیوچار نیز گزارش شده است (Yildirim *et al.*, 2021).

کاربرد بیوچار و زئولیت در شرایط تنش خشکی می‌تواند به بهبود محتوای نسبی آب برگ کمک کند. این کودها با افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک و بهبود جذب آب توسط ریشه‌ها، اثرات منفی تنش خشکی را کاهش داده و محتوای نسبی آب برگ را افزایش می‌دهند. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از بیوچار و زئولیت می‌تولند به عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود تحمل گیاهان به تنش خشکی مورد استفاده قرار گیرد.

فنل کل

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل تنش خشکی × بیوچار در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری بر ترکیبات فنل کل گلرنگ داشت (جدول ۴). بر اساس این نتایج، بیشترین میزان فنل کل (۲۵۶ میلی‌گرم اسید گالیک بر گرم وزن خشک گیاه) در تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با کاربرد ۵ درصد بیوچار مشاهده شد. در مقابل، کمترین میزان فنل کل (۱۲۳ میلی‌گرم اسید گالیک بر گرم وزن خشک گیاه) در تیمار آبیاری پس از ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم کاربرد بیوچار به‌دست آمد (شکل ۱). ترکیبات فنلی به‌عنوان متابولیت‌های ثانویه گیاهی نقش مهمی در دفاع گیاه در برابر تنش‌های محیطی مانند خشکی ایفا می‌کنند. افزایش میزان فنل کل در شرایط تنش خشکی و با کاربرد بیوچار نشان‌دهنده نقش محافظتی این ترکیبات در کاهش اثرات منفی تنش است. این یافته‌ها با نتایج تحقیقات دیگر هم‌خوانی دارد که نشان می‌دهند کاربرد بیوچار می‌تواند باعث بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان، از جمله افزایش ترکیبات فنلی شود (Shahbaz *et al.*, 2018).

با توجه به نتایج این تحقیق، می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد بیوچار در شرایط تنش خشکی می‌تواند به افزایش ترکیبات فنلی در گلرنگ کمک کند. این ترکیبات نه‌تنها نقش مهمی در دفاع گیاه در برابر تنش‌های محیطی دارند، بلکه می‌توانند به بهبود وضعیت فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه نیز کمک کنند.



شکل ۱- اثر متقابل تنش خشکی × بیوچار بر میزان فنل کل

Figure 1- The interaction effect of drought stress × biochar on total phenole content

درصد روغن

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل سه‌گانه تنش خشکی × بیوچار × زئولیت در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری بر درصد روغن دانه گلرنگ داشت (جدول ۴). بر اساس مقایسه میانگین‌ها، بیشترین درصد روغن (۳۲/۷۹درصد) در تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با کاربرد ۵ درصد بیوچار و زئولیت اندازه‌گیری شد. اگرچه این مقدار با کاهش سطح آبیاری تفاوت معنی‌داری نداشت،

به‌طوری‌که در تیمار آبیاری پس از ۷۵ درصد ظرفیت زراعی همراه با ۵ درصد بیوچار و زئولیت، میزان ۳۱/۸ درصد روغن از دانه گلرنگ استحصال گردید. در مقابل، کمترین درصد روغن (۱۰/۹ درصد) در تیمار آبیاری پس از ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم کاربرد بیوچار و زئولیت مشاهده شد (جدول ۶). نتایج مشابهی در تحقیق دیگری نشان داد که کاربرد ۱۰ تن بیوچار در هکتار همراه با کودهای شیمیایی و آبیاری متداول، تأثیر مثبتی بر درصد روغن دانه داشت (Abbaspour *et al.*, 2017). این محققان بیان کردند که تنش خشکی نه‌تنها باعث کاهش تولید و انتقال مواد فتوسنتزی می‌شود، بلکه با کاهش دوره پر شدن دانه، بر تجمع بسیاری از مواد از جمله روغن نیز تأثیر منفی می‌گذارد. بخشی از کاهش درصد روغن در شرایط تنش رطوبتی را می‌توان به کاهش طول دوره پر شدن دانه نسبت داد. در شرایط بدون تنش، زمان بیشتری برای پر شدن دانه وجود دارد و در نتیجه درصد روغن نیز افزایش می‌یابد. از آنجایی که ابتدا کربوهیدرات‌ها در دانه تجمع می‌یابند و سپس به روغن، پروتئین یا سایر مواد تبدیل می‌شوند، هرچه طول دوره پر شدن دانه بیشتر باشد، درصد روغن و عملکرد آن نیز بیشتر خواهد بود.

