Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Crop Breeding Vol. 16, Issue 3, 2024 p: 91-103

OPEN ACCESS

Research Paper

Effects of $ZnSO_4$ and Fe_2O_3 Nanoparticles of Lentil (*Lens culinaris* Medik.) on the Antioxidant System, Agronomic, Physiologic, and Root Characteristics under Drought Stress

Mojhgan Tabrizivand Taheri[1] and Amin Abbasi[2]

1- Assistant Professor, Dryland Agricultural Research Institute (DARI), Agricultural Research Education and Extension (AREEO), Maragheh, Iran, (Corresponding author: tabrizivand@gmail.com)
2- Associate Professor, Agriculture Faculty, Maragheh University, Maragheh, Iran

Received: 30 December, 2023 Accepted: 16 March, 2024

Extended Abstract

Background: Lentil (*Lens culinaris* Medik.) is one of the main food legume crops in Iran, where it is grown as a rainfed crop in spring in cold regions. One of the obstacles of spring cultivation in cold regions is drought stress exposure at the end of the growing season in the late cultivation date, which dramatically increases null pods and decreases seed yield. Until introducing autumn cultivation, specific, and cold-tolerant lentil varieties, the only solution for this problem is to find ways to deal with the damage of drought stress. Nanotechnology serves as a precursor of the new industrial revolution that has the potential to bring alteration in agricultural production. Nanoparticles (NPs) have been applied for enhancing seed germination, growth, physiology, productivity, and quality traits of various crops under normal or stressful conditions. Therefore, to reduce the negative effect of drought stress at dryland conditions in late cultivations, the effect of $ZnSO_4$ and Fe_2O_3 NPs at 0.5% and 1% were studied on the agronomic, physiologic, root traits, and antioxidant system of lentils in the cold region.

Methods: A field study was carried out at the Dryland Agricultural Research Center (DARI) in Maragheh during the 2019-2020 growing season. Experiments were conducted in rainfed conditions using a complete block design with three replications. Treatments were no spray, 0.5% nano $ZnSO_4$, 1% nano $ZnSO_4$, 0.5% $ZnSO_4$, 1% $ZnSO_4$, 0.5% nano Fe_2O_3, 1% nano Fe_2O_3, 0.5% Fe_2O_3, and 1% Fe_2O_3. Treatments were applied at two stages (10 days after the plant first establishment and 50% of flowering) in the early morning and not on windy days. The Bilesavar variety, which is suitable for spring cultivation in cold regions, was used in this experiment. Plant height, relative water content (RWC), cell membrane stability (CMS), canopy temperature, and the normalized difference in the vegetative index (NDVI) were recorded during the growing season. The seed yield and 100 seed weight (HSW) were calculated after harvesting. The activity of ascorbate peroxidase (ASP), catalase (CAT), glutathione peroxidase (GPX), superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POX), and the contents of proline, chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids were calculated in gathered leaf samples during the growing season.

Results: Differences between treatments were significant for RWC, CMS, canopy temperature, NDVI, and seed yield at 1%, and for HSW at 0.5%. The highest seed weight was observed in using nano Fe_2O_3 0.5%, and the lowest belonged to no spray treatment. The lowest RWC, CMS, and the highest canopy temperature were recorded in no spray treatment. Analysis of variance results showed that differences between treatments for all biochemical traits were significant at the 1% level. Chlorophylls a and b contents increased using NPs, and the highest level belonged to 1% nano $ZnSO_4$ treatment and as expected the lowest calculated in no spray treatments. The highest carotenoids, and the activities CAT, ASP, GPX, and SOD were observed in 1% nano $ZnSO_4$ treatment. The lowest activity of these enzymes as well as the highest H_2O_2, proline, and malondialdehyde (MDA) belonged to no spray treatment. According to the results, seed yield was significantly correlated with CAT (0.81), GPX (0.88), SOD (0.80), H_2O_2 (-0.82), MDA (-0.90), proline (-0.89), chlorophyll a (0.83), chlorophyll b (0.64), carotenoids (0.74), HSW, (0.50), NDVI (0.86), canopy temperature (-0.76), RWC (0.84), and CMS (0.95) at the 1% level. The highest

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jcb.16.3.91]

Copyright ©2024 Tabrizivand Taheri and Abbasi. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License which allows users to read, copy, distribute and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

root length was respectively measured in 1% nano $ZnSO_4$, 0.5% nano $ZnSO_4$, 0.5% nano Fe_2O_3, and 1% nano Fe_2O_3. NPs had no effect on average diameter while applying 1% Fe_2O_3 led to the highest effect on the root volume. Root surface showed the highest increase by using 1% nano Fe_2O_3, 0.5% nano $ZnSO_4$, and 0.5% nano $ZnSO_4$. The highest root length belonged to 1% nano $ZnSO_4$ and 0.5% nano $ZnSO_4$ while this trait was lowermost in no spray treatment.

Conclusion: According to the results, 1% Fe_2O_3 exerted the highest effect on agronomic and physiological traits while 0.5% $ZnSO_4$ was effective on the antioxidant system, and $ZnSO_4$ NPs positively affected the root length and average diameter. While Fe_2O_3 NPs were effective in improving the root surface area and volume.

Keywords: Cold Region, Enzyme, Legumes, Oxidative Stress, Yield

How to Cite This Article: Tabrizivand Taheri, M., & Abbasi, A. (2024). Effects of ZnSO4 and Fe2O3 Nanoparticles of Lentil (*Lens* culinaris Medik.) on the Antioxidant System, Agronomic, Physiologic, and Root Characteristics under Drought Stress. *J Crop Breed,* 16(3), 91-103. DOI: 10.61186/jcb.16.3.91

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jcb.16.3.91]

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

مقاله پژوهشی

تاثیر محلول‌پاشی نانو ذرات سولفات روی و اکسید آهن بر سیستم آنتی‌اکسیدانی، خصوصیات زراعی، فیزیولوژیکی و ریشه در عدس (*Lens culinaris* Medik.) تحت شرایط دیم

مژگان تبریزی‌وند طاهری[1] و امین عباسی[2]

۱- استادیار، مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، مراغه، ایران، (نویسنده مسوول: tabrizivand@gmail.com)
۲- دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶
صفحه: ۹۱ تا ۱۰۳

