

Effects of biochar and magnesium oxide nanoparticles on oil quality and biochemical characteristics of safflower under salinity stress conditions**Mohammad Haghaninia¹, Ali Najafifar¹, Freidoon Soleimani¹, Amir Mirzaei¹, Abdollah Javanmard^{*2}**

1. Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Ilam Province, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Ilam, Iran

2. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Iran

*Corresponding Author Email: a.javanmard@maragheh.ac.ir

Abstract

Introduction: Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) is a key oilseed crop widely grown in semi-arid regions, where soil salinity is a major obstacle to productivity and oil quality. Recently, the use of soil amendments such as biochar and metal-based nanoparticles has gained popularity as an innovative approach to reducing environmental stresses in sustainable agriculture. Thus, this study aimed to assess both the individual and combined impacts of biochar and MgO-NPs on growth performance, antioxidant defense systems, seed yield, and fatty acid composition of safflower across salinity levels.

Materials and Methods: This study was conducted as a factorial trial using a completely randomized design (CRD) with three replications at the research greenhouse of the Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Iran in 2022. The first factor included salinity stress at three levels (0, 50, and 100 mM NaCl), while the second factor involved four growth-promoting treatments: control (no amendment), biochar, magnesium oxide nanoparticles (100 mg/L), and the combined application of biochar plus MgO-NPs.

Results: Salinity stress notably decreased plant height, seed yield, oil percentage, and oil yield, with the largest reductions seen at 100 mM NaCl. Simultaneously, significant increases in MDA and H₂O₂ were observed under saline conditions, indicating heightened ROS accumulation and membrane lipid peroxidation, which reflect structural damage to cellular membranes and metabolic issues. In contrast, applying biochar and MgO-NPs, especially together, significantly alleviated salinity-related damage. Under moderate salinity (50 mM NaCl), the combined treatment increased total phenolic and flavonoid contents by 109.7% and 123.9%, respectively, compared to the untreated control, suggesting activation of the non-enzymatic antioxidant defense system. Similarly, activities of superoxide dismutase, guaiacol peroxidase, and peroxidase increased by 130.4%, 116.3%, and 648%, respectively, demonstrating strong activation of enzymatic ROS-scavenging processes. The notable decrease in MDA and H₂O₂ levels with the combined treatment further confirmed its effectiveness in reducing oxidative damage and maintaining membrane stability. The excellent performance of the combined approach likely resulted from complementary mechanisms. Biochar enhanced soil structure, improved nutrient retention, and lowered Na⁺ bioavailability in the rhizosphere, while MgO-NPs supplied bioavailable magnesium crucial for chlorophyll stability, ATP-driven metabolic functions, and activation of antioxidant enzymes. From an agricultural perspective, the highest seed and oil yields were observed under non-saline conditions with the combined amendment, showing increases of 101.3% and 196.5%, respectively, compared to severe salinity without growth-promoting treatments. Additionally, linoleic and linolenic acid contents rose by 74.2% and 93.5%, respectively, under the combined treatment, indicating the preservation of unsaturated fatty acid synthesis pathways despite improved nutritional and oxidative conditions. Since salinity often decreases the proportion of unsaturated fatty acids and harms oil quality, these results emphasize the protective effect of the combined amendment in maintaining lipid metabolism.

Conclusion: The combined use of biochar and magnesium oxide nanoparticles effectively reduced the harmful effects of salinity stress on safflower growth, yield, and oil quality. In addition to enhancing agronomic traits, this integrated treatment improved oil quality by increasing the amount of unsaturated fatty acids. Therefore, the co-application of biochar and magnesium oxide nanoparticles can be considered a valuable management strategy for sustainable safflower production in saline soils and may foster the development of organic soil amendments and nano-fertilizer technologies aimed at boosting plant tolerance to salinity stress.

Keywords: Abiotic stresses, Flavonoids, Fatty acids, Nanoparticles, Sustainable agriculture

Received: 26-10-2024

Accepted: 27-12-2024

Citation: Haghaninia, M., Najafifar, A., Soleimani, F., Mirzaei, A., & Javanmard i, A. (2026). Effects of biochar and magnesium oxide nanoparticles on oil quality and biochemical characteristics of safflower under salinity stress conditions. *Plant Production and Genetics*, 7(1), 45-62. <https://doi.org/10.22034/PLANT.2024.142398.1132>

Copyrights:

Copyrights rights for this article is retained by the author (s), with publication rights granted to Plant Production and Genetics. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



تولید و ژنتیک گیاهی

<https://doi.org/10.22034/plant.2024.142398.1132>

اثر بیوجار و نانوذرات اکسید منیزیم بر کیفیت روغن و ویژگی‌های بیوشیمیایی گلرنگ

در شرایط تنش شوری

محمد حقانی نیا^۱، علی نجفی فر^۱، فریدون سلیمانی^۱، امیر میرزائی^۱، عبدالله جوانمرد^{۲*}

۱. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران

۲. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: a.javanmard@maragheh.ac.ir

چکیده

مقدمه: گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) یکی از منابع مهم روغن گیاهی است که تحت تنش شوری، کاهش معنی‌دار در عملکرد دانه و تغییر ترکیب اسیدهای چرب روغن را تجربه می‌کند. در سال‌های اخیر، استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک مانند بیوجار و کاربرد نانوذرات فلزی به‌عنوان راهبردهای نوین مدیریتی برای کاهش اثرات تنش‌های محیطی مورد توجه قرار گرفته است. لذا مطالعه حاضر با هدف ارزیابی اثرات انفرادی و ترکیبی بیوجار و نانوذرات اکسید منیزیم بر رشد، سیستم‌های دفاع آنتی‌اکسیدانی، تولید دانه و ترکیب اسیدهای چرب گلرنگ تحت سطوح مختلف شوری انجام شد.

مواد و روش‌ها: این مطالعه به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی (CRD) با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه در سال ۱۴۰۱ اجرا شد. فاکتور اول تنش شوری با سه سطح صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم و فاکتور دوم شامل چهار تیمار محرک رشد (شاهد، بیوجار، ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو اکسید منیزیم و ترکیب بیوجار + نانوذرات اکسید منیزیم) بود.

نتایج: نتایج نشان داد که افزایش شوری موجب کاهش معنی‌دار ارتفاع گیاه، عملکرد دانه، درصد و عملکرد روغن گلرنگ شد، به‌طوری‌که بیشترین کاهش در سطح ۱۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم مشاهده گردید. همزمان، افزایش معنی‌دار مالون‌دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن نشان‌دهنده تشدید تنش اکسیداتیو و پراکسیداسیون لیپیدی در شرایط شوری بود که بیانگر آسیب به غشاهای سلولی و اختلال در پایداری ساختارهای زیستی است. با این حال، کاربرد بیوجار و نانوذرات اکسید منیزیم، به‌ویژه به‌صورت ترکیبی، توانست این اثرات منفی را به‌طور قابل توجهی تعدیل کند. در شرایط شوری ملایم (۵۰ میلی‌مولار)، تیمار ترکیبی موجب افزایش محتوای فنل (۱۰۹/۷ درصد) و فلاونوئید (۱۲۳/۹ درصد) نسبت به شاهد شد که نشان‌دهنده تقویت سیستم دفاع غیرآنزیمی گیاه است. همچنین، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شامل سوپراکسید دیسموتاز (۱۳۰/۴ درصد)، گایاکول پراکسیداز (۱۶/۳ درصد) و پراکسیداز (۶۴۸ درصد) بیانگر فعال‌سازی مؤثر سیستم دفاع آنزیمی در مقابله با گونه‌های فعال اکسیژن بود. علاوه بر این، کاهش معنی‌دار H_2O_2 و MDA در تیمار ترکیبی نسبت به شاهد، نشان داد که هم‌افزایی بیوجار و نانوذرات اکسید منیزیم توانسته است از پراکسیداسیون لیپیدی جلوگیری کرده و یکپارچگی غشاها را حفظ کند. از نظر عملکردی، بیشترین تولید دانه و روغن در شرایط بدون تنش و با تیمار ترکیبی مشاهده شد که نسبت به تنش شدید بدون محرک‌های رشد به‌ترتیب ۱۰۱/۳ و ۱۹۶/۵ درصد افزایش نشان داد. بهبود ترکیب اسیدهای چرب، به‌ویژه افزایش لینولئیک (۷۴/۲ درصد) و لینولنیک اسید (۹۳/۵ درصد)، بیانگر حفظ مسیرهای بیوسنتزی اسیدهای چرب غیراشباع در شرایط بهبود یافته تغذیه‌ای و کاهش تنش اکسیداتیو است. از آنجا که شوری معمولاً موجب کاهش اسیدهای چرب غیراشباع و کاهش کیفیت روغن می‌شود، بهبود این شاخص‌ها در تیمار ترکیبی حاکی از اثر حفاظتی این رویکرد بر متابولیسم لیپیدی است.

نتیجه‌گیری: استفاده هم‌زمان از بیوجار و نانوذرات اکسید منیزیم توانست اثرات منفی تنش شوری بر رشد، عملکرد و کیفیت روغن گلرنگ را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد. این تیمار علاوه بر ارتقای صفات عملکردی، کیفیت روغن را از طریق افزایش اسیدهای چرب غیراشباع بهبود داد. بنابراین، ترکیب بیوجار و نانوذرات اکسید منیزیم می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مدیریتی مؤثر برای تولید پایدار گلرنگ در اراضی شور مورد استفاده قرار گیرد و توسعه فناوری‌های نوین مبتنی بر اصلاح‌کننده‌های آلی و نانوکودها را برای افزایش تحمل گیاه به تنش شوری ممکن سازد.

کلید واژگان: اسیدهای چرب، تنش‌های غیر زیستی، فلاونوئید، کشاورزی پایدار، نانوذرات

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵

منبع: حقانی نیا، ح.، خادمیان، ر.، نعمت زاده، ق.، بابائیان جلودار، ن. و باقری، ن. (۱۴۰۵). اثر بیوجار و نانوذرات اکسید منیزیم بر کیفیت روغن و ویژگی‌های بیوشیمیایی گلرنگ در شرایط تنش شوری، *مجله تولید و ژنتیک گیاهی*، ۷ (۱)، ۶۲-۴۵. <https://doi.org/10.22034/PLANT.2024.142398.1132>



مقدمه

تغییرات اقلیمی مانند خشکی، شوری و دما تهدیدی برای تولید غذا هستند و بهره‌وری گیاهان زراعی را محدود می‌کنند (Haghaninia *et al.*, 2024a). شوری یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که به‌طور منفی بر بهره‌وری محصولات کشاورزی تأثیر می‌گذارد و باعث آسیب به جوانه‌زنی، رشد و عملکرد گیاه زراعی می‌شود (Gogna *et al.*, 2020). در سراسر جهان، شوری بیش از ۲۰ درصد از اراضی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰، بیش از ۵۰ درصد از اراضی کشاورزی به دلیل شوری آسیب ببینند (Mukhopadhyay *et al.*, 2021; Helaoui *et al.*, 2023). دلایل متعددی برای افزایش شوری وجود دارد که شامل بارش کم، تبخیر سطحی زیاد، فرسایش سنگ‌های بومی و شیوه‌های کشت نامناسب می‌باشد (Helaoui *et al.*, 2023).