نتایج تحقیقات نشان داده است که آبیاری متداول باعث افزایش درصد روغن در مقایسه با شرایط تنش خشکی می‌شود (Salamati and Danaie, 2020). همچنین، در مطالعه‌ای روی ژنوتیپ‌های کنجد، مشخص شد که با افزایش شدت تنش خشکی، درصد روغن دانه به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. بیشترین درصد روغن در تیمار شاهد (عدم تنش خشکی) و کمترین آن در تیمار تنش خشکی شدید مشاهده شد (Najafi and Safari, 2011).

با توجه به نتایج این تحقیق و مطالعات پیشین، می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد بیوچار و زئولیت در شرایط تنش خشکی می‌تواند به افزایش درصد روغن دانه گلرنگ کمک کند. این کودها با بهبود شرایط رشد و افزایش طول دوره پر شدن دانه، تأثیرات منفی تنش خشکی را کاهش داده و درصد روغن را افزایش می‌دهند.

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس نتایج این پژوهش، افزایش شدت تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار ویژگی‌های مورفولوژیکی، عملکرد دانه، درصد روغن، شاخص کلروفیل برگ و محتوای نسبی آب برگ در گلرنگ شد. با این حال، کاربرد بیوچار و زئولیت به‌طور قابل توجهی این ویژگی‌ها را در مقایسه با شرایط عدم مصرف این اصلاح‌کننده‌ها بهبود بخشید. استفاده از این اصلاح‌کننده‌های خاک تا حدی از بروز اثرات منفی تنش خشکی بر گلرنگ جلوگیری کرد و مانع از کاهش شدید این شاخص‌ها شد.

استفاده از نهاده‌هایی که جنبه‌های اکولوژیکی سیستم کشاورزی را بهبود بخشیده و خطرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهند، می‌تواند به پیشبرد اهداف کشاورزی پایدار کمک کند. بیوچار و زئولیت به‌عنوان مواد طبیعی و سازگار با محیط زیست، نه‌تنها باعث بهبود عملکرد گیاهان در شرایط تنش خشکی می‌شوند، بلکه می‌توانند به حفظ سلامت خاک و کاهش مصرف منابع آبی نیز کمک کنند.

با توجه به نتایج این تحقیق، می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد بیوچار و زئولیت در شرایط تشدید تنش خشکی، راهکاری مناسب برای کاهش اثرات منفی این تنش و افزایش تولید گلرنگ است. این رویکرد نه‌تنها به بهبود عملکرد کشاورزی کمک می‌کند، بلکه گامی مهم در جهت دستیابی به کشاورزی پایدار و حفظ منابع طبیعی محسوب می‌شود.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله حمایت مالی که از محل اعتبارات معاونت پژوهشی دانشگاه زابل به شماره GR9360 تأمین شده، سپاسگزاری می گردد. همچنین از پژوهشکده کشاورزی دانشگاه زابل که بستر اجرای این آزمایش را در مزرعه تحقیقاتی خود مهیا کردند، قدردانی می‌شود.

References

Abasiyeh, S.K., Rad, A.H.S., Delkhoush, B., Mohammadi, G. N., and Nasrollahi, H., 2013. Effect of potassium and zeolite on seed, oil, and biological yield in safflower. *Annals of Biological Research, 4*(5), pp.204–207.

Abbaspour, F., Asghari, H.R., Rezvani Moghaddam, P., Abbasdokht, H., Shabahang, J. and Baig Babaei, A., 2017. Effects of biochar application on yield and yield components of black seed (*Nigella sativa* L.) under low irrigation conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants, 33*(5), pp.825–837. [In Persian]. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2017.114596.2075

Abdelaal, K.A., Mazrou, Y.S. and Hafez, Y.M., 2020. Silicon foliar application mitigates salt stress in sweet pepper plants by enhancing water status, photosynthesis, antioxidant enzyme activity and fruit yield. *Plants, 9*(6), pp.733. https://doi.org/10.3390/plants9060733

Abedi Baba-Arabi, S., Movahhedi Dhnavi, M., Yadavi, A.R. and Adhami, A., 2010. Effect of Zn and K foliar application on physiological traits and yield of spring safflower under drought stress. *Electronic Journal of Crop Production, 4(*1), pp.75–95. [In Persian]. https://doi.org/20.1001.1.2008739.1390.4.1.6.8