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: عدس (*Lens culinaris* Medik.) یکی از مهم‌ترین گیاهان خانواده حبوبات در ایران است که در مناطق سردسیر به‌صورت دیم و بهاره کشت می‌شود. اما یکی از عوامل بازدارنده کشت بهاره عدس در مناطق سردسیر صدمات ناشی از تنش خشکی آخر فصل در نتیجه کشت دیرهنگام است که منجر به افزایش تعداد غلاف پوک و کاهش قابل‌توجهی در عملکرد می‌شود. تا زمانی‌که رقم مناسب کشت پاییزه و متحمل به سرما معرفی نشده تنها راه‌حل برای این مشکل، یافتن روش‌هایی برای مقابله با خسارت تنش خشکی می‌باشد. نانوتکنولوژی پیشرو انقلاب صنعتی جدید است و پتانسیل ایجاد تغییر در تولیدات کشاورزی را دارد. ذرات نانو برای افزایش قدرت جوانه‌زنی، رشد، بهره‌وری ویژگی‌های کیفی محصولات در شرایط نرمال و تنش به‌کار می‌روند. بنابراین، جهت کاهش اثرات سوء ناشی از تنش خشکی در عملکرد گیاه عدس در شرایط دیم، تأثیر ترکیبات سولفات روی و اکسید آهن، نانوذرات سولفات روی و اکسید آهن در دو سطح ۰/۵ درصد و ۱ درصد بر خصوصیات زراعی، فیزیولوژیکی، سیستم آنتی‌اکسیدانی و خصوصیات ریشه در عدس مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: آزمایش مزرعه‌ای در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ در مؤسسه تحقیقات دیم کشور- شهر مراغه در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل شاهد (عدم کاربرد)، ۰/۵ درصد نانو سولفات روی، ۱ درصد نانو سولفات روی، ۰/۵ درصد سولفات روی، ۱ درصد سولفات روی، ۰/۵ درصد نانو اکسید آهن، ۱ درصد نانو اکسید آهن، ۰/۵ درصد اکسید آهن و ۱ درصد اکسید آهن بود. در این آزمایش از رقم بیله‌سوار که مناسب کشت بهاره مناطق سردسیر دیم است استفاده شد. محلول‌پاشی در دو نوبت (۱۰ روز پس از استقرار گیاهچه و ۵۰ درصد گلدهی) در ساعات اولیه صبح انجام شد. صفات ارتفاع بوته، محتوای رطوبت نسبی برگ، پایداری غشای سلولی، دمای کانوپی شاخص نرمال شده پوشش گیاهی در طول فصل رشد و صفات وزن صد دانه و عملکرد پس از برداشت اندازه‌گیری شد. در طول فصل زراعی پس از تهیه نمونه برگی میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز، گلوتاتیوتن پراکسیداز، سوپر اکسید دیسموتاز، پراکسیداز و غلظت پرولین، کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئیدها محاسبه شد.

یافته‌ها: بین تیمارها از نظر محتوای رطوبت نسبی، پایداری غشای سلولی، دمای کانوپی، شاخص NDVI و عملکرد اختلاف معنی‌داری در سطح ۱ درصد و برای وزن صد دانه اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد مشاهده شد. بیشترین وزن صد دانه در اعمال تیمار نانو اکسید آهن ۰/۵ درصد، پایین‌ترین محتوای رطوبت نسبی و پایداری غشای سلولی، بالاترین دمای کانوپی در تیمار عدم محلول‌پاشی مشاهده شد. نتایج تجزیه واریانس صفات بیوشیمیایی نشان داد که بین تیمارها از نظر تمام صفات اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد وجود دارد. میزان کلروفیل a و b در نتیجه محلول‌پاشی نانوذرات افزایش یافته و بالاترین مقدار مربوط به اعمال تیمار نانو سولفات روی بود. بالاترین مقدار کارتنوئید و بالاترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز در تیمار نانو سولفات روی ۱ درصد مشاهده شد. بالاترین میزان پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید در تیمار عدم محلول‌پاشی مشاهده شد. میزان کلروفیل a و b در تیمار نانو سولفات روی ۱٪ بیشترین میزان را داشتند. همان‌طور که انتظار می‌رفت کمترین مقدار در تیمار عدم محلول‌پاشی مشاهده شد. بالاترین میزان کارتنوئید، بیشترین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز در تیمار نانو سولفات روی ۱ درصد مشاهده شد. پائین‌ترین سطح فعالیت این آنزیم‌ها در شرایط عدم محلول‌پاشی محاسبه گردید. بیشترین مقدار پرولین، پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید نیز در تیمار عدم محلول‌پاشی مشاهده شد. بر اساس نتایج، عملکرد با میزان فعالیت آنزیم کاتالاز (۰/۸۱)، گلوتاتیون پراکسیداز (۰/۸۸)، سوپراکسید دیسموتاز (۰/۸۰)، پراکسید هیدروژن (۰/۸۲-)، مالون دی‌آلدئید (۰/۹۰-)، پرولین (۰/۸۹-)، کلروفیل a (۰/۸۳)، کلروفیل b (۰/۶۴)، کارتنوئیدها (۰/۷۴)، وزن صد دانه (۰/۵۰)، شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (۰/۸۶)، دمای کانوپی (۰/۷۶-)، محتوای رطوبت نسبی (۰/۸۴) و پایداری غشای سلولی (۰/۹۵) همبستگی معنی‌دار در سطح یک درصد داشت. بالاترین طول ریشه به‌ترتیب در محلول پاشی نانو سولفات روی ۱ درصد، نانو سولفات روی ۰/۵ درصد، نانو اکسید آهن ۰/۵ درصد و نانو اکسید آهن ۱ درصد مشاهده شد. کاربرد نانو ذرات تأثیری بر افزایش قطر ریشه نداشته است. در حالی‌که کابرد نانواکسید آهن ۱ درصد بیشترین تأثیر را در حجم ریشه داشت. سطح ریشه بیشترین افزایش را با به‌کارگیری نانو اکسید آهن ۱ درصد، نانو اکسید آهن ۰/۵ درصد و نانو سولفات روی ۰/۵ درصد داشت. بیشترین طول ریشه عدس به‌ترتیب در تیمارهای نانوسولفات روی ۱ درصد و نانو سولفات روی ۰/۵ درصد و کمترین طول ریشه در شرایط عدم محلول‌پاشی مشاهده شد. بالاترین سطح ریشه در نانو اکسید آهن ۱ درصد و ۰/۵ درصد و سپس در نانو سولفات روی ۰/۵ درصد و ۱ درصد مشاهده شد. بیشترین حجم ریشه در نتیجه اعمال نانو اکسید آهن ۱ درصد حاصل شد.

نتیجه‌گیری: براساس نتایج، نانو اکسید آهن ۱ درصد بیشترین تأثیر را بر صفات زراعی و فیزیولوژیکی داشت. در حالی‌که نانو سولفات روی ۰/۵ درصد بر سیستم آنتی‌اکسیدانی مؤثر بود. صفات ریشه‌ای مطلوب در بهره‌وری از مواد مغذی و منبع آب در خاک مؤثر می‌باشد. در این مطالعه مشاهده شد که نانو ذرات سولفات روی اثر مثبت بر روی طول و قطر متوسط ریشه دارد. در حالی‌که نانو ذرات اکسید آهن در بهبود سطح و حجم ریشه مؤثر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آنزیم، اقلیم سردسیر، تنش اکسیداتیو، حبوبات، عملکرد

مقدمه

عدس گیاهی دیپلوئید (2n=2x=14) و خودگشن از خانواده حبوبات است که دارای ۳۵-۲۲ درصد پروتئین بوده و به‌عنوان پروتئین فقرا شناخته می‌شود (Ninou *et al.*, 2019). علاوه بر پروتئین، دانه این گیاه از نظر کربوهیدرات‌ها، مواد معدنی، ویتامین‌ها و فیبر نیز غنی می‌باشد. باکتری‌های تثبیت کننده موجود در ریشه این گیاه باعث تثبیت زیستی نیتروژن می‌شوند (Kumar, 2015).