گیاهانی که تحت تأثیر شوری قرار می‌گیرند، ترکیبی از تنش‌های اسمزی و یونی را تجربه می‌کنند که منجر به آسیب‌های مختلف در سطوح فیزیولوژیکی، سلولی و مولکولی می‌شود (Faizan *et al.*, 2021) و در نتیجه موجب کاهش جذب مواد مغذی و افت عملکرد می‌گردد (Mahmoud *et al.*, 2022). علاوه بر این، شوری سبب تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود که به بیومولکول‌ها (چربی‌ها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک) و فعالیت‌های آنزیمی دیگر آسیب می‌زند و حتی می‌تواند به تخریب سیستم غشای سلولی منجر شود (Hasanuzzaman *et al.*, 2021). در این شرایط، اگرچه گیاهان به تولید ترکیبات آنتی‌اکسیدانی بیشتر به‌عنوان یک مکانیزم دفاعی در برابر تنش پاسخ می‌دهند، اما این مکانیسم‌ها ممکن است به دلیل شدت تنش تحت تأثیر قرار گرفته و کارایی لازم را برای محافظت از گیاه در تنش‌های شدید و طولانی نداشته باشند (Haghaninia *et al.*, 2024b; Sotoodehnia-Korani *et al.*, 2023). تحقیقات نشان می‌دهد در گیاهان روغنی تنش شوری موجب می‌شود تا نسبت اسیدهای چرب غیراشباع به اشباع تغییر کرده و کیفیت تغذیه‌ای و صنعتی روغن کاهش پیدا کند (Farhangi & Ghassemi-Golezani, 2019; Shaki *et al.*, 2018). همچنین، کاهش فعالیت آنزیم‌های مرتبط با سنتز اسیدهای چرب و متابولیسم کربوهیدرات‌ها نیز از دیگر پیامدهای منفی تنش شوری است که مستقیماً بر کیفیت و کمیت روغن تأثیر

می‌گذارد (Amirfakhrian *et al.*, 2019; Khademian *et al.*, 2024). این تغییرات نه تنها رشد و توسعه گیاه را مختل می‌کنند، بلکه بر عملکرد دانه‌ها و کمیت و کیفیت روغن نیز اثرات منفی می‌گذارند (Farhangi-Abri & Ghassemi-Golezani, 2021; Mohamed *et al.*, 2020). یکی دیگر از مشکلات عمده بخش کشاورزی در ایران، کمبود تولید داخلی روغن‌های خوراکی است. کشور ایران به دلیل وابستگی به واردات روغن، با چالش‌های اقتصادی و تأمین پایدار این محصول استراتژیک مواجه است (Haghaninia *et al.*, 2024a). گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) به‌عنوان یکی از گیاهان روغنی مهم، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، می‌تواند نقش قابل توجهی در تأمین روغن‌های خوراکی و کاهش وابستگی به واردات داشته باشد (Najafi-Ghiri *et al.*, 2022; Akbari *et al.*, 2020). این گیاه به دلیل تحمل نسبی به خشکی و توانایی رشد در شرایط نامطلوب محیطی (Yasmin *et al.*, 2021)، یکی از گزینه‌های مناسب برای افزایش تولید داخلی روغن است (Ghaedi *et al.*, 2024). با این حال، برای بهبود عملکرد و کیفیت روغن گلرنگ در شرایط تنش، نیاز به رویکردهای نوآورانه و مدیریتی وجود دارد (Farhangi-Abri & Ghassemi-Golezani, 2021; Ahmad *et al.*, 2023).

استفاده گسترده از کودهای شیمیایی به‌منظور افزایش عملکرد گیاهان و تأمین مواد مغذی ضروری، به‌ویژه در شرایط تنش‌های محیطی، در دهه‌های اخیر با چالش‌های متعددی همراه بوده است (Faizan *et al.*, 2021). این کودها علاوه بر افزایش هزینه‌های تولید و کاهش کیفیت خاک، اثرات زیان‌باری بر محیط زیست از جمله آلودگی آب‌های زیرزمینی، فرسایش خاک و انباشت مواد شیمیایی مضر دارند (Liu *et al.*, 2022; Haghaninia *et al.*, 2024a). علاوه بر این، مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی می‌تواند باعث کاهش حاصل‌خیزی خاک، ایجاد مقاومت در گیاهان و کاهش کارایی جذب مواد مغذی شود (Mustafa *et al.*, 2024). به دلیل این چالش‌ها، رویکردهای نوین در تغذیه گیاهان به‌عنوان جایگزین‌های پایدارتر برای کودهای شیمیایی مورد توجه قرار گرفته‌اند (Anand *et al.*, 2020; Haghaninia *et al.*, 2024c).

نانوتکنولوژی به‌عنوان یک راهبرد جذاب برای کشاورزی پایدار از مزایای متعددی برای اکوسیستم‌های کشاورزی از

می‌تواند رشد گیاه، کارایی مصرف آب و تحمل به تنش را در گیاهان افزایش دهد (Haghaninia *et al.*, 2022b; Ibrahim *et al.*, 2020). چندین مطالعه نشان داده‌اند که بیوچار می‌تواند با تحریک فعالیت میکروبی در ناحیه ریشه، بهبود ظرفیت نگهداری آب خاک و افزایش کارایی مصرف مواد مغذی، عملکرد محصولات را در شرایط تنش شوری افزایش دهد (Alizadeh *et al.*, 2024; Hasanuzzaman *et al.*, 2023; Soliman *et al.*, 2021). به‌طور مشابه، پژوهشگران نشان دادند که افزودن بیوچار به خاک دسترسی به مواد مغذی ضروری گیاهان را افزایش و با بهبود سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی موجب رشد و تولید بیوماس بیشتر در گلرنگ تحت شرایط تنش شد (Ghaedi *et al.*, 2024). بنابراین، استفاده از بیوچار می‌تواند به کاهش اثرات تنش بر روی محصولات کمک کند و همچنین به مدیریت مؤثر و پایدار خاک و مواد مغذی یاری رساند (Kiani *et al.*, 2023; Nasiri *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2023).

بنابراین، با توجه به چالش‌های اساسی مرتبط با کاهش عملکرد و کیفیت گیاهان زراعی تحت شرایط تنش شوری و مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی که به نوبه خود منجر به تخریب محیط‌زیست، کاهش سلامت خاک و افزایش هزینه‌های تولید می‌شود، نیاز به رویکردهای پایدارتر و کم‌ضررتر برای مدیریت این چالش‌ها احساس می‌شود. در این راستا، استفاده از فناوری‌های نوین مانند نانوذرات و بیوچار به‌عنوان جایگزین‌های بالقوه می‌تواند تأثیرات قابل‌توجهی در بهبود صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاهان و کاهش اثرات منفی شوری داشته باشد. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات کاربرد جداگانه و ترکیبی بیوچار و نانوذرات اکسید منیزیم بر ویژگی‌های بیوشیمیایی، عملکرد و کیفیت روغن گیاه گلرنگ تحت شرایط تنش شوری طراحی و اجرا شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند درک بهتری از مکانیسم‌های آسیب ناشی از تنش شوری و واکنش‌های گیاهی به نانوذرات اکسید منیزیم و بیوچار ارائه دهد و به توسعه راهکارهای مؤثر برای افزایش تحمل گیاهان به شوری و بهبود بهره‌وری کشاورزی کمک کند.

مواد و روش‌ها

محل و شرایط اجرای آزمایش

این پژوهش در سال ۱۴۰۱ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه اجرا شد. شرایط محیطی شامل

جمله اصلاح خاک، کاهش اثرات تغییرات آب و هوا و افزایش کارایی استفاده از مواد مغذی برخوردار است (Yasmin *et al.*, 2021). در میان نانوذرات فلزی، نانوذرات اکسید منیزیم (MgO-NPs) به‌دلیل عدم سمیت و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاص خود مورد توجه قرار گرفته‌اند (Ali *et al.*, 2024a; Khanchi *et al.*, 2024). این نانوذرات نه‌تنها به‌عنوان منبع منیزیم برای گیاهان عمل می‌کنند، بلکه به‌دلیل اندازه کوچک و نسبت سطح به حجم بالا، قابلیت‌های ویژه‌ای در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارند (Amirfakhrian *et al.*, 2024). همچنین، اکسید منیزیم به‌عنوان یک عنصر ضروری در فرآیندهای بیوشیمیایی گیاهان نقش دارد و در فعال‌سازی آنزیم‌ها و سنتز کلروفیل مؤثر است (Geng *et al.*, 2021; Ojagh & Moaveni, 2022). علاوه بر این، نانوذرات اکسید منیزیم می‌توانند به‌بهبود جذب آب و مواد مغذی در گیاهان کمک کنند (Sotoodehnia-Korani *et al.*, 2023; Geng *et al.*, 2021). که این امر به‌ویژه در شرایط تنش شوری اهمیت دارد (Sharavdorj *et al.*, 2022). تحقیقات نشان داده‌اند این نانوذرات می‌توانند به بهبود مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های محیطی، از جمله شوری، کمک کنند (Ali *et al.*, 2024b) و از طریق تعدیل فرآیندهای متابولیکی، توانایی گیاه در تحمل شرایط نامساعد را افزایش دهند (Faiz *et al.*, 2022; Rehman *et al.*, 2018). محققان گزارش کردند نانوذرات اکسید منیزیم از طریق مکانیسم‌های مختلف از جمله افزایش سنتز ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و کاهش تولید رادیکال‌های آزاد، اثرات مثبتی بر عملکرد دانه، درصد روغن و ترکیبات بیوشیمیایی در گیاه گلرنگ تحت تنش شوری دارند (Farhangi-Abriiz & Ghassemi-Golezani, 2021).

یکی دیگر از راهکارهای نوین در مدیریت تنش‌های محیطی، استفاده از مواد بهبود دهنده خاک مانند بیوچار است (Alharbi & Alaklabi, 2022; Zhang *et al.*, 2020). بیوچار، ماده‌ای کربنی است که از طریق پیرولیز بیوماس آلی در دماهای بالا (۴۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) تولید می‌شود و ممکن است به‌عنوان یک اصلاح‌کننده خاک برای افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌های مختلف موثر واقع شود (Helaoui *et al.*, 2023; Seleiman *et al.*, 2019; Yasmin *et al.*, 2021). بیوچار به‌دلیل سطح بالا، ساختار متخلخل و قابلیت بهبود نگهداری آب خاک و دسترسی به مواد مغذی،

خاک مورد استفاده از مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه تهیه و پس از هوادهی و خشک کردن در سایه از الک دو میلی‌متر (با مش ۱۰) عبور داده شد. براساس نتایج تجزیه خاک، بافت خاک به صورت لوم رسی شنی بود که برخی از خصوصیات آن در جدول (۱) ارائه شده است. بذر مورد استفاده رقم پدیده بود که از موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شد. برای ضدعفونی بذرهای از محلول هیپوکلریت سدیم یک درصد به مدت پنج دقیقه استفاده و سپس بذرهای با آب مقطر شستشو داده شدند. پس از خشک شدن در دمای محیط، در هر گلدان (با قطر دهانه ۲۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر) ۱۰ بذر در عمق ۱/۵ سانتی‌متری کشت شد. پس از سبز شدن و استقرار بوته‌ها، به پنج بوته در هر گلدان کاهش یافت.

دمای روز 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد و دمای شب 18 ± 2 درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۶۰ تا ۷۰ درصد و نور طبیعی با تناوب ۱۲ ساعت روشنایی و ۱۲ ساعت تاریکی بود. برای کاهش اثر عوامل محیطی، گلدان‌ها به صورت تصادفی جابه‌جا و به‌طور منظم بررسی شدند.

طراحی آزمایش و تیمارها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) با سه تکرار انجام شد. فاکتور اول تنش شوری در سه سطح صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم) و فاکتور دوم شامل چهار تیمار کودی (شاهد، بیوجار، ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوآکسید منیزیم و کاربرد همزمان بیوجار + نانوذرات اکسید منیزیم) بود.