Abhishek, A., Boyton, R.J., Peckham, N., McKnight, Á., Coates, L.C., Bluett, J., Barber, V., Cureton, L., Francis, A., Appelbe, D. and Eldridge, L., 2022. Effect of a 2-week interruption in methotrexate treatment versus continued treatment on COVID-19 booster vaccine immunity in adults with inflammatory condition (VROOM study): A randomised, open label, superiority trial. *The Lancet Respiratory Medicine, 10*(9), pp.840–850. https://doi.org/10.1016/S2213-2600(22)00186-2

Agbna, G.H.D., Dongli, S., Zhipeng, L., Elshaikh, N.A., Guangcheng, S. and Timm, L.C., 2017. Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato. *Scientia Horticulturae, 222*, pp.3–10. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.05.004

Ahmad, I., Khan, M.A., Qasim, M., Ahmad, R. and Saleem, M., 2013. Substrate salinity affects growth, yield, and quality of *Rosa hybrida* L. *Pakistan Journal of Science, 65*(2), pp.191–196. https://doi.org/10.57041/vol65iss2pp%25p

Ahmadi Azar, F., Hasanloo, T., Imani, A. and Feiziasl, V., 2015. Water stress and mineral zeolite application on growth and some physiological characteristics of mallow (*Malva sylvestris*). *Journal of Plant Research, 28*, pp.459–474. [In Persian]. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23832592.1394.28.3.1.0

Ahmadi, M. and Bahrani, M.J., 2009. Effect of nitrogen fertilizer on yield and yield components of three sesame cultivars in Bushehr province. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, 48*(2), pp.123–131. [In Persian]. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24763594.1388.13.48.34.4

Ali, S., Rizwan, M., Qayyum, M.F., Ok, Y.S., Ibrahim, M., Riaz, M. and Shahzad, A.N., 2017. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: A critical review. *Environmental Science and Pollution Research, 24*(14), pp.12700–12712. https://doi.org/10.1007/s11356-017-8904-x

Arnon, A.N., 1967. Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal, 23*, pp.112–121.

Ashraf, M., 2010. Inducing drought tolerance in plants: Recent advances. *Biotechnology Advances, 28*, pp.169–183. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.11.005

Bamminger, C., Poll, C., Sixt, C., Hogy, P., Wüst, D., Kandeler, E. and Marhan, S., 2016. Short-term response of soil microorganisms to biochar addition in a temperate agroecosystem under soil warming. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 233*, pp.308–317. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.016

Batool, A., Taj, S., Rashid, A., Khalid, A., Qadeer, S., Saleem, A.R. and Ghufran, M.A., 2015. Potential of soil amendments (biochar and gypsum) in increasing water use efficiency of *Abelmoschus esculentus* L. Moench. *Frontiers in Plant Science*, *6*, pp.1–13. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00733

Beyyavas, V., Haliloglu, H., Copur, O. and Yilmaz, A., 2011. Determination of seed yield and yield components of some safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars, lines and populations under the semi-arid conditions. *African Journal of Biotechnology*, *10*, pp.527–534.

Durukan, H., Demirbas, A. and Turkekul, I., 2020. Effects of biochar rates on yield and nutrient uptake of sugar beet plants grown under drought stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *23*, pp.1–11. https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1849257

Fanaei, H. and Narouirad, M.R., 2014. Study of yield, yield components and tolerance to drought stress in safflower genotypes. *Electronic Journal of Crop Production*, *7*(3), pp.33–51. [In Persian]. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2008739.1393.7.3.3.0

Ghasemi Masarmi, A., Solouki, M., Golkari, S., Mahdinezhad, N., Kalaji, H.R., Fakhri, B. and Jabbari, M., 2022. Comparison of photosystem II yield in Iranian native wheat genotypes using chlorophyll fluorescence parameters under salinity stress. *Plant Production and Genetics*, *3*(1), pp.67–84. [In Persian]. https://doi.org/10.34785/J020.2022.154

Ghassemi Sahebi, F., Mohammadrezapour, O., Delbari, M., Khashei Siuki, A., Ritzema, H. and Cherati, A. 2020. Effect of utilization of treated wastewater and seawater with Clinoptilolite-zeolite on yield and yield components of sorghum. *Agricultural Water Management*, *234*, pp.106117–106120. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106117

Gholamhoseini, M., Ghalavand, A., Dolatabadian, A., Jamshidi, E. and Khodaei-Joghan, A., 2013. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on growth, yield, nutrient uptake and irrigation water productivity of sunflowers grown under drought stress. *Agricultural Water Management*, *117*, pp.106–114. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.007

Gomes-Sanchez, D., Vannozzi, G. P., Baldini, M., Tahamasebi Enferadi, S. and Dell Vedove, G., 2000. Effect of soil water availability in sunflower lines derived from interspecific crosses. *Italian Journal of Agronomy*, *1*, pp.371–387.