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jcb.16.3.91]

عدس یکی از محصولات مهم در نظام‌های زراعی مناطق خشک و دیم‌زارهای کشور است که به‌واسطه کوتاهی دوره رشد، توانایی رشد و نمو در شرایط نامناسب محیطی را دارد (Amiri *et al*., 2021). بیشترین سطح زیر کشت گیاه عدس در مناطق سردسیر به‌صورت بهاره است. اما به‌دلیل رطوبت زیاد مزرعه در اسفند ماه و عدم امکان ورود ماشین‌آلات به مزرعه جهت آماده‌سازی زمین در اغلب سال‌ها، کشت عدس در مناطق سردسیر تا فروردین ماه به تأخیر می‌افتد (Sedaghatkhani *et al*., 2011). در مناطق دیم کشور گل‌دهی از ۱۵ اردیبهشت شروع می‌شود. بیشترین نیاز آبی گیاه عدس در مرحله گل‌دهی و غلاف‌بندی است. در مناطق سردسیر اغلب سال‌ها در نیمه دوم اردیبهشت ریزش باران‌های مؤثر اتفاق نمی‌افتد. عدم ریزش بارندگی در نیمه دوم اردیبهشت و خرداد که مصادف با مرحله گل‌دهی و غلاف‌دهی گیاه عدس است، موجب وارد شدن تنش خشکی به گیاه شده و با افزایش گرمای آخر فصل، اثرات تنش خشکی مضاعف می‌گردد (Tabrizivand Taheri *et al*., 2024). نانو ذرات به‌عنوان ابزارهای اساسی در مقابله با چالش تغییرات اقلیمی پیش رو می‌باشند. اخیراً نانو ذرات جهت تقویت جوانه‌زنی، رشد، بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی، تولید و کیفیت محصولات زراعی مختلف در شرایط تنش به‌کار رفته است (Maswada *et al*., 2020; Semida *et al*., 2021; Pandy *et al*., 2010). تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه کاربرد نانوذرات در افزایش عملکرد و مقابله با تنش‌ها انجام شده است (Li *et al*., 2016).

میکروالمنت روی (Zn) در تحمل گیاهان به تنش خشکی از طریق تنظیم مکانیسم‌های فیزیولوژیکی و مولکولی نقش مهمی را ایفا می‌کند. کاربرد این عنصر در شرایط تنش خشکی، باعث بهبود وضعیت جوانه‌زنی، رابطه آب و گیاه، پایداری غشای سلولی، تنظیم اسمزی، کارایی مصرف آب و فتوسنتز و در نهایت افزایش عملکرد گیاه می‌شود (Umair Hassan *et al*., 2020). حسن و همکاران (Hassan *et al*., 2019) گزارش کردند که پرایمینگ بذر با عنصر روی، همراه با محلول‌پاشی و ترکیب با خاک، باعث افزایش عملکرد و محتوای روی در دانه گندم شده است. آهن از عناصر تاثیرگذار بر رشد گیاه از طریق فرآیندهای فیزیولوژیکی از قبیل فتوسنتز، اکسایش، تبخیر می‌باشد و کمبود آن منجر به کاهش شدید عملکرد می‌شود (Pawar *et al*., 2019). با کاربرد آهن و روی، پاسخ‌های مختلفی در گیاهان مشاهده است (Abdel salam 2018., Farooqui *et al*., 2016., Sabaghnia 2014., Mahdieh *et al*., 2018). کاربرد نانو ذرات باعث بهبود خصوصیات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان از طریق تأثیر بر سنتز آنزیم‌های پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز، افزایش جذب مواد معدنی، جلوگیری از کاهش الکترولیت‌ها، افزایش پروتئین‌های محلول، کاهش فرآیند پراکسیدازی و کاهش در سطح پرولین و گلوتاتیون می‌شود و در نتیجه باعث افزایش تحمل گیاهان به تنش خشکی می‌شود (Li *et al*., 2016). کریمی و همکاران (Karimi *et al*., 2014) تأثیر نانو کلات آهن و کلات آهن را بر روی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ماش مطالعه کردند. نتایج نشان داد که کاربرد نانوکلات آهن باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز و کاتالاز می‌شود. عبدالسلام (Abdelsalam, 2018) با استفاده از کاربرد نانو اکسید آهن بر باقلا، گزارش کرد که این حالت نانو این ترکیب باعث افزایش ارتفاع بوته، تعداد غلاف، عملکرد و جذب آهن، نیتروژن فسفر می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر، کاربرد نانو اکسید آهن به‌صورت محلول‌پاشی و خاک کاربرد مقایسه شد. براساس نتایج، کاربرد نانوذرات به‌صورت محلول‌پاشی مؤثرتر بود (Alidoust and Isoda 2013).

تورز و همکاران (Torres *et al*., 2021) تأثیر نانو ذرات سولفات روی و اکسید روی را بر روی صفات فیزیولوژیکی گشنیز بررسی کردند. نتایج نشان داد نانو ذرات سولفات روی در افزایش فعالیت کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و پراکسیداز تأثیر بیشتری دارد. در پژوهشی گزارش شد که کاربرد اکسید روی به شکل نانو ذرات تأثیر بیشتری در افزایش رشد ریشه نخود نسبت به شکل معمول آن دارد (Pandy *et al*., 2010). جهان‌آرای و همکاران (Jahanaray *et al*., 2013) تأثیر محلول‌پاشی نانو کامپوزیت آهن بر عملکرد و اجزای آن‌را در لوبیا بررسی کردند. براساس نتایج مشاهده شده محلول‌پاشی نانو کامپوزیت آهن موجب افزایش عملکرد در ژنوتیپ‌های صدری، خمین و محلی گیلان شد. اما در مورد ژنوتیپ تلاش این نتیجه عکس بود. حمزه‌ئی و همکاران (Hamzei *et al*., 2014) اثر محلول‌پاشی نانوکلات آهن و تلقیح باکتری مزوریزوبیوم بر گره‌زایی ریشه و رشد عملکرد نخود در شرایط دیم را بررسی کردند و نتایج بیانگر این بود که تلقیح بذر نخود با باکتری مزوریزوبیوم و محلول پاشی نانو کلات آهن در مرحله گلدهی و یا گلدهی + غلاف‌دهی، بیشترین میزان گره‌زایی ریشه شاخص‌های زراعی و عملکرد دانه را ایجاد کرد. مکاریان و همکاران (Makkarian *et al*., 2017) تاثیر تغذیه برگی میکرو و نانو ذرات عنصر روی بر برخی صفات رشدی و کیفی ماش در شرایط تنش خشکی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که محلول‌پاشی عنصر روی محتوای پرولین و عملکرد بیولوژیک دانه را در حالت تنش خشکی به‌طور معنی‌داری افزایش داد و همین‌طور محلول‌پاشی عنصر روی به‌صورت نانو ذره نسبت به اکسید روی معمولی تأثیر بیشتری بر کاهش اثرات تنش خشکی در گیاه ماش نشان داد. محمدی و همکاران (Mohammadi *et al*., 2018) تأثیر نانو سولفات روی و نانو اکسید آهن را بر روی صفات فیزیولوژیکی در نعناع مطالعه کردند. نتایج نشان دهنده تأثیر این ترکیبات در بهبود عملکرد، میزان کلروفیل کل و میزان روغن بود. قندالی و همکاران (Ghandali *et al*., 2017) کاربرد ترکیبات نانو ذرات روی را بر عملکرد لوبیا چشم بلبلی در شرایط تنش مطالعه کردند. نتایج نشان دهنده افزایش عملکرد در مقایسه با شاهد بود.