آماده‌سازی بستر و کشت بذر

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر

نیترژن کل ($g.kg^{-1}$)	فسفر قابل جذب ($mg.kg^{-1}$)	پتاسیم قابل جذب ($mg.kg^{-1}$)	ظرفیت تبادل کاتیونی ($Cmolc.kg^{-1}$)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی ($ds.m^{-1}$)	بافت خاک
۰/۸۵	۵/۸	۴۰۷	۲۶/۵	۷/۸	۱/۱۹	لوم رسی شنی

از جمله کشاورزی قابلیت استفاده را دارد (Nasiri et al., 2023) خواص شیمیایی بیوجار مورد استفاده در جدول (۲) ارائه شده است. نانوذره اکسید منیزیم (MgO) از شرکت نانوثانی، مشهد، ایران تهیه شد. طبق اطلاعات ارائه شده توسط این شرکت، نانو پودر مذکور دارای خلوص ۹۹ درصد، اندازه ذرات ۲۰ نانومتر، مساحت سطح ویژه ۲۰ مترمربع بر گرم و رنگ سفید است. مورفولوژی ذرات به صورت چندوجهی و چگالی توده‌ای آن ۰/۱۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و چگالی حقیقی ۳/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب تعیین شده است. درنهایت، نانوذرات با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر در آب مقطر حل و به مدت ۳۰ دقیقه با استفاده از همزن مغناطیسی برای جلوگیری از تجمع ذرات و بهبود پراکندگی به هم زده شدند. به‌منظور تحریک مکانیسم‌های دفاعی و آنتی‌اکسیدانی گیاه و افزایش اثربخشی نانوذرات، یک مرحله پیش‌محلول پاشی ۳ روز قبل از شروع تنش شوری انجام شد. سپس، محلول به صورت یکنواخت بر روی سطح برگ‌های گیاه گلرنگ با استفاده از سم‌پاش دستی در سه مرحله و با فواصل ۱۰ روز در طول دوره رشد اعمال گردید.

اعمال تنش شوری

تنش شوری با غلظت‌های صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم (NaCl) از مرحله‌ی چهار برگی تا گلدهی کامل گیاهان صورت گرفت. در طول مدت زمان تنش هر شش روز یک بار آبشویی کامل محیط ریشه گیاهان با آب معمولی بدون تنش شوری انجام گرفت تا تغییرات EC و pH در اثر آبشویی به حداقل برسد. آبیاری گلدان‌ها به‌گونه‌ای تنظیم شد که رطوبت خاک در حدود ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه حفظ شود. در تیمار شاهد، آبیاری فقط با آب مقطر انجام شد.

تهیه و اعمال تیمارهای کودی

بیوجار مورد استفاده از شرکت فصل پنجم خریداری و به میزان ۱۰ درصد وزنی به خاک گلدان اضافه شد. این میزان باتوجه به توصیه شرکت تولیدکننده و همچنین براساس مطالعات قبلی انتخاب شد که مناسب‌ترین مقدار مصرف این نوع از بیوجار را گزارش کرده بودند (Haghaninia et al., 2024b; Nasiri et al., 2023). شایان ذکر است، بیوجار مورد استفاده در این آزمایش، یک محصول طبیعی است که از معدن به‌دست می‌آید و پس از آن برای هر گونه فعالیت

جدول ۲- خصوصیات بیوجار مورد استفاده در این پژوهش

اهدایت الکتریکی	درصد کربن آلی	درصد پتاسیم	درصد فسفر محلول	درصد نیتروژن	مس (میلی گرم بر کیلوگرم)	روی (میلی گرم بر کیلوگرم)	منیزیم (میلی گرم بر کیلوگرم)	آهن (میلی گرم بر کیلوگرم)
۱/۲۳	۱۳/۸۵	۰/۱۴	۰/۱۵	۱/۳۸	۰/۵۶	۱/۷۴	۳/۴۲	۴/۱۵

خواننده و محتوای فلاونوئید کل با منحنی استاندارد کوئرستین تعیین شد.

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (APX) با استفاده از روش Nakano و Asada (۱۹۸۱) اندازه‌گیری شد. ابتدا ۰/۵ گرم از برگ‌های تازه در ۱۰ میلی‌لیتر بافر پتاسیم فسفات همگن و پس از سانتریفیوژ، ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره آنزیمی به ترکیب شامل H_2O_2 و آسکوربات اضافه شد. کاهش جذب نوری در ۲۹۰ نانومتر اندازه‌گیری و فعالیت APX بر حسب میکرومول آسکوربات در دقیقه محاسبه گردید. همچنین، فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (SOD) به روش Beauchamp و Beauchamp (۱۹۷۱) اندازه‌گیری شد. به‌طور خلاصه، ۰/۵ گرم از برگ‌ها در ۱۰ میلی‌لیتر بافر پتاسیم فسفات همگن شد. سپس، عصاره آنزیمی به ترکیب حاوی NBT و ریبولوین اضافه گردید و نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه تحت نور قرار گرفتند. جذب نوری در ۵۶۰ نانومتر اندازه‌گیری و فعالیت SOD به‌عنوان واحد کاهش جذب نوری گزارش شد. علاوه بر این، برای سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز (POX) ابتدا ۴۹۰ میکرولیتر آب اکسیژنه ۲۲۵ میلی‌مولار و ۴۹۰ میکرولیتر محلول گایاکول ۴۵ میلی‌مولار با هم مخلوط گردید و به آن ۲۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی اضافه شد. در نهایت، تغییرات جذب در طول موج ۴۷۰ نانومتر خوانده شد و فعالیت آنزیمی بر حسب واحد آنزیمی در میلی‌گرم پروتئین محاسبه شد (In-Byung et al., 2007).

اندازه‌گیری مالون‌دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن

مقدار مالون‌دی‌آلدئید به‌عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپید با استفاده از واکنش تیوباربیتوریک اسید (TBA) تعیین شد. ابتدا ۰/۵ گرم از بافت گیاهی تازه هموژنیزه شده در پنج میلی‌لیتر محلول اسید تری‌کلرو استیک (TCA) ۰/۱ درصد سانتریفیوژ شد (۱۰۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه). سپس به یک میلی‌لیتر از فاز بالایی، دو میلی‌لیتر محلول TBA ۰/۵ در TCA ۲۰ درصد اضافه و مخلوط به مدت ۳۰

نمونه برداری و برداشت

به‌منظور اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی نمونه‌برداری از گیاهان در مرحله گلدهی کامل انجام شد. نمونه‌های برداشت شده به مدت دو دقیقه در داخل تانک ازت قرار داده شدند. سپس نمونه‌های فریز شده تا زمان اندازه‌گیری شاخص‌ها در فریزر نگهداری شدند.

صفات اندازه‌گیری شده

ارتفاع و عملکرد دانه

ارتفاع هر سطح از تیمارها در تمامی تکرارها بر حسب سانتی‌متر ثبت شد. علاوه بر این، برداشت در مرحله رسیدگی کامل دانه‌ها انجام شد. هر گلدان به‌طور جداگانه برداشت و دانه‌ها و اندام‌های رویشی از هم تفکیک شدند. برای اندازه‌گیری عملکرد، تمامی دانه‌های هر گلدان به دقت جمع‌آوری شدند و به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. سپس وزن دانه‌ها با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری فنل کل و فلاونوئید کل

محتوای فنل کل به روش Folin-Ciocalteu اندازه‌گیری شد (Singleton & Rossi, 1965). بدین منظور، ۰/۵ گرم از برگ‌های تازه با ۱۰ میلی‌لیتر متانول ۸۰ درصد استخراج و پس از سانتریفیوژ، ۰/۵ میلی‌لیتر از عصاره با ۲/۵ میلی‌لیتر معرف Folin-Ciocalteu و دو میلی‌لیتر کربنات سدیم ۷/۵ درصد مخلوط شد. نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق قرار گرفتند و جذب نوری در طول موج ۷۶۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، محتوای فنل کل با استفاده از منحنی استاندارد گالیک اسید محاسبه شد. محتوای فلاونوئید کل به روش آلومینیوم کلرید اندازه‌گیری شد (Chang et al., 2002). بدین منظور، ۰/۵ میلی‌لیتر عصاره متانولی با دو میلی‌لیتر آب مقطر و ۰/۱۵ میلی‌لیتر محلول آلومینیوم کلرید ۵ درصد مخلوط گردید. پس از پنج دقیقه، یک میلی‌لیتر سدیم هیدروکسید یک مولار اضافه و حجم نهایی به پنج میلی‌لیتر رسانده شد. جذب نوری ۴۱۵ نانومتر

لایه بالایی (سطحی) هر نمونه جداسازی و جهت آنالیز ترکیبات اسید چرب استفاده شد. در نهایت، شناسایی ترکیبات اسیدهای چرب با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی مدل Agilent 5977A ساخت کشور آمریکا متصل شده به طیف سنجی جرمی (GC-MS) و ستون HP-5MS پنج درصد فنیل متیل پلی سیلوکسان، به طول ۳۰ متر، قطر داخلی ۰/۲۵ میلی متر و ضخامت ماده جاذب ۰/۲۵ میکرومتر انجام شد. در نهایت، نرم افزار Chemstation و مخلوط FAME Supelco 37 Component FAME Mix Bellefonte, PA, USA به عنوان رفرنس جهت شناسایی ترکیبات مورد استفاده قرار گرفت و کمی کردن ترکیبات روغن با استفاده از انتگرال گیری و محاسبه مساحت سطح زیر پیک انجام گردید (Haghaninia et al., 2024a).

آنالیز آماری

این پژوهش در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی انجام شد. بعد از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، با استفاده از نرم افزارهای SAS V9 و آزمون LSD تجزیه و تحلیل آماری انجام شد. تجزیه واریانس داده‌ها با ضریب اطمینان ۹۵ درصد صورت گرفت و نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel 2013 رسم شدند.

نتایج و بحث

محتوای فنل و فلانویید کل

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که محتوای فنل و فلانویید کل به طور قابل توجهی تحت تأثیر تیمارهای کودی، تنش شوری و اثر متقابل هر دو عامل قرار گرفت. بیشترین میزان فنل و فلانویید در تنش شوری ۵۰ میلی-مولار تیمار شده با بیوچار+نانواکسید منیزیم بدست آمد و کمترین محتوای صفات مذکور نیز در شرایط عدم تنش بدون کاربرد کود تعلق داشت (شکل ۱). در تنش شوری ۵۰ میلی-مولار، محتوای فنل و فلانویید به ترتیب ۵۱/۲ و ۶۱/۸ درصد در مقایسه با عدم تنش افزایش یافتند. علاوه بر این، استفاده از بیوچار+نانواکسید منیزیم در تنش ۵۰ میلی-مولار محتوای فنل کل را ۱۰۹/۷ درصد و محتوای فلانویید کل را ۱۲۳/۹ درصد در مقایسه با شاهد افزایش داد (شکل ۱).

فنل‌ها به عنوان مولکول‌های دفاعی موجب کاهش تولید ROS شده و در نهایت محافظت از ساختارهای سلولی در برابر استرس شوری را به همراه دارند (Alizadeh et al., 2024). فلاونوئیدها نیز به عنوان ترکیبات آنتی‌اکسیدانی، تحت شرایط تنش ممکن است به طور قابل توجهی افزایش

دقیقه در ۹۵ درجه سانتی‌گراد گرم شد. پس از سرد شدن سریع نمونه‌ها در یخ، نمونه‌ها مجدداً سانتریفیوژ شده و جذب محلول در طول موج‌های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر خوانده شد. مقدار مالون‌دی‌آلدئید با استفاده از ضریب خاموشی (۱۵۵ میلی‌مول در سانتی‌متر) محاسبه شد (Heath & Packer, 1968). همچنین، مقدار H_2O_2 با استفاده از روش پتاسیم یدید (KI) سنجیده شد. ۰/۵ گرم از بافت گیاهی در پنج میلی‌لیتر TCA ۰/۱ درصد هموژنیزه و سپس سانتریفیوژ شد (۱۲۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه). به ۰/۵ میلی‌لیتر از فاز بالایی، ۰/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم (۵۰ میلی‌مولار $pH=7$) و یک میلی‌لیتر KI یک مولار اضافه شد. جذب نمونه‌ها در ۳۹۰ نانومتر با اسپکتروفتومتر خوانده شد و غلظت H_2O_2 براساس منحنی استاندارد تعیین شد (Alexieva et al., 2001).