Guo, J., Ling, H., Wu, Q., Xu, L. and Que, Y., 2014. The choice of reference genes for assessing gene expression in sugarcane under salinity and drought stresses. *International Journal of Scientific Reports*, *4*. https://doi.org/10.1038/srep07042

Guo, Y.Y., Yu, H.Y., Kong, D.S., Yan, F. and Zhang, Y.J., 2016. Effects of drought stress on growth and chlorophyll fluorescence of *Lycium ruthenicum* Murr. Seedlings. *Photosynthetica*, *54*(4), pp.524–531. https://doi.org/10.1007/s11099-016-0206-x

Haider, G., Koyro, H.W., Azam, F., Steffe, D., Müller, C. and Kammann, C., 2015. Biochar but not humic acid product amendment affected maize yields via improving plant-soil moisture relations. *Plant and Soil*, *395*, pp.141–157. https://doi.org/10.1007/s11104-014-2294-3

Hall, L.H., Johnson, J., Watt, I., Tsipa, A. and O'Connor, D.B., 2016. Healthcare staff wellbeing, burnout, and patient safety: A systematic review. *PLoS One*, *11*(7), e0159015. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159015

Hussain, S., Khan, F., Cao, W., Wu, L. and Geng, M., 2016. Seed priming alters the production and detoxification of reactive oxygen intermediates in rice seedlings grown under sub-optimal temperature and nutrient supply. *Frontiers in Plant Science*, *7*, pp.439. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00439

Jain, S., Yue-Lioang, R., Mei-wang, L.E., Ting-Xian, Y., Xiao-Wen, Y. and Hong-Ving, Z., 2010. Effect of drought stress on sesame growth and yield characteristics and comprehensive evaluation of drought tolerance. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, *4*, pp.42–48.

Joshan, Y., Sani, B., Jabbari, H., Mozafari, H. and Moaveni, P., 2020. The effect of late season drought stress on some morphophysiological characteristics of Iranian safflower varieties in Karaj region. *Environmental Stresses in Crop Science*, *13*(4), pp.1093–1104. [In Persian]. https://doi.org/10.22077/escs.2020.3193.1815

Joshi, N.L., Mali, P.C. and Sexena, A., 1998. Effect of nitrogen and sulphur application on yield and fatty acid composition of mustard (*Brassica juncea* L.) oil. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *180*, pp.59–63. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1998.tb00370.x

Kar, G., Kumar, A. and Martha, M., 2007. Water use efficiency and crop coefficients of dry season oilseed crops. *Agricultural Water Management*, *87*, pp.73–82. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.06.002

Kaykhazhaleh, M., Ramroudi, M., Galavi, M., Ghanbari, A. and Fanaei, H.R., 2022. Effect of drought stress on some morphophysiological traits and yield of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in response to potassium use. *Journal of Crops Improvement*, *24*(4), pp.1133–1145. [In Persian]. https://doi.org/10.22059/jci.2022.330328.2610

Khajehpour, M.R., 2006. *Production of Industrial plants*. Isfahan University Jihad Publications, 250 pp. [In Persian].

Khavari, M., Ramroudi, M., Ghanbri, A. and Dahmardeh, M., 2021. Effect of the yield and content of photosynthetic pigments of *Plantago ovata* in response to phosphorus fertilizers and planting method under drought stress. *Journal of Horticultural Nutrition Plants*, *4*(1), pp.113–128. [In Persian]. https://doi.org/10.22070/hpn.2021.14080.1128

Khoshnam, A. and Mamnoie, E., 2021. Effect of water stress and plant density on yield and yield components of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in south Kerman. *Environmental Stresses in Crop Science*, *14*(1), pp.39–46. [In Persian]. https://doi.org/10.22077/escs.2020.2526.1665

Kumar, A.R. and Kumar, M., 2008. Studies on the efficacy of sulphate of potash on physiological, yield and quality parameters of Banana cv. Robusta (Cavendish-AAA). *EurAsian Journal of BioSciences*, 2, pp.102–109.

Mahesh, M., Thomas, J., Kumar, K.A., Bhople, B.S., Saresh, N.V., Vaid, S.K. and Sahu, S.K., 2018. Zeolite farming: A sustainable agricultural prospective. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *7*(5), pp.2912–2924.