در رابطه با تاثیر نانوذرات بر سیستم آنتی‌اکسیدانی و ریشه‌ای عدس در شرایط دیم مطالعات اندکی وجود دارد. بنابراین، این آزمایش با هدف بررسی تاثیر کاربرد نانوذرات اکسید آهن و سولفات روی بر خصوصیات بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی، زراعی و ریشه در رقم بیله‌سوار تحت شرایط دیم انجام گرفت.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jcb.16.3.91]

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و آزمایش مزرعه‌ای

آزمایش مزرعه‌ای در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ در ایستگاه موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور- مراغه در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارها شامل شاهد (عدم کاربرد)، ۰/۵ درصد نانو سولفات روی، ۱ درصد نانو سولفات روی، ۰/۵ درصد سولفات روی، ۱ درصد سولفات روی، ۰/۵ درصد نانو اکسید آهن، ۱ درصد نانو اکسید آهن، ۰/۵ درصد اکسید آهن و ۱ درصد اکسید آهن بود. بذور رقم بیله‌سوار کشت گردید. هر کرت آزمایشی شامل سه خط سه‌متری بود. بین ردیف‌ها جهت سهولت اعمال تیمارها فاصله ۶۰ سانتی‌متری در نظر گرفته شد. محلول‌پاشی در دو نوبت (۱۰ روز پس از استقرار گیاهچه و ۵۰ درصد گلدهی) در ساعات اولیه صبح انجام شد. صفات تعداد روز تا ۵۰ درصد گلدهی، زمان رسیدگی، ارتفاع بوته، دمای کانوپی، وزن صد دانه، عملکرد، محتوای رطوبت نسبی (RWC)[1]، پایداری غشای سلولی (CMS)[2] و شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)[3] یادداشت و اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایش خاک محل اجرای آزمایش در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 1. Physicochemical properties of the soil at the experiment site

pH	N% نیتروژن	P فسفر	K پتاسیم	Zn روی	Fe آهن	EC هدایت الکتریکی	Texture بافت	Clay% رس	Sand% ماسه	Silt% سیلت
		(mg/kg)				(dS/m)				
7.8	0.14	10.1	661	0.9	5.4	0.71	Loam لوم	17	40	43

شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)

با استفاده از دستگاه Green seeker (Trimbel, USA) در دو مرحله (گلدهی و پر شدن غلاف) اندازه‌گیری شد.

محتوای رطوبت نسبی (RWC): در دو مرحله گلدهی و پر شدن غلاف، نمونه‌های برگی به‌تعداد ۵ تا ۶ برگ مرکب از قسمت انتهایی بوته جمع‌آوری و در داخل یخ پودر شده به آزمایشگاه منتقل و تا زمان آزمایش در یخدان یونولیتی نگه‌داری شد. وزن تر نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و سپس به‌مدت ۲۴ ساعت در داخل آب قرار داده شد و وزن پس از آماس برگ مجدداً اندازه‌گیری شد. این برگ‌ها به‌مدت یک هفته در آون ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و وزن خشک آن‌ها تعیین شد (Unyayar *et al*., 2005). به‌منظور محاسبه محتوای رطوبت نسبی از فرمول زیر استفاده شد:

محتوای رطوبت نسبی = (وزن تر برگ- وزن خشک برگ/ وزن برگ پس از آماس – وزن خشک برگ) ×۱۰۰

پایداری غشای سلولی (CMS): در دو مرحله گلدهی و پر شدن غلاف، نمونه‌های برگی از قسمت انتهایی بوته به تعداد ۵ تا ۶ برگ مرکب جمع‌آوری و در داخل یخ پودر شده به آزمایشگاه منتقل و تا زمان آزمایش در یخدان یونولیتی نگه‌داری شد. پس از شستشو با آب دیونیزه، به‌صورت دیسک‌های کوچک تقسیم و در تیوپ‌ها قرار داده شدند. پس از نگه‌داری در آب گرم به‌مدت ۳۰ دقیقه، هدایت الکتریکی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد (C_1). نمونه‌ها مجدداً به‌مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه قرار داده شد و هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شد (C_2). در نهایت شاخص پایداری غشای سلولی از طریق فرمول زیر محاسبه شد:

پایداری غشای سلولی = $(1- C_1/ C_2) \times 100$

محاسبات بیوشیمیایی: بدین‌منظور نمونه‌های برگی تازه از قسمت انتهایی بوته به تعداد ۸ تا ۱۰ برگ مرکب جمع‌آوری و در داخل فلاسک حاوی ازت مایع به آزمایشگاه منتقل و تا زمان آزمایش در تانک ازت مایع نگه‌داری شد. برای استخراج آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و گلوتاتیون پراکسیداز ۰/۵ گرم از بافت برگی در بافر ۰/۱ مولار فسفات (pH=7.5) و ۰/۵ میلی‌مولار EDTA قرار گرفت و تیوپ‌ها به‌مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ گردید (Janmohammadi, 2012). فعالیت آنزیم کاتالاز براساس روش ابی (Abei, 1984) محاسبه شد. بدین‌منظور ۳ میلی‌لیتر مخلوط واکنش، شامل ۱/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=7)، ۰/۵ میلی‌لیتر H_2O_2 ۷۵ میلی‌مولار، ۰/۰۵ میلی‌لیتر آنزیم استخراج شده و آب دیونیزه تا رسیدن به ۳ میلی‌لیتر تهیه شد. واکنش با H_2O_2 آغاز شد میزان فعالیت آنزیم از طریق محاسبه تجزیه H_2O_2 و از طریق روش لورتو و ولیکووا (Loreto & Velikova, 2001) محاسبه شد. فعالیت سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز براساس روش کاکماک و مارشنر (Cakmak & Marschner, 1992) محاسبه شد. میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئیدها براساس روش لیچتنتالر (Lichtenthaler, 1987) و با استفاده از اسپکتروفوتومتر محاسبه شد.

دمای کانوپی: با استفاده از دماسنج مادون قرمز (Top/ TPGC-100) در ظهر و روز بدون وزش باد اندازه‌گیری شد.

در نهایت تجزیه واریانس صفات پس از آزمون مفروضات تجزیه واریانس توسط نرم‌افزار GenStat محاسبه گردید و کمترین اختلاف معنی‌دار (LSD) محاسبه شد.

آنالیز ریشه: صفات مربوط به ریشه مثل طول، میانگین قطر، سطح و حجم با استفاده از نرم‌افزار Rhizo Vision Explorer (2.0.3) محاسبه گردید. از هر تیمار در هر تکرار ۵ بوته انتخاب گردید. به این‌صورت که در مزرعه پای بوته کاملاً آبیاری شد تا اینکه خروج ریشه از خاک با سهولت انجام شود. سپس با کمک بیل و به‌صورت حفر عمیق ریشه بوته خارج شد. در داخل سطل پر از آب قرار گرفت تا گل و خاک اضافی شستشو شود و سپس به آزمایشگاه منتقل گردید. به‌منظور پراکنده شدن ریشه اصلی و ریشه‌های جانبی و فراهم شدن امکان تصویربرداری صحیح از محلول هگزا متا فسفات سدیم استفاده شد.