استخراج روغن

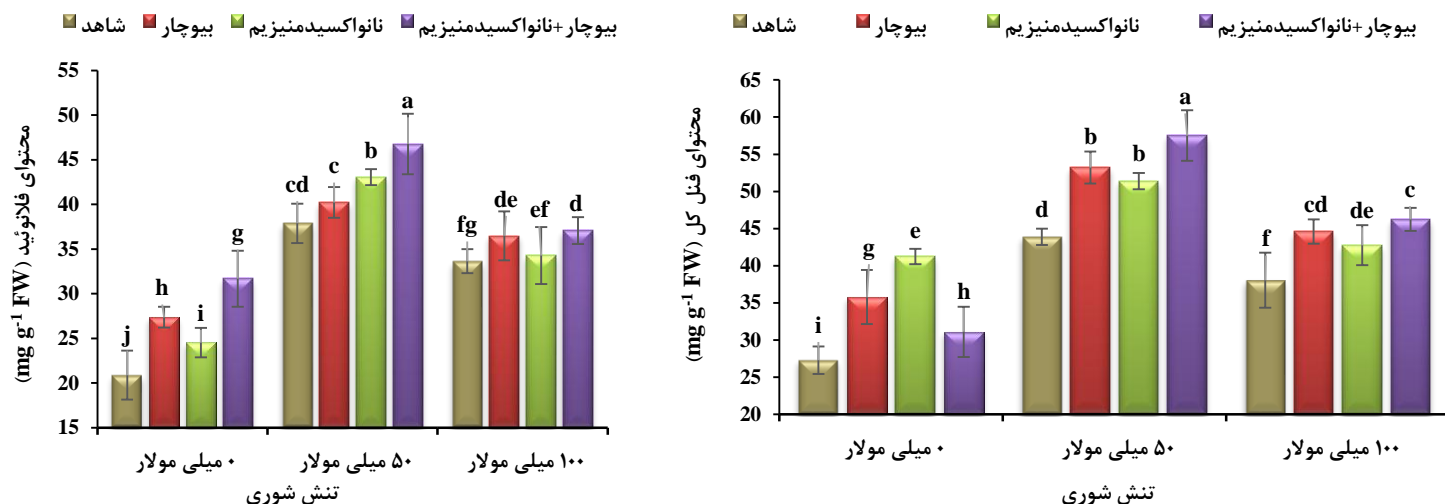
به منظور استخراج روغن موجود در بذور گلرنگ، پنج گرم از نمونه بذری هر تیمار را به وسیله آسیاب به صورت کامل پودر کرده و به آن ۲۵ میلی‌لیتر پترولیوم اتر به عنوان حلال اضافه شد. پس از آن، نمونه‌ها به شیکر منتقل و با سرعت ۱۶۰ دور در دقیقه به مدت هشت ساعت شیک شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شدند. در ادامه، لایه رویی به وسیله کاغذ صافی فیلتر شده و جداسازی انجام شد. لازم به ذکر است که به منظور استخراج کامل روغن مراحل ذکر شده دو الی سه بار تکرار گردید (Haghaninia et al., 2024a).

درصد و عملکرد روغن

جهت تعیین درصد روغن پس از اتمام آزمایش نمونه‌ها، تقاضای وزن اولیه نمونه و وزن ثانویه بر وزن اولیه نمونه، درصد روغن محاسبه شد. علاوه بر این، جهت تعیین عملکرد روغن، عملکرد دانه در درصد روغن ضرب گردید (Haghaninia et al., 2024a).

ترکیبات روغن

شناسایی اسیدهای چرب موجود در روغن گلرنگ براساس آماده‌سازی نمونه‌ها به صورت مشتق متیل استر (Fame) صورت گرفت. برای آماده‌سازی فیم، ۰/۱ گرم از روغن گلرنگ با ۰/۲ میلی‌لیتر محلول متانولیک KOH دو نرمال (۱۱/۲ گرم پتاسیم هیدروکسید در ۱۰۰ میلی‌لیتر متانول) و ۱/۵ میلی‌لیتر هگزان مخلوط شده و سپس با سرعت ۲۵۰۰ دور در دقیقه به مدت یک دقیقه سانتریفیوژ شدند.



شکل ۱- اثر متقابل سطوح مختلف تنش شوری و تیمارهای کودی بر محتوای فنل و فلاونوئید گلرنگ

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی داری بین داده‌ها در آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

به افزایش تولید این ترکیبات کمک می‌کند، زیرا منیزیم به عنوان یک کوفاکتور در مسیرهای متابولیکی مربوط به سنتز فنل‌ها و فلاونوئیدها نقش دارد و می‌تواند با تقویت فتوسنتز و کاهش تنش‌های اکسیداتیو، تولید انرژی را افزایش و شرایط بهتری برای فعال‌سازی مسیرهای بیوشیمیایی فراهم کنند (Ali et al., 2022). در تطابق با نتایج حاصل از پژوهش حاضر، محققان اظهار داشتند کاربرد نانوذرات منیزیم در شرایط تنش موجب بهبود فنل‌ها و فلاونوئیدها شد (Ojagh & Moaveni, 2022).

یابند (Alharbi & Alaklbi, 2022). بنابراین، افزایش ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی در گیاهان تحت تنش به عنوان یکی از پاسخ‌های دفاع آنتی‌اکسیدانی غیرآنزیمی دور از انتظار نیست (Haghaninia et al., 2024c). علاوه بر این، کاربرد تلفیقی بیوجار و نانو اکسید منیزیم موجب بهبود تولید و تجمع ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی در گیاهان تحت تنش شوری شد. بیوجار، از طریق بهبود جذب عناصر معدنی و ایجاد شرایط خاکی بهتر، باعث بهبود سنتز متابولیت‌های ثانویه مانند فنل‌ها و فلاونوئیدها می‌شود (Alizadeh et al., 2024). همچنین، نانو اکسید منیزیم نیز

جدول ۳- تجزیه واریانس برخی صفات فیزیولوژیک گلرنگ تحت تنش شوری و کاربرد تیمارهای کودی

میانگین مربعات							
منابع تغییرات	درجه آزادی	فلاونوئید کل	فنل کل	گایاکول پراکسیداز	سوپراکسید دیسموتاز	پراکسیداز	پراکسید هیدروژن
تنش شوری	۲	۵۲۰/۰۸*	۶۷۸/۳۴**	۴/۹۸**	۷/۸۹**	۳/۸۶**	۲۶/۰۸**
تیمارهای کودی	۳	۲۰۹/۳۴**	۴۰۶/۴۷**	۰/۶۹۷*	۰/۹۳**	۰/۱۳۶**	۱/۰۹**
تنش × تیمارهای کودی	۶	۲۱/۰۶**	۴/۱۲*	۰/۰۷۱**	۰/۰۵۵**	۰/۰۰۵۶*	۰/۰۰۴۷*
خطا	۲۵	۲/۲۱	۱/۳۲	۰/۰۰۳۴	۰/۰۱۷	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۱۹
ضریب تغییرات (%)		۴/۳۱	۲/۶۸	۲/۵۴	۳/۹۱	۵/۶۹	۴/۷۲

^{ns} عدم اختلاف معنی‌دار، * بیانگر اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد و * بیانگر اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد

نانو اکسید منیزیم در تنش شوری ۵۰ میلی‌مولار حاصل شد و کمترین فعالیت آنزیم‌های مذکور نیز در تیمار شاهد ثبت شد (جدول ۴). فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، گایاکول پراکسیداز و پراکسیداز در تنش ۵۰ میلی‌مولار در مقایسه با عدم تنش به ترتیب ۶۶/۳۵، ۷۹/۴

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان به طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمارهای کودی، تنش شوری و اثر متقابل هر دو عامل قرار گرفت (جدول ۳). بیشترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، گایاکول پراکسیداز و پراکسیداز در تیمار بیوجار +

آنتی‌اکسیدان‌تی در گیاهان تحت تنش شوری شد. بیوچار از طریق بهبود خصوصیات خاک، افزایش قابلیت نگهداری آب و تقویت میکروارگانیسم‌های مفید خاک، نقش مهمی در افزایش تولید متابولیت‌های دفاعی و بهبود کارایی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ایفا می‌کند (Hasanuzzaman *et al.*, 2021). نانو اکسید منیزیم نیز از طریق تأمین منیزیم، که کوفاکتور ضروری برای بسیاری از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان است، فعالیت این آنزیم‌ها را ارتقا می‌دهد (Khanchi *et al.*, 2024). همچنین، این ماده می‌تواند با کاهش تولید رادیکال‌های آزاد و تقویت سامانه‌های دفاعی، میزان پراکسیداسیون لیپیدها را کاهش و استرس اکسیداتیو را کنترل کند (Sotoodehnia-Korani *et al.*, 2023). در تایید این یافته‌ها، محققان بیان کردند کاربرد تلفیقی نانوذرات و بیوچار به‌طور قابل توجهی صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان را تحت تنش شوری بهبود بخشید (Mahmoud *et al.*, 2022).

و ۳۵۹/۵ درصد افزایش یافتند (جدول ۴). از سوی دیگر، کاربرد تلفیقی بیوچار+ نانو اکسید منیزیم در تنش ۵۰ میلی‌مولار فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، گایاکول پراکسیداز و پراکسیداز را به ترتیب ۱۳۰/۴، ۱۱۶/۳ و ۶۴۸ درصد در مقایسه با شاهد افزایش داد (جدول ۴). در شرایط شوری، گیاهان برای مقابله با افزایش تولید رادیکال‌های آزاد و جلوگیری از آسیب اکسیداتیو، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش می‌دهند (Hasanuzzaman *et al.*, 2021, Shaki *et al.*, 2018). با این وجود، با ادامه و تشدید تنش، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ممکن است به دلیل آسیب به سیستم آنزیمی و کاهش توانایی تولید آنزیم‌های جدید کاهش یابد (Faizan *et al.*, 2021). مشابه با یافته‌های ما، پژوهشگران اظهار داشتند تحت تنش خفیف فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی افزایش می‌یابد اما در شرایط تنش شدید فعالیت این آنزیم‌ها با کاهش موجه می‌شوند (Haghaninia *et al.*, 2024c). با این حال، تیمار تلفیقی بیوچار و نانو اکسید منیزیم منجر به بهبود فعالیت آنزیم‌های

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش شوری و تیمارهای کودی بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، محتوای مالون‌دی‌آلدئید و

پراکسید هیدروژن

تیمارها	گایاکول پراکسیداز (واحد آنزیمی در میلی گرم پروتئین)	سوپراکسید دیسموتاز (واحد آنزیمی در میلی گرم پروتئین)	پراکسیداز (واحد آنزیمی در میلی گرم پروتئین)	پراکسید هیدروژن (میکرو مول بر گرم وزن تر)	مالون‌دی‌آلدئید (میکرو مول بر گرم وزن تر)
شاهد	۱/۵۳i	۱/۹۷i	۰/۲۲۳i	۱/۰۷j	۲/۳۴k
بیوچار	۱/۹۹h	۲/۹۴fg	۰/۲۴۳hi	۱/۶۱i	۲/۹۹i
نانو اکسید منیزیم	۱/۱۴j	۲/۲۱h	۰/۴۷۶g	۱/۸۹h	۲/۹۴i
بیوچار+ نانو اکسید منیزیم	۱/۹۲h	۲/۸۱g	۰/۳۲۵h	۱/۴۳i	۲/۷۶j
شاهد	۲/۵۶d	۳/۸۳c	۱/۲۷۱c	۳/۴۱e	۵/۳۷d
بیوچار	۳/۱۲b	۳/۹۵c	۱/۴۷۳b	۳/۱۶f	۴/۵۷f
نانو اکسید منیزیم	۲/۷۵c	۴/۲۰b	۱/۳۹۹b	۲/۸۳g	۳/۵۷h
بیوچار+ نانو اکسید منیزیم	۳/۳۱a	۴/۵۴a	۱/۶۶۷a	۲/۶۱g	۴/۱۷g
شاهد	۲/۱۴g	۳/۰۸f	۰/۷۴۴f	۴/۷۸a	۶/۱۵a
بیوچار	۲/۳۱ef	۳/۳۶e	۰/۸۷۲e	۴/۲۹c	۵/۸۷b
نانو اکسید منیزیم	۲/۲۳fg	۳/۴۸de	۰/۹۷۴d	۴/۵۷b	۵/۵۴c
بیوچار+ نانو اکسید منیزیم	۲/۴۱e	۳/۶۱d	۰/۸۱۲ef	۴/۰۵d	۴/۷۳e
LSD 5%	۰/۰۹۸	۰/۲۱۹	۰/۰۸۳	۰/۲۳۸	۰/۱۴۳