Mansourifar, S., Shaban, M., Ghobadi, M. and Sabaghpoor, S.H., 2012. Study of grain filling in chickpea cultivars under drought stress and N fertilizer. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *10*(3), pp.591–602. [In Persian].

Mehrab, N., Chirom, M. and Hojat, S., 2016. Effect of raw and NH4+-enriched zeolite on nitrogen uptake by wheat and nitrogen leaching in soils with different textures. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 47*, pp.1306–1316. https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1166377

Mohammadi, M., Ghassemi-Golezani, K., Zehtab-Salmasi, S. and Nasrollahzade, S., 2016. Assessment of some physiological traits in spring safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars under water stress. *International Journal of Life Sciences, 10*(1), pp.58–64. https://doi.org/10.3126/ijls.v10i1.14512

Mohtashami, F. and Tadayon, M.R., 2020. The response on yield and fatty acids composition in late planting of safflower genotypes ascorbic acid and jasmonic acid application under deficit irrigation regimes. *Environmental Stresses in Crop Science, 13*(2), pp.455–469. [In Persian]. https://doi.org/10.22077/escs.2019.2019.1499

Mondal, M., Biswas, B., Garai, S., Sarkar, S., Banerjee, H., Brahmachari, K., Bandyopadhyay, P. K., Maitra, S., Brestic, M., Skalicky, M. and Ondrisik, P., 2021. Zeolites enhance soil health, crop productivity and environmental safety. *Agronomy, 11*(3), pp.448. https://doi.org/10.3390/agronomy11030448

Motghi, S., Mottaghi, M., Shiranirad, A. and Lotfifar, O., 2020. Study the efficiency of zeolite in reducing the effect of drought stress on agronomical traits and seed yield of rapeseed in Karaj region. *Plant Ecophysiology, 11*, pp.256–271. [In Persian]. https://www.magiran.com/p1982431

Munne-Bosch, S., Nogues, S. and Alegre, L., 1999. Diurnal variations of photosynthesis and dew absorption by leaves in two shrubs growing in Mediterranean field conditions. *New Phytologist, 144*, pp.109–119. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00490.x

Murtaza, G., Ahmed, Z., Eldin, S.M., Ali, B., Bawazeer, S., Usman, M., Iqbal, R., Neupane, D., Ullah, A., Khan, A. and Hassan, M.U., 2023. Biochar-soil-plant interaction: A cross talk for sustainable agriculture under changing climate. *Frontiers in Environmental Science, 11*, pp.1059449. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1059449

Nabipour, M., Meskarabashee, M. and Yousefpour, H., 2007. The effect of water deficit on yield and yield components of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Pakistan Journal of Biological Sciences, 10*(3), pp.421–426. https://doi.org/10.3923/pjbs.2007.421.426

Najafi, H. and Safari, M., 2011. Study of drought stress on yield, yield component and oil of sesame cultivars. *11th National Seminar of Irrigation and Evaporation Reduction*, pp.35–36. [In Persian].

Nazar, M., Wang, S., Zhao, J., Dong, Z., Li, J., Ali Kaka, N. and Shao, T., 2020. The feasibility and effects of exogenous epiphytic microbiota on the fermentation quality and microbial community dynamics of whole crop corn. *Bioresource Technology, 306*, pp.123106. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123106

Nozari, R., Tohidi Moghadam, H.R. and Zahedi, H., 2013. Effect of cattle manure and zeolite applications on physiological and biochemical changes in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] grown under water deficit stress. *Revista Cientifica UDO Agrícola, 13*(1), pp.76–84.

Olmo, M., Alburquerque, J. A., Barrón, V., Del Campillo, M.C., Gallardo, A., Fuentes, M. and Villar, R., 2014. Wheat growth and yield responses to biochar addition under Mediterranean climate condition. *Biology and Fertility of Soils, 50*, pp.1177–1187. https://doi.org/10.1007/s00374-014-0959-y

Paneque, M., José, M., Franco-Navarro, J.D., Colmenero-Flores, J.M. and Knicker, H., 2016. Effect of biochar amendment on morphology, productivity and water relation of sunflower plants under non-irrigation condition. *Catena, 147*, pp.3–10. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.037