1- Relative Water Content 2- Cell Membrane Stability 3- The normalized difference in the vegetative index

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jcb.16.3.91]

نتایج و بحث

صفات زراعی و فیزیولوژیکی

با توجه به نتایج جدول ۲، بین تیمارها از نظر محتوای رطوبت نسبی، پایداری غشای سلولی، دمای کانوپی، شاخص NDVI و عملکرد اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد و برای وزن صد دانه اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد مشاهده شد. بیشترین ضریب تغییرات در شاخص نرمال شده پوشش گیاهی مشاهده گردید. بیشترین وزن صد دانه در اعمال تیمار نانو اکسید آهن ۰/۵ درصد و ۱ درصد با ۵/۱ گرم مشاهده شد. کمترین وزن صد دانه در تیمار عدم محلول‌پاشی ثبت شد. بین تیمارها از نظر ارتفاع بوته تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. میانگین کلی ارتفاع بوته در این آزمایش برابر ۲۱/۵ سانتی‌متر بود. کمترین ارتفاع به‌ترتیب در تیمار عدم محلول‌پاشی، نانو سولفات روی ۱ درصد و نانو سولفات روی ۰/۵ درصد مشاهده شد.

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات زراعی و فیزیولوژیکی

Table 2. Analysis of variance for agronomic and physiological traits

S.O.V منابع تغییر	df درجه آزادی	100sw وزن صددانه	PH ارتفاع بوته	RWC محتوای رطوبت نسبی	CMS پایداری غشای سلولی	Canopy Temp دمای کانوپی	NDVI شاخص نرمال شده پوش گیاهی	Yield عملکرد
Rep (تکرار)	2	0.10	2.7	0.02	0.008	7.40	0.002	3407.9
Treat (تیمار)	8	0.014*	0.175ns	0.011**	0.02**	20.28**	0.011**	28952.6**
Error (خطا)	16	0.005	0.12	0.0004	0.0004	1.95	0.0004	192.2
CV% (ضریب تغییرات)		1.43	1.61	2.82	3.52	4	5.37	3.87

ns، * و **: به ترتیب غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد

ns, * and ** respectively non- significant, significant at 5% and 1% level

تنش خشکی فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به‌طوری‌که با افزایش دمای کانوپی و برگ، محتوای آب در گیاه را کاهش داده و باعث کاهش رطوبت برگ و کاهش رطوبت نسبی، کاهش هدایت روزنه‌ای و سرعت تعرق می‌شود که در آزمایش حاضر نیز تائید شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، پائین‌ترین محتوای رطوبت نسبی و بالاترین دمای کانوپی در تیمار عدم محلول‌پاشی یادداشت شده است. در حالی‌که محلول‌پاشی نانو اکسید آهن یک درصد، باعث استحصال بالاترین میزان رطوبت نسبی و کمترین دمای کانوپی شده است. افزایش میزان رطوبت نسبی با به‌کارگیری نانوذرات در سایر گیاهان نیز گزارش شده است (Behboudi *et al*., 2019., Burman *et al*., 2013., Semida *et al*., 2021). در واقع گیاهان سالم نسبت به گیاهان آسیب‌دیده، میزان بالایی از نور قرمز را جذب کرده و همچنین نور مادون قرمز را منعکس می‌کنند و به‌همین دلیل است که شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) بالاتری دارند (Singh Duhan *et al*., 2017). در این آزمایش نیز بالاترین مقدار شاخص نرمال شده پوشش گیاهی در تیمار نانو اکسید آهن یک درصد یادداشت شد.

جدول ۳- میانگین صفات زراعی و فیزیولوژیکی

Table 3. Means of agronomic and physiological traits

NO شماره	100sw (gr) وزن صددانه (گرم)	PH (cm) ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	RWC محتوای رطوبت نسبی	CMS پایداری غشای سلولی	Canopy Temperature دمای کانوپی	NDVI شاخص نرمال شده پوشش گیاهی	Yield (kg/h) عملکرد (کیلوگرم در هکتار)
1	4.9	21	0.63	0.47	37.6	0.27	211.10
2	5.06	21.66	0.75	0.64	32.5	0.42	424.02
3	5	21.33	0.74	0.65	35.7	0.41	411.67
4	5.03	21.33	0.64	0.51	37.2	0.29	240.40
5	5.03	21.66	0.68	0.55	36.9	0.34	324.58
6	5.1	21.66	0.76	0.68	31.4	0.42	473.97
7	5.1	21.66	0.81	0.74	30.9	0.46	480.29
8	5.03	21.66	0.66	0.52	36.4	0.37	288.17
9	5.03	21.66	0.70	0.61	36.06	0.39	370.77
Total Mean (میانگین کلی)	5.04	21.51	0.711	0.600	34.99	0.377	358.33
LSD5% (حداقل اختلاف معنی‌دار)	0.125	0.600	0.035	0.037	2.42	0.035	24.00

پایداری غشای سلولی از صفات مؤثر بر مدیریت فعالیت‌های حیاتی گیاه است. همان‌طور که انتظار می‌رود، پایین‌ترین مقدار پایداری غشای سلولی در تیمار عدم محلول‌پاشی مشاهده شد. در حالی‌که اعمال نانو اکسید آهن ۱ درصد باعث افزایش ۵۷ درصدی در پایداری غشا شد. محلول‌پاشی نانو اکسید آهن ۱ درصد باعث ایجاد بالاترین میزان عملکرد (۴۸۰/۲۹ کیلوگرم در هکتار) نیز شد. رتبه‌های بعدی از نظر عملکرد به‌ترتیب در محلول‌پاشی نانو اکسید آهن ۰/۵ درصد (۴۷۳/۹۷ کیلوگرم در هکتار)، نانو سولفات روی ۰/۵ درصد (۴۲۴/۰۲ کیلوگرم در هکتار) و نانو سولفات روی ۱ درصد (۴۱۱/۶۷ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد (شکل ۱). نادی و همکاران (Nadi *et al*., 2013) تأثیر کود نانو آهن را بر روی باقلا مطالعه و اثر مثبت کاربرد ترکیبات نانو در مقابل غیر نانو را تائید کردند. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، عملکرد با میزان فعالیت آنزیم

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jcb.16.3.91]

کاتالاز (۰/۸۱)، گلوتاتیون پراکسیداز (۰/۸۸)، سوپراکسید دیسموتاز (۰/۸۰)، پراکسید هیدروژن (۰/۸۲-)، مالون دی‌آلدئید (۰/۹۰-)، پرولین (۰/۸۹-)، کلروفیل a (۰/۸۳)، کلروفیل b (۰/۶۴)، کارتنوئیدها (۰/۷۴)، وزن صددانه (۰/۵۰)، شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی (۰/۸۶)، دمای کانوپی (۰/۷۶-)، محتوای رطوبت نسبی (۰/۸۴) و پایداری غشای سلولی (۰/۹۵) همبستگی معنی‌دار در سطح یک‌درصد داشت.