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌داری بین داده‌ها در آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

محتوای مالون‌دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد اثر تنش شوری، تیمارهای کودی و اثر متقابل تنش شوری × تیمارهای کودی بر محتوای مالون‌دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن معنی‌دار بود. بیشترین محتوای مالون‌دی‌آلدئید و پراکسید

هیدروژن در شرایط تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار بدون مصرف کود مشاهده شد و کمترین میزان آن‌ها نیز به تیمار شاهد مربوط بود (جدول ۴). علاوه بر این، در مقایسه با عدم تنش، محتوای مالون‌دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن در تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار به میزان ۱۰۱/۹ و ۱۹۸/۳

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۵) حاکی از آن بود که اثرات تنش شوری، تیمارهای کودی و اثر متقابل دو عامل مذکور بر ارتفاع بوته گلرنگ معنی‌دار بود. بیشترین ارتفاع بوته در تیمار تلفیقی بیوچار+ نانوآکسید منیزیم در شرایط بدون تنش بدست آمد، در حالی که کمترین ارتفاع در شرایط تنش ۱۰۰ میلی‌مولار بدون کاربرد کود مشاهده شد (شکل ۲). ارتفاع بوته گلرنگ در شرایط تنش شوری ۵۰ میلی‌مولار به میزان ۱۵/۳ درصد و تحت تنش ۱۰۰ میلی‌مولار ۲۸/۹ درصد نسبت به شرایط بدون تنش کاهش یافت. در مقابل، کاربرد تلفیقی بیوچار+ نانوآکسید منیزیم در شرایط عدم تنش منجر به افزایش ۷۹/۸ درصدی ارتفاع بوته نسبت به شرایط تنش ۱۰۰ میلی‌مولار بدون کود شد. همچنین، تیمار تلفیقی مذکور ارتفاع بوته را به‌طور میانگین ۲۹/۵ درصد در مقایسه با شاهد افزایش داد (شکل ۲). تنش شوری باعث افزایش غلظت یون‌های سمی در سلول‌های گیاهی می‌شود که به نوبه خود به کاهش فشار اسمزی و تغییرات منفی در جذب آب منجر می‌شود (Sharavdorj *et al.*, 2022)، این شرایط می‌تواند منجر به کاهش رشد ریشه، کاهش جذب مواد مغذی و در نتیجه کاهش ارتفاع بوته گردد (Mustafa *et al.*, 2024). به‌طور مشابه، محققان گزارش کردند تنش شوری با کاهش تقسیم سلولی و افزایش مرگ سلولی منجر به کاهش ارتفاع بوته در گلرنگ شد (Jam *et al.*, 2023). با این حال، تیمار تلفیقی بیوچار و نانوآکسید منیزیم با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، موجب افزایش ارتفاع گیاهان تحت تنش شوری شد. بیوچار با افزایش ظرفیت نگهداری آب، بهبود تهویه خاک و تسهیل جذب عناصر غذایی مؤثر در رشد، شرایط محیطی بهینه‌تری برای گیاه فراهم می‌کند و به گیاه اجازه می‌دهد رشد طولی بهتری داشته باشد (Soliman *et al.*, 2023). نانو آکسید منیزیم نیز به‌عنوان یک منبع منیزیم، نقش مهمی در بهبود فرآیند فتوسنتز و تولید انرژی ایفا می‌کند (Anand *et al.*, 2020). منیزیم به‌عنوان بخش اصلی مولکول کلروفیل و کوفاکتور بسیاری از آنزیم‌های فتوسنتزی، به افزایش سرعت فتوسنتز و تولید کربوهیدرات‌ها کمک کرده و به افزایش ارتفاع گیاه منجر می‌شود (Farhangi-Abriz *et al.*, 2021). همسو با یافته‌های ما، پژوهشگران اظهار داشتند استفاده از بیوچار باعث تغییر مورفولوژی ریشه، بهبود تعادل آب و جذب مواد مغذی شده و از این طریق منجر به افزایش رشد و ارتفاع گلرنگ تحت تنش می‌گردد (Najafi-Ghiri *et al.*, 2022).

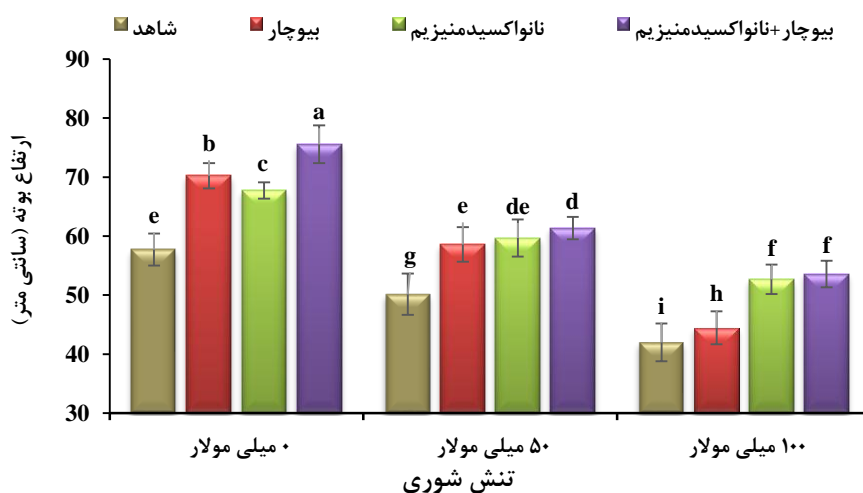
درصد افزایش یافت (جدول ۴). با این حال، تیمارهای کودی محتوای مالون‌دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن را کاهش دادند؛ به‌طوری که استفاده از تیمار بیوچار + نانوآکسید منیزیم در شرایط عدم تنش در مقایسه با تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار بدون مصرف کود محتوای مالون‌دی‌آلدئید ۶۲/۱ درصد و پراکسید هیدروژن ۳۴۶/۷ درصد کاهش یافت (جدول ۴). یکی از آثار تنش‌های محیطی نظیر تنش شوری افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و القای تنش اکسایشی است. در این شرایط، تجمع پراکسید هیدروژن پاسخ‌های دفاعی گیاه را تنظیم می‌کند اما تجمع بیشتر H_2O_2 باعث آسیب به غشاء آسیب می‌شود (Noreen *et al.*, 2021). همچنین، میزان تجمع مالون‌دی‌آلدئید شاخصی از میزان خسارت تنش اکسیداتیو بوده و بیانگر آسیب به غشاء پلاسمایی سلول‌های گیاهی در شرایط تنش است (Azeem *et al.*, 2023; Haghaninia *et al.*, 2024c). از این‌رو، افزایش مالون‌دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن را می‌توان به افزایش رادیکال‌های فعال اکسیژن و پراکسیداسیون لیپیدی غشاها نسبت داد (Liu *et al.*, 2022). همسو با این نتایج، پژوهشگران گزارش کردند تنش شوری منجر به استرس اکسیداتیو در گلرنگ شد و سطح مالون‌دی‌آلدئید را ۵۴ درصد در مقایسه با شاهد افزایش داد (Yasmin *et al.*, 2021). در مقابل، بنظر می‌رسد بیوچار از طریق بهبود خصوصیات خاک، کاهش تراکم یون‌های مضر مانند سدیم و ارتقای جذب آب و مواد مغذی می‌تواند به کاهش تولید رادیکال‌های آزاد و در نتیجه کاهش میزان پراکسیداسیون لیپیدها و MDA منجر شود (Helaoui *et al.*, 2023). از طرفی، نانو آکسید منیزیم با تقویت فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز، به حذف سریع‌تر H_2O_2 کمک می‌کند (Ali *et al.*, 2024). این امر از تجمع بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن جلوگیری کرده و آسیب به ساختارهای سلولی را کاهش می‌دهد (Faiz *et al.*, 2022). همسو با یافته‌های ما، پژوهش‌ها نشان داده‌اند کاربرد بیوچار+ نانوذرات پتانسیل بهبود توسعه ریشه و افزایش جذب آب و مواد مغذی را دارند که به کاهش استرس‌های ناشی از تنش کمک می‌کند (Shukla *et al.*, 2023).

ارتفاع بوته

جدول ۵- تجزیه واریانس ارتفاع بوته، عملکرد دانه، درصد و عملکرد روغن گلرنگ تحت تأثیر تنش شوری و کاربرد تیمارهای کودی

میانگین مربعات					منابع تغییرات
عملکرد روغن	درصد روغن	عملکرد دانه	ارتفاع بوته	درجه آزادی	
۲/۰۷**	۹۹/۷۸*	۸/۱۱**	۸۱۱/۰۶**	۲	تنش شوری
۰/۸۵۱**	۴۵/۴۲**	۳/۴۷**	۵۵۰/۹۸**	۳	تیمارهای کودی
۰/۰۵۵**	۳/۸۲**	۰/۱۵۰**	۱۲/۰۷*	۶	تنش × تیمارهای کودی
۰/۰۰۱۱	۰/۱۸۲	۰/۰۰۶	۱/۶۶	۲۵	خطا
۲/۱۳	۱/۳۱	۱/۶۹	۲/۲۳		ضریب تغییرات (%)

^{ns} عدم اختلاف معنی دار، ** بیانگر اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد و * بیانگر اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد



شکل ۲- اثر متقابل سطوح مختلف تنش شوری و تیمارهای کودی بر ارتفاع بوته گلرنگ

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی داری بین داده‌ها در آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

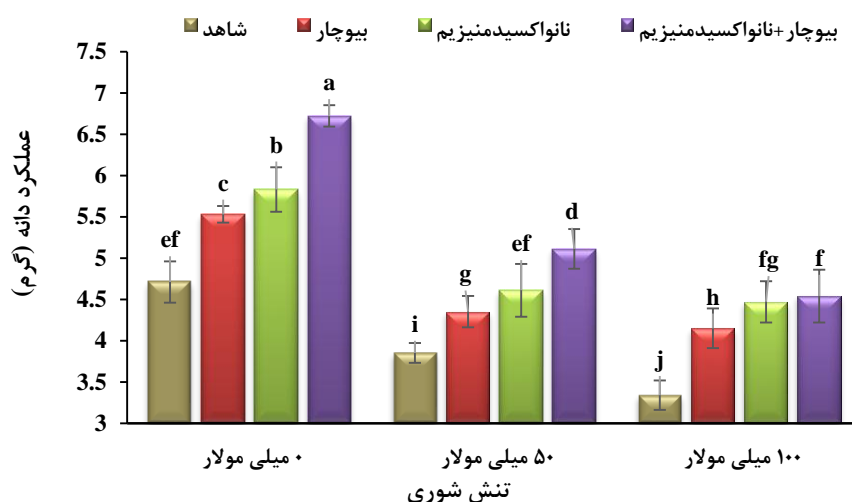
عملکرد دانه

تجزیه واریانس (جدول ۵) نشان داد اثر تنش شوری، تیمارهای کودی و اثر متقابل تنش شوری و تیمارهای کودی بر عملکرد دانه گلرنگ معنی دار بود. بیشترین عملکرد دانه در شرایط عدم تنش با کاربرد بیوچار+ نانو اکسید منیزیم بدست آمد و کمترین عملکرد دانه هم به تیمار شوری ۱۰۰ میلی مولار بدون کاربرد کود مربوط بود (شکل ۳). لازم بذکر است عملکرد دانه در شرایط عدم تنش در مقایسه با تنش شوری ۱۰۰ میلی مولار ۳۸/۵ درصد افزایش پیدا کرد (شکل ۳). همچنین، کاربرد تیمار تلفیقی بیوچار+ نانو اکسید منیزیم عملکرد دانه گلرنگ را در مقایسه با شاهد ۴۲/۷ درصد افزایش داد. کاربرد تلفیقی تیمار مذکور در شرایط عدم تنش، عملکرد دانه را در مقایسه با تنش ۱۰۰ میلی-مولار بدون مصرف کود ۱۰۱/۳ درصد بهبود بخشید (شکل ۳). تنش شوری از طریق افزایش غلظت یون‌های سدیم و