Rezvani Moghaddam, P., Norozpoor, Gh., Nabati, J. and Mohammad Abadi, A.A., 2005. Effects of different irrigation intervals and plant density on morphological characteristics, grain and oil yields of sesame (*Sesamum indicum*). *Iranian Journal of Field Crops Research, 3*(1), pp.57–68. [In Persian]. https://doi.org/10.22067/jag.v2i2.7631

Salamati, N. and Danaie, A. Kh., 2020. Evaluation of drought stress indices in surface deficit irrigation of new sesame cultivars. *Journal of Water and Soil Conservation, 27*(2), pp.69–87. [In Persian]. https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.17252.3270

Sargazi, S., Sirousmehr, A.R., Ghanbari, A. and Mousavi Nik, M., 2023. Evaluation of morphological and biochemical traits of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under drought stress conditions and foliar application of organic fertilizer. *Journal of Plant Process and Function, 54*, pp.105–122. [In Persian]. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222727.1402.12.54.7.7

Shahbaz, A.K., Lewińska, K., Iqbal, J., Ali, Q., Mahmood-ur-Rahman, Iqbal, M. and Ramzani, P.M.A., 2018. Improvement in productivity, nutritional quality, and antioxidative defense mechanisms of sunflower (*Helianthus annuus* L.) and maize (*Zea mays* L.) in nickel contaminated soil amended with different biochar and zeolite ratios. *Journal of Environmental Management, 218*, pp.256–270. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.046

Shahsavari, N., 2019. Effects of zeolite and zinc on quality of canola (*Brassica napus* L.) under late season drought stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 50*(9), pp.1117–1122. https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1604729

Sibi, M., Mirzakhani, M. and Gomarian, M., 2012. Study of cell membranes instability of safflower under water stress, application of zeolite and salicylic acid. *Iranian Journal of Agronomy and Plant Breeding, 8*(2), pp.119–136. [In Persian].

Singh, S., Angadi, S.V., Grover, K., Begna, S. and Auld, D., 2016. Drought response and yield formation of spring safflower under different water regimes in the semiarid Southern High Plains. *Agricultural Water Management, 163*, pp.354–362. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.010

Singh, S.V., Vishakantaiah, J., Meka, J.K., Muruganantham, M., Thiruvenkatam, V., Sivaprahasam, V., Rajasekhar, B.N., Bhardwaj, A., Mason, N.J. and Sivaraman, B., 2022. Three-dimensional complex architectures observed in shock processed amino acid mixtures. *Experimental Results, 3*, pp.1–13. https://doi.org/10.1017/exp.2021.17

Taghizadeh Tabari, Z., Asghari, H.R., Abbasdokht, H. and Babakhanzadeh Sajirani, E., 2020. Effects of biochar and salicylic acid on physiological and morphological characteristics of European borage (*Borago officinalis* L.) under water deficit conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants, 36*(1), pp.98–111. [In Persian]. https://doi.org/10.22069/jopp.2021.17250.2599

Tayyab, N., Naz, R., Yasmin, H., Nosheen, A., Keyani, R., Sajjad, M., Hassan, M.N. and Roberts, T. H., 2020. Combined seed and foliar pre-treatments with exogenous methyl jasmonate and salicylic acid mitigate drought-induced stress in maize. *PLoS One, 15*(5), pp.e0232269. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232269

Toupchi Khosrowshahi, Z., Ghassemi-Golezani, K., Salehi-Lisar, S.Y. and Motafakkerazad, R., 2020. Changes in antioxidants and leaf pigments of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) affected by exogenous spermine under water deficit. *Biologia Futura, 71*, pp.313–321. https://doi.org/10.1007/s42977-020-00039-z

Weiss, E.A., 2000. *Oilseed Crops* (2nd ed.). Blackwell Science Ltd.

Yildirim, E., Ekinci, M. and Turan, M., 2021. Impact of biochar in mitigating the negative effect of drought stress on cabbage seedlings. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 21*, pp.2297–2309. https://doi.org/10.1007/s42729-021-00522-z

Younis, U., Danish, S., Ameer, A., Qureshi, T.I., Manzoor, H., Shakeel, A. and Ehsanullah, M., 2015. Influence of biochar on growth and photosynthetic attributes of *Triticum aestivum* L. under half and full irrigation. *International Journal of Biosciences, 5*(7), pp.101–108. https://doi.org/10.12692/ijb/5.7.101-108

Zhang, D., Ding, Y., Chen, P., Zhang, X., Pan, Z. and Liang, D., 2020. Automatic extraction of wheat lodging area based on transfer learning method and DeepLabv3+ network. *Computers and Electronics in Agriculture, 179*, pp.105845. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105845