تأثیر مثبت کاربرد نانو ذرات اکسید آهن در مراحل مختلف رشدی گیاهان گزارش شده است. همبستگی مثبت بین رشد گیاه بنت قنسول و محلول‌پاشی نانو ذرات اکسید آهن ۳۰ روز پس از جوانه‌زنی مشاهده شده است (Kaviani *et al*., 2014). در مطالعه‌ای دیگر طلوعی و همکاران (Tullui *et al*., 2021) با استفاده از محلول‌پاشی نانو ذرات ترکیبی آهن و روی موفق به افزایش وزن صد دانه در نخود شدند. عبدالسلام (Abdel Salam, 2018) چهار سطح نانو اکسید آهن را در باقلا بررسی و گزارش کردند که در حداقل و حداکثر میزان کاربرد این ترکیب، به‌ترتیب ۲۵/۶ درصد و ۳۵/۵ درصد افزایش عملکرد مشاهده شده است.

جدول ۴- همبستگی بین صفات

Table 4. Correlation between traits

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1																
2	0.46*	1															
3	0.27	0.82**	1														
4	0.55**	0.81**	0.88**	1													
5	0.25	-0.5**	-0.8**	-0.5**	1												
6	-0.31	-0.8**	-0.9**	-0.8**	0.77**	1											
7	-0.5**	-0.8**	-0.8**	-0.8**	0.59**	0.89**	1										
8	0.36	0.88	0.86**	0.79**	-0.6**	-0.8**	-0.8**	1									
9	0.80**	0.83**	0.74**	0.87**	-0.3	-0.7**	-0.8**	0.74**	1								
10	0.67**	0.88**	0.82**	0.91**	-0.4*	-0.8**	-0.8**	0.86**	0.91**	1							
11	0.15	0.81**	0.88**	0.80**	-0.8**	-0.9**	-0.8**	-0.8**	0.64**	0.74**	1						
12	-0.3*	0.35	0.27	0.10	-0.5**	-0.3	-0.2	0.16	0.004	0.03	0.50**	1					
13	-0.6**	0.02	0.29	-0.04	-0.6**	-0.2	-0.1	0.13	-0.25	-0.17	0.34	0.4**	1				
14	0.21	0.73**	0.88**	0.84**	-0.7**	-0.8**	-0.8	0.71**	0.65	0.75**	0.86**	0.32	0.3	1			
15	-0.31	-0.8**	-0.8**	-0.7**	0.64**	0.88**	0.70**	-0.9**	-0.7**	-0.8**	-0.7**	-0.2	-0.1	-0.7**	1		
16	-0.13	0.67**	0.62**	0.46*	-0.8**	-0.6**	-0.6**	0.62**	0.36	0.41*	0.84**	0.8**	0.4**	0.6**	-0.5**	1	
17	0.09	0.83**	0.82**	0.72**	-0.8**	-0.8**	-0.8**	0.79**	0.60**	0.67**	0.95**	0.5**	0.36	0.8**	-0.7**	0.9**	1

(1. APX)- (2. CAT)- (3. GPX)- (4. SOD)- (5. H2O2)- (6. MDA)- (7. PRO)- (8. Chla)- (9. Chlb)- (10. CARS)- (11. YLD)- (12. 100SW)- (13. PH)- (14. NDVI)- (15. Canopy Temperature)- (16. RWC)- (17. CMS)

بررسی صفات بیوشیمیایی

نتایج تجزیه واریانس صفات بیوشیمیایی نشان داد که بین تیمارها از نظر تمام صفات اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد وجود دارد (جدول ۵). تنش خشکی به‌دلیل محدودیت در میزان رطوبت در دسترسی گیاه باعث محدودیت در دسترسی، جذب و انتقال و متابولیسم مواد معدنی و منجر به اختلال در فعالیت آنزیم‌های دخیل در آسیمیلاسیون مواد معدنی می‌شود (Farooq *et al*., 2009). در انتهای فصل رشد و در بهار میزان کلروفیل تحت تأثیر تنش خشکی و افزایش دما قرار می‌گیرد. از این‌رو، تغییر در میزان کلروفیل به‌صورت مستقیم در توانایی پاسخ گیاهان به محیط تأثیرگذار است. با توجه به نتایج جدول ۵، میزان کلروفیل a و b در نتیجه محلول‌پاشی نانوذرات افزایش یافته و بالاترین مقدار مربوط به اعمال تیمار نانو سولفات روی ۱ درصد و کمترین مقدار در عدم محلول‌پاشی مشاهده شد. طلوعی و همکاران (Tullui *et al*., 2021) گزارش کردند که میزان کلروفیل گیاه نخود در نتیجه استفاده از نانو ذرات روی افزایش یافته است. در مطالعه‌ای دیگر بهبودی و همکاران (Behboudi *et al*., 2019) افزایش میزان کلروفیل را در گندم با به‌کارگیری نانوذرات گزارش کردند. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، نانوذرات اکسید آهن نیز مقادیر کلروفیل a و b را افزایش داده‌اند. در واقع آهن یک عنصر ضروری برای زنجیره انتقال الکترون در گیاهان بوده و به‌دلیل حضور آن در ساختار سیتوکروم‌ها در فتوسنتز نقش دارد (Abadia *et al*., 2002). نتایج علی‌دوست و ایزودا (Alidoust & Isoda, 2013) نیز در تأئید یافته‌های پروژه حاضر است. با توجه به نتایج، استفاده از نانوذرات باعث افزایش میزان کارتنوئیدها شد. به‌طوری‌که در مقایسه با تیمار عدم محلول‌پاش، این تفاوت کاملاً آشکار است. بالاترین مقدار کارتنوئید در تیمار نانو سولفات روی ۱ درصد مشاهده شد. کارتنوئیدها در پلاست‌های گیاهان قرار دارند و در شرایط تنش اکسیداتیو از کلروفیل محافظت می‌کنند. به‌نظر می‌رسد که میزان خاصی از عنصر روی باعث سنتز کارتنوئیدها در تش اکسیداتیو می‌شود (Mohsenzadeh & Moosavian, 2017). بالاترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار نانو سولفات روی ۱ درصد مشاهده شد. افزایش میزان فعالیت کاتالاز در نتیجه به‌کارگیری نانو ذرات روی در سایر گیاهان نیز گزارش شده است (Wu *et al*., 2015; Thounaojam, 2014).

جدول ۵- تجزیه واریانس صفات بیوشیمیایی

Table 5. Analysis of variance for biochemical traits

S.O.V	df	APX آسکوربات پراکسیداز	CAT کاتالاز	GPX گلوتاتیون پراکسیداز	SOD سوپراکسید دیسموتاز	H2O2 پراکسیداز	MDA مالون دی آلدئید	PRO پرولین	Chla کلروفیل a	Chlb کلروفیل b	CARs کارتنوئید
Rep (تکرار)	2	2.48	0.006	0.068	2.71	4.94	18.02	8.30	272.6	1207.9	1428.6
Treat (تیمار)	8	0.06**	0.037**	0.16**	3.76**	2.38**	95.54**	31.99**	1458.9**	564.8**	1153.1**
Error (خطا)	16	0.007	0.0006	0.003	0.08	0.14	1.05	0.81	146.2	32.1	17.9
CV% (ضریب تغییرات)		8.39	19.45	8.18	4.12	12.66	3.51	2.92	9.84	10.12	4.10

**: معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

** significat and 1% level

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jcb.16.3.91]