کلر، تعادل یونی را برهم می‌زند و به سمیت یونی و کاهش فعالیت‌های متابولیکی منجر می‌شود (Ahmad et al., 2023; Liu et al., 2022). این عوامل منجر به کاهش عملکرد دانه می‌شود، زیرا فتوسنتز و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌ها محدود می‌شود (Akbari et al., 2021; Hadia et al., 2023). به‌طور مشابه، محققان مشاهده کردند تنش شوری به ترتیب ۲۰/۷، ۲۶/۳، ۱۰/۵ و ۲۷/۲ درصد میزان فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، غلظت CO₂ بین سلولی و سرعت تعرق را در سویا کاهش و در نهایت منجر به کاهش عملکرد دانه آن شد (Zhang et al., 2020). در پژوهش دیگری، محققان گزارش کردند تنش شوری با افزایش تولید رادیکال‌های آزاد و استرس اکسیداتیو موجب افت عملکرد دانه در گلرنگ شد (Jam et al., 2023). با این وجود، بیوچار به واسطه افزایش نفوذپذیری خاک، بهبود ساختار خاک و افزایش فعالیت میکروبی، جذب آب و مواد مغذی را تسهیل

بسیاری از واکنش‌های بیوشیمیایی، باعث افزایش کارایی فتوسنتزی و تولید متابولیت‌های ثانویه شده و در نهایت افزایش عملکرد دانه را به همراه دارد (Geng *et al.*, 2021; Ali *et al.*, 2024). در این رابطه، پژوهشگران دریافتند محلول پاشی منیزیم باعث افزایش صفات رشد، وضعیت آب گیاه، شاخص پایداری غشا و کاهش نشت الکتروولیت در آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) شد و در نتیجه بهبود عملکرد را به همراه داشت (Rehman *et al.*, 2018).

و باعث افزایش عملکرد دانه می‌شود (Ibrahim *et al.*, 2020). در تایید یافته‌های ما، محققان اظهار داشتند بیوچار به‌طور قابل توجهی باعث بهبود فعالیت فتوسنتزی، سنتز کلروفیل، بیان ژن، فعالیت پروتئین‌های پاسخ‌دهنده به استرس و حفظ اسمولیت‌ها و تعادل هورمونی می‌شود که به نوبه خود تحمل در برابر تنش‌های اسمزی و یونی را بهبود می‌بخشد و به تبع آن موجب افزایش عملکرد دانه می‌شود (Wu *et al.*, 2023). همچنین، نانو اکسید منیزیم نیز به‌عنوان یک عنصر کلیدی در ساختار کلروفیل و کاتالیزور



شکل ۳- اثر متقابل سطوح مختلف تنش شوری و تیمارهای کودی بر عملکرد دانه گلرنگ

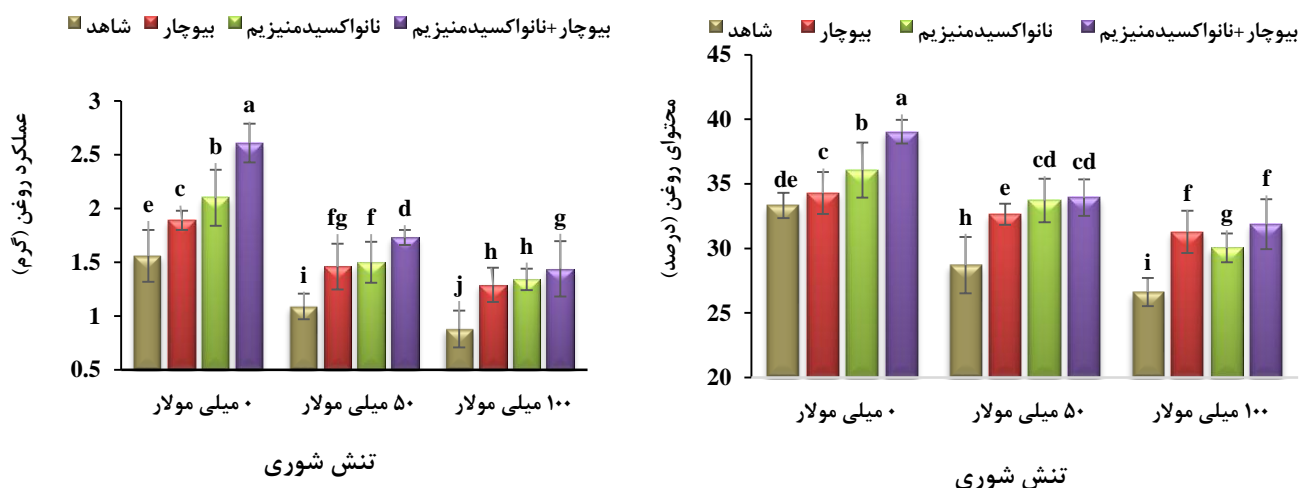
حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌داری بین داده‌ها در آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

فعالیت آنزیم‌های کلیدی در سنتز اسیدهای چرب و همچنین افزایش سطح رادیکال‌های آزاد منجر شود که این عوامل در نهایت به کاهش مقدار روغن دانه گلرنگ می‌انجامد (Mohamed *et al.*, 2020).

به‌طور مشابه، محققان گزارش کردند تنش شوری به‌دلیل اختلال در متابولیسم چربی و پروتئین‌ها منجر به کاهش تولید روغن دانه آفتابگردان شد (Abd El-Hameid, & Sadak, 2020). با این حال، استفاده از ترکیب بیوچار و نانو اکسید منیزیم به بهبود درصد و عملکرد روغن دانه گلرنگ منجر شد. بیوچار به‌عنوان یک اصلاح‌کننده خاک می‌تواند با بهبود ساختار خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و کاهش اثرات منفی تنش (Ghaedi *et al.*, 2024) بهبود درصد و عملکرد روغن گلرنگ را در پی داشته باشد. در این راستا، پژوهشگران مشاهده کردند بیوچار با بهبود جذب آب و مواد مغذی که برای سنتز روغن و بهبود عملکرد دانه

درصد و عملکرد روغن

نتایج نشان می‌دهد که اثر تنش شوری، تیمارهای کودی و اثر متقابل تنش شوری و تیمارهای کودی بر درصد و عملکرد روغن معنی‌دار شد (جدول ۵). بالاترین درصد و عملکرد روغن با کاربرد تلفیقی بیوچار + نانو اکسید منیزیم در شرایط عدم تنش بدست آمد و کمترین میزان صفات مذکور هم تحت تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار بدون مصرف کود ثبت شد (شکل ۴). در شرایط عدم تنش، درصد و عملکرد روغن به ترتیب ۱۹/۳ و ۶۴/۹ درصد در مقایسه با تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار افزایش یافتند. همچنین، کاربرد بیوچار + نانو اکسید منیزیم در شرایط عدم تنش در مقایسه با تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار بدون مصرف کود درصد و عملکرد روغن را به ترتیب ۴۵/۶۸ و ۱۹۶/۵ درصد افزایش داد (شکل ۴). تنش شوری می‌تواند به کاهش



شکل ۴- اثر متقابل سطوح مختلف تنش شوری و تیمارهای کودی بر محتوا و عملکرد روغن گلرنگ

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی داری بین داده‌ها در آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

شد. همچنین، حداکثر محتوای پالمیتیک اسید و استئاریک اسید به تنش شوری ۱۰۰ میلی مولار بدون مصرف کود تعلق داشت (جدول ۷). علاوه بر این، کاربرد بیوچار + نانو اکسید منیزیم در شرایط عدم تنش میزان لینولئیک اسید و لینولینیک اسید را ۷۴/۲ و ۹۳/۵ درصد در مقایسه با تنش ۱۰۰ میلی مولار بدون مصرف کود بهبود بخشید (جدول ۷). شوری با کاهش جذب آب و عناصر غذایی ضروری مانند نیتروژن و پتاسیم، به تغییر در مسیرهای متابولیسمی منجر می‌شود و میزان سنتز اسیدهای چرب غیراشباع مانند لینولئیک اسید را کاهش می‌دهد (Gogna et al., 2020). در عوض، افزایش غلظت یون‌های سدیم و کلر می‌تواند به تجمع اسیدهای چرب اشباع نظیر پالمیتیک اسید منجر شود که کیفیت تغذیه‌ای روغن را کاهش می‌دهد (Shaki et al., 2019). همچنین، تنش شوری می‌تواند فعالیت آنزیم‌های دخیل در بیوسنتز اسیدهای چرب را مختل و از طریق افزایش پراکسیداسیون لیپیدها پایداری روغن را تحت تأثیر قرار دهد و کیفیت روغن را کاهش دهد (Khademian et al., 2019). در تطابق با نتایج پژوهش حاضر، محققان گزارش کردند تحت تنش شوری محتوای اسید اولئیک دانه سویا (*Glycine max L.*) افزایش یافت، اما درصد اسید لینولئیک، اسید لینولینیک و شاخص غیراشباع روغن با افزایش شوری کاهش پیدا کرد (Ghassemi-Golezani & Farhangi-Abriz, 2018). با این حال، کاربرد ترکیبی بیوچار و نانو اکسید منیزیم اثرات هم‌افزایی بر بهبود کیفیت و کمیت روغن گلرنگ در شرایط

اهمیت دارند، منجر به افزایش درصد و عملکرد روغن در گیاهان گلرنگ تحت تنش شوری شد (Ghassemi-Golezani & Farhangi-Abriz, 2021). علاوه بر این، نانو اکسید منیزیم به دلیل اندازه کوچک و سطح بالای فعالیت، می‌تواند به راحتی جذب ریشه‌ها شود و موجب بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه گردد (Wang et al., 2020). همچنین، منیزیم می‌تواند به تقویت فعالیت آنزیم‌های دخیل در سنتز اسیدهای چرب کمک کند و با بهبود ساختار کلروفیل و افزایش سطح فتوسنتز، به افزایش تولید روغن منجر شود (Geng et al., 2021).

ترکیبات روغن

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۶) نشان داد ترکیبات روغن گلرنگ تحت تأثیر معنی دار تنش شوری، تیمارهای کودی و اثر متقابل تنش شوری × تیمارهای کودی قرار گرفتند. همچنین، ترکیبات اصلی روغن گلرنگ شامل اسیدهای چرب اشباع شده شامل پالمیتیک اسید (۳/۹۱-۷/۸۷ درصد)، استئاریک اسید (۱/۷۶-۴/۷۵ درصد) و اسیدهای چرب غیراشباع شامل اولئیک اسید (۶/۹۱-۱۲/۶۷ درصد)، لینولینیک اسید (۳/۵۳-۶/۸۳ درصد) و لینولئیک اسید (۳۱/۹۲-۳۶/۷۹ درصد) بود (جدول ۷). بیشترین محتوای اسیدهای لینولینیک و لینولئیک اسید با کاربرد تلفیقی بیوچار + نانو اکسید منیزیم در شرایط عدم تنش ثبت شد، در حالی که بالاترین میزان اولئیک اسید در شرایط تنش شوری ۵۰ میلی مولار و با مصرف نانو اکسید منیزیم حاصل

(Ghassemi-Golezani and Farhangi-Abriz, 2021). به‌طور مشابه، پژوهشگران با ارزیابی کاربرد تلفیقی بیوچار + نانوذرات منیزیم در گیاهان عروسک پشت پرده (*Physalis alkekengi L.*) تحت تنش، اظهار داشتند استفاده همزمان از بیوچار و نانوذرات منیزیم از یک‌سو با بهبود دسترسی عناصر غذایی و از سوی دیگر با کاهش تنش اکسیداتیو، به افزایش نسبت اسیدهای چرب غیراشباع و کاهش اسیدهای چرب اشباع منجر شد (Amirfakhrian et al., 2024).