محلول‌پاشی نانوسولفات روی ۱ درصد باعث افزایش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز شد. کمترین میزان فعالیت این آنزیم در عدم محلول‌پاشی مشاهده شد. یافته‌های ما و همکاران (Ma *et al*., 2017) و لیو و همکاران (Liu *et al*., 2012) تأئید کردند که کاربرد نانو ذرات روی به‌طور معنی‌داری باعث افزایش فعالیت آسکوربات پراکسیداز در گندم و ذرت تحت تنش خشکی می‌شود. فعالیت آنزیم گلوتاتیون پراکسیداز در نتیجه تیمار نانو سولفات روی ۱ و ۰/۵ درصد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. همان‌طور که انتظار می‌رفت، کمترین میزان فعالیت این آنزیم در شرایط عدم محلول‌پاشی به‌دست آمد (شکل ۲). طلوعی و همکاران (Tullui *et al*., 2021) افزایش فعالیت آنزیم گلوتاتیون پراکسیداز در نتیجه به‌کارگیری ترکیب نانو ذرات آهن و روی را در نخود و تحت تنش خشکی گزارش کردند. آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی در مکانیسم دفاع سلولی در پاسخ به رادیکال‌های آزاد اکسیژن نقش دارند. آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز کمبود O_2 را از طریق تبدیل H_2O_2 به O_2 و H_2O مدیریت می‌کنند (Roychoudhury *et al*., 2012; Semida *et al*., 2021).

جدول ۶- میانگین صفات زراعی و فیزیولوژیکی

Table 6. Means of agronomic and physiological traits

CARs کارتنوئید	Chlb کلروفیل b	Chla کلروفیل a	PRO پرولین	MDA مالون دی آلدئید	H_2O_2 پراکسید هیدروژن	SOD سوپراکسید دیسموتاز	GPX گلوتاتیون پراکسیداز	CAT کاتالاز	APX آسکوربات پراکسیداز	NO شماره
79.53	36.9	96.83	36.39	37.98	4.51	5.57	0.36	0.02	0.79	1
115.62	67.25	132.42	28.33	24.84	2.30	7.81	0.86	0.16	1.15	2
132.67	78.32	160.90	26.56	20.61	1.74	8.49	1.07	0.34	1.23	3
85.39	41.24	100.80	34.15	33.87	3.90	5.81	0.45	0.03	0.87	4
90.18	50.23	116.67	31.81	32.04	3.19	6.64	0.64	0.06	0.98	5
129.11	69.31	150.08	27.26	22.85	2.17	8.43	0.93	0.26	1.18	6
110.90	59.52	126.75	29.79	27.76	2.60	8.07	0.77	0.11	1.09	7
87.77	47.45	103.77	32.88	32.56	3.55	6.31	0.53	0.04	0.91	8
97.08	54.23	117.43	31.06	30.36	3.05	7.35	0.68	0.09	1.02	9
103.14	56.05	122.85	30.91	29.21	3.006	7.16	0.703	0.128	1.02	Total Mean
7.32	9.82	20.93	1.56	1.775	0.65	0.51	0.099	0.043	0.149	LSD5%

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز توسط تیمار نانو سولفات روی ۱ درصد بیشترین افزایش را داشت. راجی‌پوت و همکاران (Rajiput *et al*., 2021) نیز تأثیر نانوذرات روی را بر افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در شرایط تنش خشکی را تأئید کردند. بالاترین میزان پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید در تیمار عدم محلول‌پاشی مشاهده شد. سایر مطالعات نیز همین نتیجه را در نخود گزارش کردند (Burman *et al*., 2013., Tului *et al*., 2021). پرولین از جمله آمینو اسیدهای پایدار در گیاهان است که در نتیجه تنش خشکی به‌طور طبیعی در گیاهان تجمع می‌یابد. در شرایط عدم محلول‌پاشی بالاترین میزان پرولین و به‌هنگام کاربرد نانو سولفات روی یک‌درصد، کمترین میزان پرولین مشاهده شد. اما محسن زاده و موسویان (Mohsenzadeh & Mousavian, 2017) تأثیر نانوذرات اکسید روی را بر افزایش محتوای پرولین گزارش کردند.

بررسی صفات ریشه: صفات مرتبط با ریشه از جمله طول، قطر متوسط، سطح و حجم با استفاده از نرم‌افزار Rhizo Vision Explorer (2.0.3) (شکل ۳) برحسب پیکسل محاسبه گردید. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، بالاترین طول ریشه به‌ترتیب در محلول‌پاشی نانو سولفات روی ۱ درصد، نانو سولفات روی ۰/۵ درصد، نانو اکسید آهن ۰/۵ درصد و نانو اکسید آهن ۱ درصد مشاهده شد.

در رابطه با سیستم ریشه‌ای عدس و ارتباط آن با عملکرد گیاه مطالعات اندکی انجام شده است. بالاترین قطر ریشه در سولفات روی ۰/۵ درصد و سولفات روی ۱ درصد مشاهده شد. بر اساس نتایج پروژه حاضر می‌توان گفت که کاربرد نانو ذرات تأثیری بر افزایش قطر ریشه نداشته است. در حالی‌که کابرد نانواکسید آهن ۱ درصد، نانو اکسید روی ۰/۵ درصد و نانو سولفات روی ۰/۵ درصد بیشترین تأثیر را در حجم ریشه داشت. سطح ریشه بیشترین افزایش را با به‌کارگیری نانو اکسید آهن ۱ درصد، نانو اکسید آهن ۰/۵ درصد، نانو سولفات روی ۰/۵ درصد و نانو سولفات روی ۱ درصد داشت.

جدول ۷- صفات ریشه در محلول‌پاشی سطوح مختلف نانو سولفات روی و نانو اکسید آهن

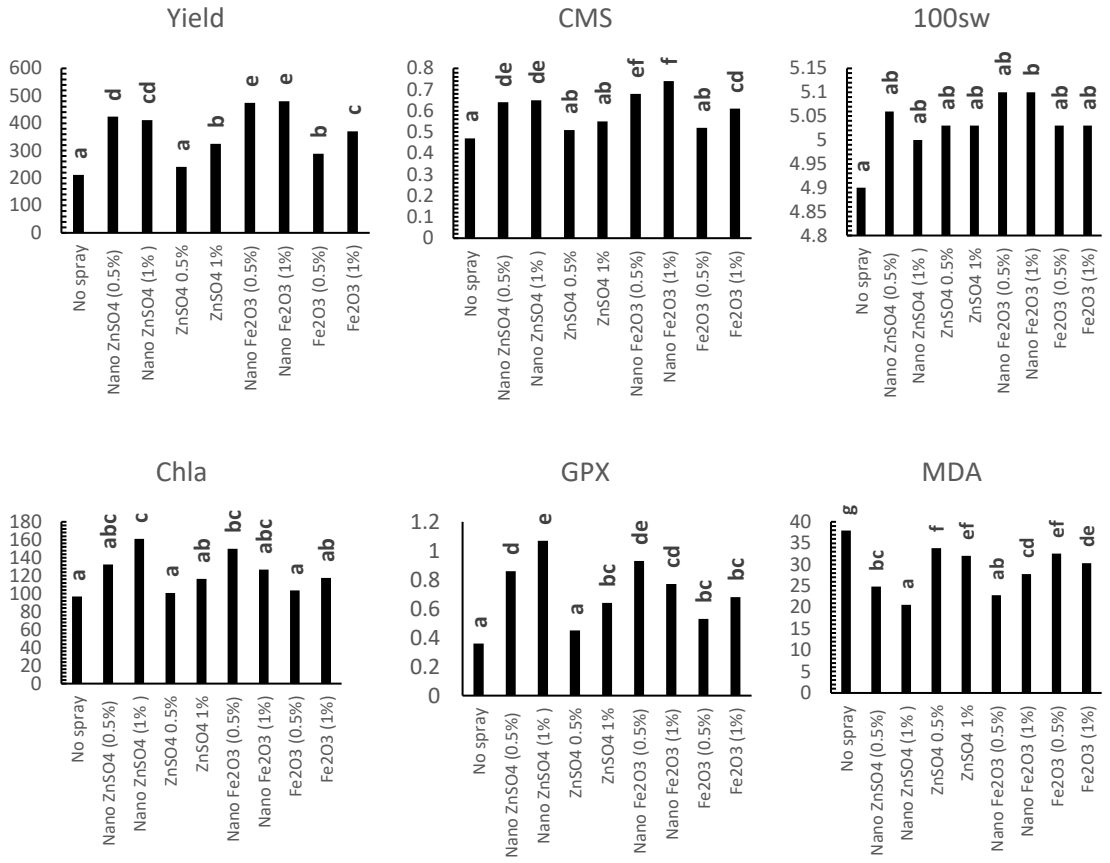
Table 7. Root traits for different levels of $ZnSO_4$ and Fe_2O_3 spraying