تنش شوری داشت. بیوچار با بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی خاک، جذب مواد مغذی را بهبود می‌بخشد و سنتز اسیدهای چرب غیراشباع را تقویت می‌کند و در نهایت تعادل مناسبی بین اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع ایجاد می‌نماید (Kiani et al., 2024; Seleiman et al., 2019). همچنین، نانواکسید منیزیم با افزایش دسترسی منیزیم در محیط ریشه، به بهبود عملکرد فتوسنتز و افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه و اسیدهای چرب کمک می‌کند (Rehman et al., 2018). علاوه بر این، نانوذرات منیزیم با کاهش تنش اکسیداتیو، پراکسیداسیون لیپیدها را محدود کرده و به حفظ پایداری ترکیبات روغن کمک می‌کنند

جدول ۶- تجزیه واریانس ترکیبات روغن گلرنگ تحت تأثیر تنش شوری و کاربرد تیمارهای کودی

میانگین مربعات						
منابع تغییرات	درجه آزادی	اولئیک اسید	پالمیتیک اسید	استئاریک اسید	لینولنیک اسید	لینولئیک اسید
تنش شوری	۲	۵۴/۸۶**	۲۱/۲۳**	۶/۱۳**	۱۳/۶۷*	۱۰۸۱/۵۷**
تیمارهای کودی	۳	۲/۱۵*	۱/۵۱**	۴/۶۷**	۱/۷۴**	۶۰/۸۳**
تنش × تیمارهای کودی	۶	۰/۱۶۸**	۰/۱۲۸**	۰/۲۴۶*	۰/۰۹۸**	۱۰/۹۲**
خطا	۲۵	۰/۰۱۹	۰/۰۰۵	۰/۰۴۱	۰/۰۰۶	۰/۲۴۹
ضریب تغییرات (%)		۱/۴۳	۱/۲۶	۶/۱۲	۱/۵۸	۰/۹۲۹

^{ns} عدم اختلاف معنی‌دار، ^{**} بیانگر اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد و ^{*} بیانگر اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد

جدول ۷- اثر متقابل تنش شوری و تیمارهای کودی بر ترکیبات روغن گلرنگ

تیمارها	اولئیک اسید	پالمیتیک اسید	استئاریک اسید	لینولنیک اسید	لینولئیک اسید
شاهد	۹/۵۵e	۴/۷۵h	۲/۸۶f	۵/۸۲d	۵۴/۲۴e
بیوچار	۹/۳۸ef	۴/۵۹i	۲/۳۸g	۶/۰۱c	۶۳/۳۸b
نانو اکسید منیزیم	۹/۲۹f	۴/۷۱hi	۲/۲۳g	۶/۳۸b	۶۲/۲۸c
بیوچار + نانو اکسید منیزیم	۹/۰۳g	۳/۹۱j	۱/۷۶h	۶/۸۳a	۶۷/۴۴a
شاهد	۱۱/۲۲d	۶/۴۵d	۴/۴۳ab	۴/۷۱fg	۴۸/۱۴h
بیوچار	۱۲/۱۳b	۵/۵۴f	۳/۵۹cd	۴/۸۳f	۵۲/۹۳fg
نانو اکسید منیزیم	۱۲/۶۷a	۵/۱۳g	۳/۳۵d	۴/۷۹f	۵۳/۴۲ef
بیوچار + نانو اکسید منیزیم	۱۱/۸۸c	۵/۰۳g	۲/۹۹ef	۵/۶۴e	۶۰/۴۲d
شاهد	۶/۹۱k	۷/۸۷a	۴/۷۵a	۳/۵۳j	۳۸/۶۷k
بیوچار	۸/۴۴h	۷/۲۲b	۴/۲۵b	۴/۴۷h	۴۳/۷۵j
نانو اکسید منیزیم	۷/۹۹i	۶/۹۳c	۳/۷۷c	۳/۹۳i	۴۷/۰۷i
بیوچار + نانو اکسید منیزیم	۷/۶۴j	۵/۷۳e	۳/۲۶de	۴/۶۲g	۵۲/۲۹g
LSD 5%	۰/۲۳۴	۰/۱۲۱	۰/۳۴۱	۰/۱۳۸	۰/۸۴۱

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌داری بین داده‌ها در آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

بخشید. این نتایج به وضوح نشان‌دهنده این است که این ترکیب می‌تواند اثرات هم‌افزایی داشته و به‌عنوان یک استراتژی مؤثر در بهبود کیفیت و کمیت گلرنگ تحت تأثیر تنش شوری در نظر گرفته شود. بنابراین، نتایج این مطالعه می‌تواند به بهبود درک مکانیسم‌های آسیب ناشی از تنش شوری، واکنش‌های گیاهان به نانوذرات اکسید منیزیم و بیوجار، و توسعه راهکارهای کارآمد برای افزایش تحمل گیاهان به شوری، بهبود بهره‌وری کشاورزی و کاهش وابستگی به مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی کمک شایانی کند. با این حال، برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود که به مطالعه مکانیزم‌های مولکولی و متابولیکی مرتبط با این ترکیبات تحت تنش شوری توجه شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت، مدیریت پژوهش و فناوری و مدیر آزمایشگاه مرکزی دانشگاه مراغه جهت انجام آزمایشات کیفی تشکر و قدردانی می‌گردد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شوری به‌عنوان یکی از تنش‌های غیرزیستی مهم، تأثیرات منفی جدی بر رشد و عملکرد گلرنگ دارد. با این حال، استفاده از بیوجار و نانوذرات اکسید منیزیم به‌عنوان راهکارهای مدیریتی نوین، می‌تواند به‌طور مؤثری اثرات منفی شوری را کاهش و بهبود قابل توجهی در عملکرد و کیفیت روغن دانه این گیاه ایجاد کند. یافته‌ها حاکی از آن است که کاربرد همزمان بیوجار و نانوذرات اکسید منیزیم، به‌ویژه در شرایط تنش ملایم (۵۰ میلی‌مولار)، موجب افزایش معنی‌داری در ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و فعالیت آنزیم‌های مرتبط با تحمل به استرس اکسیداتیو می‌شود. این بهبود با کاهش سطح مالون‌دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن که به‌عنوان شاخص‌های استرس اکسیداتیو شناخته می‌شوند، تأیید می‌شود. علاوه بر این، استفاده هم‌زمان از بیوجار و نانوذرات اکسید منیزیم نه تنها نقش قابل توجهی در بهبود عملکرد، درصد و عملکرد روغن دانه داشت بلکه کیفیت روغن گلرنگ را با افزایش محتوای اسیدهای چرب غیراشباع بهبود

منابع

- Abd El-Hameid, A. R., & Sadak, M. S. (2020). Impact of glutathione on enhancing sunflower growth and biochemical aspects and yield to alleviate salinity stress. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 29, 101744. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101744>
- Ahmad, M., Rafique, M. I., Akanji, M. A., Al-Wabel, M. I., Al-Swadi, H. A., & Al-Farraj, A. S. (2023). Silica modified biochar mitigates the adverse effects of salt and drought stress and improves safflower (*Carthamus tinctorius* L.) growth. *Journal of Soils and Sediments*, 23(1), 172-192. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03323-8>
- Akbari, G. A., Heshmati, S., Soltani, E., & Amini Dehaghi, M. (2020). Influence of seed priming on seed yield, oil content and fatty acid composition of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) grown under water deficit. *International Journal of Plant Production*, 14, 245-258. <https://doi.org/10.1007/s42106-019-00081-5>
- Alexieva, V., Sergiev, I., Mapelli, S., & Karanov, E. (2001). The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. *Plant, Cell & Environment*, 24(12), 1337-1344.
- Alharbi, K., & Alaklabi, A. (2022). Alleviation of salinity induced growth and photosynthetic decline in wheat due to biochar and jasmonic acid application involves up-regulation of ascorbate-glutathione pathway, glyoxylase system and secondary metabolite accumulation. *Rhizosphere*, 24, 100603. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100603>
- Ali, S., Ulhassan, Z., Ali, S., Kaleem, Z., Yousaf, M. A., Sheteiwy, M. S., & Zhou, W. (2024a). Differential responses of Brassica napus cultivars to dual effects of magnesium oxide nanoparticles. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(8), 12446-12466. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31977-z>
- Ali, S., Ulhassan, Z., Shahbaz, H., Kaleem, Z., Yousaf, M. A., Ali, S., & Zhou, W. (2024b). Application of magnesium oxide nanoparticles as a novel sustainable approach to enhance crop tolerance to abiotic and biotic stresses. *Environmental Science: Nano*, 11(8), 3250-3267. <https://doi.org/10.1039/D4EN00417E>
- Alizadeh, M. M., Gerami, M., Majidian, P., & Ghorbani, H. R. (2024). The potential application of biochar and salicylic acid to alleviate salt stress in soybean (*Glycine max* L.). *Heliyon*, 10(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26677>
- Amirfakhrian, Z., Abdossi, V., Mohammadi Torkashvand, A., Weisany, W., & Ghanbari Jahromi, M. (2024). Co-applied magnesium nanoparticles and biochar modulate salinity stress via regulating yield, biochemical attribute, and fatty acid profile of *Physalis alkekengi* L. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(22), 31806-31817. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33329-3>

- Anand, K. V., Anugraha, A. R., Kannan, M., Singaravelu, G., & Govindaraju, K. (2020). Bio-engineered magnesium oxide nanoparticles as nano-priming agent for enhancing seed germination and seedling vigour of green gram (*Vigna radiata* L.). *Materials Letters*, 271, 127792. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127792>
- Azeem, M., Pirjan, K., Qasim, M., Mahmood, A., Javed, T., Muhammad, H., & Rahimi, M. (2023). Salinity stress improves antioxidant potential by modulating physio-biochemical responses in *Moringa oleifera* Lam. *Scientific Reports*, 13(1), 2895. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29954-6>
- Beauchamp, C., & Fridovich, I. (1971). Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, 44, 276–287.
- Chang, C. C., Yang, M. H., Wen, H. M., & Chern, J. C. (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10(3), 178-182.
- Faiz, S., Yasin, N. A., Khan, W. U., Shah, A. A., Akram, W., Ahmad, A., & Riaz, L. (2022). Role of magnesium oxide nanoparticles in the mitigation of lead-induced stress in *Daucus carota*: modulation in polyamines and antioxidant enzymes. *International Journal of Phytoremediation*, 24(4), 364-372. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1949263>
- Faizan, M., Bhat, J. A., Chen, C., Alyemeni, M. N., Wijaya, L., Ahmad, P., & Yu, F. (2021). Zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) induce salt tolerance by improving the antioxidant system and photosynthetic machinery in tomato. *Plant Physiology and Biochemistry*, 161, 122-130.
- Farhangi-Abriz, S., & Ghassemi-Golezani, K. (2021). Changes in soil properties and salt tolerance of safflower in response to biochar-based metal oxide nanocomposites of magnesium and manganese. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111904. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111904>
- Geng, G., Cakmak, I., Ren, T., Lu, Z., & Lu, J. (2021). Effect of magnesium fertilization on seed yield, seed quality, carbon assimilation and nutrient uptake of rapeseed plants. *Field Crops Research*, 264, 108082. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108082>
- Ghaedi, M., Bijanzadeh, E., Behpouri, A., & Najafi-Ghiri, M. (2024). Biochar application affected biochemical properties, yield and nutrient content of safflower under water stress. *Scientific Reports*, 14(1), 20228.
- Ghassemi-Golezani, K., & Farhangi-Abriz, S. (2018). Changes in oil accumulation and fatty acid composition of soybean seeds under salt stress in response to salicylic acid and jasmonic acid. *Russian Journal of Plant Physiology*, 65, 229-236. <https://doi.org/10.1134/S1021443718020115>
- Ghassemi-Golezani, K., & Farhangi-Abriz, S. (2021). Biochar-based metal oxide nanocomposites of magnesium and manganese improved root development and productivity of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under salt stress. *Rhizosphere*, 19, 100416. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100416>
- Gogna, M., Choudhary, A., Mishra, G., Kapoor, R., & Bhatla, S. C. (2020). Changes in lipid composition in response to salt stress and its possible interaction with intracellular Na⁺-K⁺ ratio in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Environmental and Experimental Botany*, 178, 104147. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104147>
- Hadia, E., Slama, A., Romdhane, L., Cheikh M'Hamed, H., Fahej, M. A. S., & Radhouane, L. (2023). Seed priming of bread wheat varieties with growth regulators and nutrients improves salt stress tolerance particularly for the local genotype. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(1), 304-318. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10548-3>
- Haghaninia, M., Javanmard, A., Kahrizi, D., Bahadori, M. B., & Machiani, M. A. (2024a). Optimizing oil quantity and quality of camelina (*Camelina sativa* L.) with integrative application of chemical, nano and bio-fertilizers under supplementary irrigation and rainfed condition. *Plant Stress*, 11, 100374. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100374>
- Haghaninia, M., Javanmard, A., Radicetti, E., Rasouli, F., Ruiz-Lozano, J. M., & Sabbatini, P. (2024b). Adoption of arbuscular mycorrhizal fungi and biochar for alleviating the agro-physiological response of lavender (*Lavandula angustifolia* L.) subjected to drought stress. *Plant Stress*, 12, 100461. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100461>
- Haghaninia, M., Rasouli, F., Javanmard, A., Mahdavinia, G., Azizi, S., Nicoletti, R., Murariu, O.C., Tallarita, A.V. and Caruso, G., (2024c). Improvement of physiological features and essential oil content of *Thymus vulgaris* after soil amendment with chitosan nanoparticles under chromium toxicity. *Horticulturae*, 10(6), 659. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10060659>
- Hasanuzzaman, M., Raihan, M. R. H., Khojah, E., Samra, B. N., Fujita, M., & Nahar, K. (2021). Biochar and chitosan regulate antioxidant defense and methylglyoxal detoxification systems and enhance salt tolerance in jute (*Corchorus olitorius* L.). *Antioxidants*, 10(12), 2017. <https://doi.org/10.3390/antiox10122017>
- Heath, R.L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125(1), 189-198.
- Helaoui, S., Boughattas, I., Mkhini, M., Ghazouani, H., Jabnoui, H., El Kribi-Boukhris, S., & Banni, M. (2023). Biochar application mitigates salt stress on maize plant: Study of the agronomic parameters,

- photosynthetic activities and biochemical attributes. *Plant Stress*, 9, 100182. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100182>
- Ibrahim, M. E. H., Ali, A. Y. A., Elsiddig, A. M. I., Zhou, G., Nimir, N. E. A., Ahmad, I., & Salih, E. G. I. (2020). Biochar improved sorghum germination and seedling growth under salinity stress. *Agronomy Journal*, 112(2), 911-920. <https://doi.org/10.1002/agj2.20026>
- In ByungChun, I. B., Motomura, S., Inamoto, K., Doi, M., & Mori, G. (2007). Multivariate analysis of relations between preharvest environmental factors, postharvest morphological and physiological factors, and vase life of cut'Asami Red'roses. 66-72.
- Jam, B. J., Shekari, F., Andalibi, B., Fotovat, R., Jafarian, V., Najafi, J., & Mastinu, A. (2023). Impact of silicon foliar application on the growth and physiological traits of *Carthamus tinctorius* L. exposed to salt stress. *Silicon*, 15(3), 1235-1245. <https://doi.org/10.1007/s12633-022-02090-y>
- Khademian, R., Asghari, B., Sedaghati, B., & Yaghoobian, Y. (2019). Plant beneficial rhizospheric microorganisms (PBRMs) mitigate deleterious effects of salinity in sesame (*Sesamum indicum* L.): Physio-biochemical properties, fatty acids composition and secondary metabolites content. *Industrial Crops and Products*, 136, 129-139. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.002>
- Khanchi, S., Hashemi Khabir, S. H., Hashemi Khabir, S. H., Golmoghani Asl, R., & Rahimzadeh, S. (2024). The role of magnesium oxide foliar sprays in enhancing mint (*Mentha crispa* L.) tolerance to cadmium stress. *Scientific Reports*, 14(1), 14823. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65853-0>
- Kiani, H., Khalesro, S., Mokhatssi-Bidgoli, A., & Sharifi, Z. (2024). Biochar and conservation tillage affect the agronomic performance and fatty acid composition of *Nigella sativa* L. under both irrigated and dryland conditions. *Scientific Reports*, 14(1), 2648. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52425-5>
- Liu, Y., Cao, X., Yue, L., Wang, C., Tao, M., Wang, Z., & Xing, B. (2022). Foliar-applied cerium oxide nanomaterials improve maize yield under salinity stress: Reactive oxygen species homeostasis and rhizobacteria regulation. *Environmental Pollution*, 299, 118900. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118900>
- Mahmoud, A. W. M., Samy, M. M., Sany, H., Eid, R. R., Rashad, H. M., & Abdeldaym, E. A. (2022). Nanopotassium, nanosilicon, and biochar applications improve potato salt tolerance by modulating photosynthesis, water status, and biochemical constituents. *Sustainability*, 14(2), 723. <https://doi.org/10.3390/su14020723>
- Mohamed, I. A., Shalby, N., MA El-Badri, A., Saleem, M. H., Khan, M. N., A. Nawaz, M., & Zhou, G. (2020). Stomata and xylem vessels traits improved by melatonin application contribute to enhancing salt tolerance and fatty acid composition of *Brassica napus* L. plants. *Agronomy*, 10(8), 1186. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081186>
- Mukhopadhyay, R., Sarkar, B., Jat, H. S., Sharma, P. C., & Bolan, N. S. (2021). Soil salinity under climate change: Challenges for sustainable agriculture and food security. *Journal of Environmental Management*, 280, 111736. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111736>
- Mustafa, G., Chaudhari, S. K., Manzoor, M., Batool, S., Hatami, M., & Hasan, M. (2024). Zinc oxide nanoparticles mediated salinity stress mitigation in *Pisum sativum*: a physio-biochemical perspective. *BMC Plant Biology*, 24(1), 1-15. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05554-y>
- Najafi-Ghiri, M., Bijanzadeh, E., & Bahadori, F. (2022). Effect of wheat-derived biochar on soil nutrients availability and nutrients uptake by two safflowers (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars under water stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(13), 1592-1606. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2060251>
- Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 22(5): 867-875.
- Nasiri, S., Andalibi, B., Tavakoli, A., Delavar, M. A., El-Keblawy, A., Zwieten, L. V., & Mastinu, A. (2023). The Mineral Biochar Alters the Biochemical and Microbial Properties of the Soil and the Grain Yield of *Hordeum vulgare* L. under Drought Stress. *Land*, 12(3), 559. <https://doi.org/10.3390/land12030559>
- Noreen, S., Sultan, M., Akhter, M. S., Shah, K. H., Ummara, U., Manzoor, H., & Ahmad, P. (2021). Foliar fertigation of ascorbic acid and zinc improves growth, antioxidant enzyme activity and harvest index in barley (*Hordeum vulgare* L.) grown under salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158, 244-254. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.007>
- Ojagh, S. E., & Moaveni, P. (2022). Foliar-applied magnesium nanoparticles modulate drought stress through changes in physio-biochemical attributes and essential oil profile of yarrow (*Achillea millefolium* L.). *Environmental Science and Pollution Research*, 29(39), 59374-59384. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19559-3>
- Rehman, H., Alharby, H. F., Alzahrani, Y., & Rady, M. M. (2018). Magnesium and organic biostimulant integrative application induces physiological and biochemical changes in sunflower plants and its harvested progeny on sandy soil. *Plant Physiology and Biochemistry*, 126, 97-105. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.02.031>

- Seleiman, M. F., Refay, Y., Al-Suhaibani, N., Al-Ashkar, I., El-Hendawy, S., & Hafez, E. M. (2019). Integrative effects of rice-straw biochar and silicon on oil and seed quality, yield and physiological traits of *Helianthus annuus* L. grown under water deficit stress. *Agronomy*, 9(10), 637.
- Shaki, F., Maboud, H. E., & Niknam, V. (2018). Growth enhancement and salt tolerance of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.), by salicylic acid. *Current Plant Biology*, 13, 16-22. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2018.04.001>
- Shaki, F., Maboud, H. E., & Niknam, V. (2019). Effects of salicylic acid on hormonal cross talk, fatty acids profile, and ions homeostasis from salt-stressed safflower. *Journal of plant Interactions*, 14(1), 340-346. <https://doi.org/10.1080/17429145.2019.1635660>
- Sharavdorj, K., Byambadorj, S. O., Jang, Y., & Cho, J. W. (2022). Application of magnesium and calcium sulfate on growth and physiology of forage crops under long-term salinity stress. *Plants*, 11(24), 3576. <https://doi.org/10.3390/plants11243576>.
- Shukla, K., Khanam, R., Biswas, J. K., & Srivastava, S. (2023). Zinc oxide nanoparticles in combination with biochar alleviate arsenic accumulation in field grown rice (*Oryza sativa* L.) crop. *Rhizosphere*, 27, 100764. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100764>
- Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144-158. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>
- Soliman, M. H., Alnusairi, G. S., Khan, A. A., Alnusaire, T. S., Fakh, M. A., Abdulmajeed, A. M., & Najeeb, U. (2023). Biochar and selenium nanoparticles induce water transporter genes for sustaining carbon assimilation and grain production in salt-stressed wheat. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(3), 1522-1543. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10636-y>
- Sotoodehnia-Korani, S., Iranbakhsh, A., Ebadi, M., Majd, A., & Oraghi-Ardebili, Z. (2023). Efficacy of magnesium nanoparticles in modifying growth, antioxidant activity, nitrogen status, and expression of wrky1 and bzip transcription factors in pepper (*Capsicum annuum*); an in vitro biological assessment. *Russian Journal of Plant Physiology*, 70(3), 39. <https://doi.org/10.1134/S1021443723600186>
- Wang, Z., Hassan, M. U., Nadeem, F., Wu, L., Zhang, F., & Li, X. (2020). Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: a meta-analysis. *Frontiers in plant science*, 10, 495191. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01727>
- Wu, Y., Wang, X., Zhang, L., Zheng, Y., Liu, X., & Zhang, Y. (2023). The critical role of biochar to mitigate the adverse impacts of drought and salinity stress in plants. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1163451. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1163451>
- Yasmin, H., Mazher, J., Azmat, A., Nosheen, A., Naz, R., Hassan, M. N., & Ahmad, P. (2021). Combined application of zinc oxide nanoparticles and biofertilizer to induce salt resistance in safflower by regulating ion homeostasis and antioxidant defence responses. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 218, 112262. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112262>
- Zhang, Y., Ding, J., Wang, H., Su, L., & Zhao, C. (2020). Biochar addition alleviate the negative effects of drought and salinity stress on soybean productivity and water use efficiency. *BMC Plant Biology*, 20, 1-11. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02493-2>