Volume (PX^3) حجم	Surface area (PX^2) سطح	Avg. diameter (PX) متوسط قطر	Length (PX) طول	Treatment تیمار
92520649.9	2239602.25	95.95	7627.47	(عدم محلول پاشی) No spray
183695498.9	4984098.66	71.59	22703.45	(نانو سولفات روی نیم درصد) Nano $ZnSO_4$ (0.5%)
122831561.4	4309477.99	48.07	28612.79	(نانو سولفات روی یک درصد) Nano $ZnSO_4$ (1%)
157145631.9	3363989.84	107.51	10373.59	(سولفات روی نیم درصد) $ZnSO_4$ (0.5%)
120633005.6	2518613.23	103.07	7956.12	(سولفات روی یک درصد) $ZnSO_4$ (1%)
209446274.9	5025204.31	75.08	20765.24	(نانو اکسید آهن نیم درصد) Nano Fe_2O_3 (0.5%)
227448087.2	5471050.39	83.65	20526.25	(نانو اکسید آهن یک درصد) Nano Fe_2O_3 (1%)
132925936.2	3182651.81	76.05	13757.31	(اکسید آهن نیم درصد) Fe_2O_3 (0.5%)
159630031.6	3943782.56	74.38	16756.56	(اکسید آهن یک درصد) Fe_2O_3 (1%)

PX: پیکسل

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jcb.16.3.91]



شکل ۱- تاثیر محلول‌پاشی سطوح مختلف نانوذرات بر صفات زراعی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی و مقایسات میانگین با استفاده از آزمون حداقل اختلافات معنی‌دار در سطح ۵ درصد

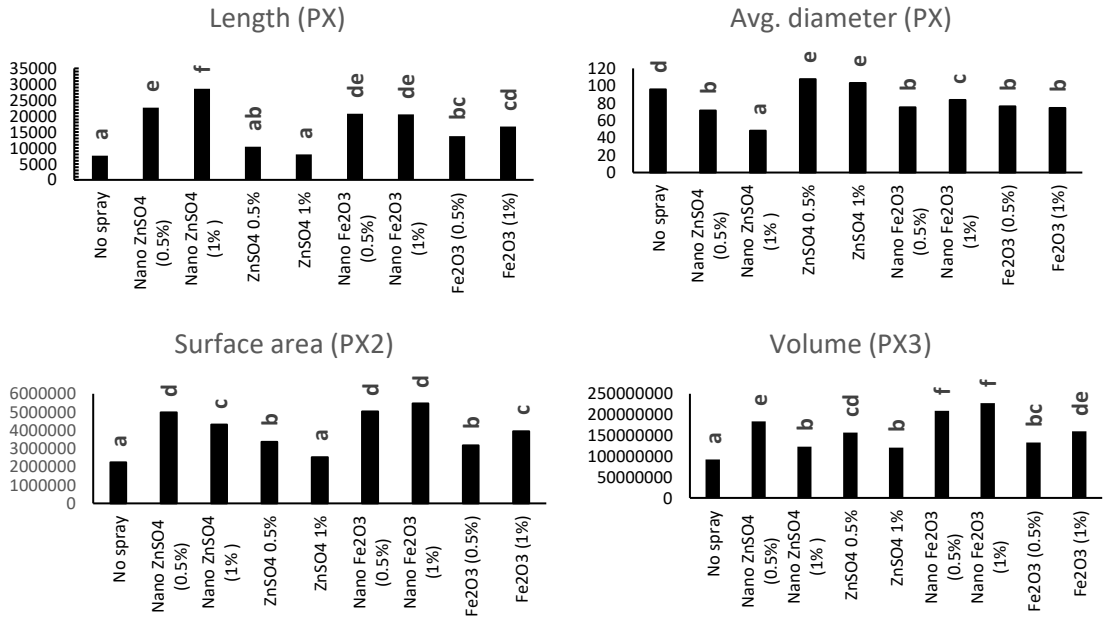
Figure 1. Effects of foliar application of different levels of nanoparticles on agronomic, physiologic, and biochemical characteristics and mean compare using LSD5%.

طول ریشه عدس به‌ترتیب در تیمارهای نانوسولفات روی ۱ درصد (۲۸۶۱۲/۷۹)، نانوسولفات روی ۰/۵ درصد (۲۲۷۰۳/۴۵)، نانو اکسید آهن ۰/۵ درصد (۲۰۷۶۵/۲۴) و نانو اکسید آهن ۱ درصد (۲۰۵۲۶/۲۵) بود و کمترین طول ریشه در شرایط عدم محلول پاشی بود. سولفات روی ۱ درصد و ۰/۵ درصد باعث بیشترین قطر ریشه بود. بالاترین سطح ریشه در نانو اکسید آهن ۱ درصد و ۰/۵ درصد و سپس در نانو سولفات روی ۰/۵ درصد و ۱ درصد مشاهده شد. حجم ریشه بین ۹۲۵۲۰۶۴۹/۹۱ در تیمار عدم محلول‌پاشی و اعمال نانواکسید آهن ۱ درصد (۲۲۷۴۴۸۰۷۸/۲) متغیر بود.

در کل ترکیب نانواکسید آهن نسبت به نانوسولفات روی در افزایش حجم ریشه مؤثرتر بود. مطالعات اندکی در زمینه ریشه عدس و همچنین ارتباط آن با کاربرد نانوذرات انجام شده است. هرچند در گیاهان دیگر از قبیل ذرت، آرابیدوپسیس، نعناع نمونه‌هایی گزارش شده است (Asli & Neumann, 2009; Gopalakrishnan & Chung, 2014; Samadi *et al*. 2014). تأثیر کاربرد ذرات نانو سیلیکون و نانو سلنیوم به‌صورت محلول‌پاشی در صفات ریشه برنج مطالعه شد. در این بررسی مشخص گردید که این ترکیبات بر طول ریشه، حجم ریشه و ضخامت آن مؤثر می‌باشد (Badaway *et al*., 2021).

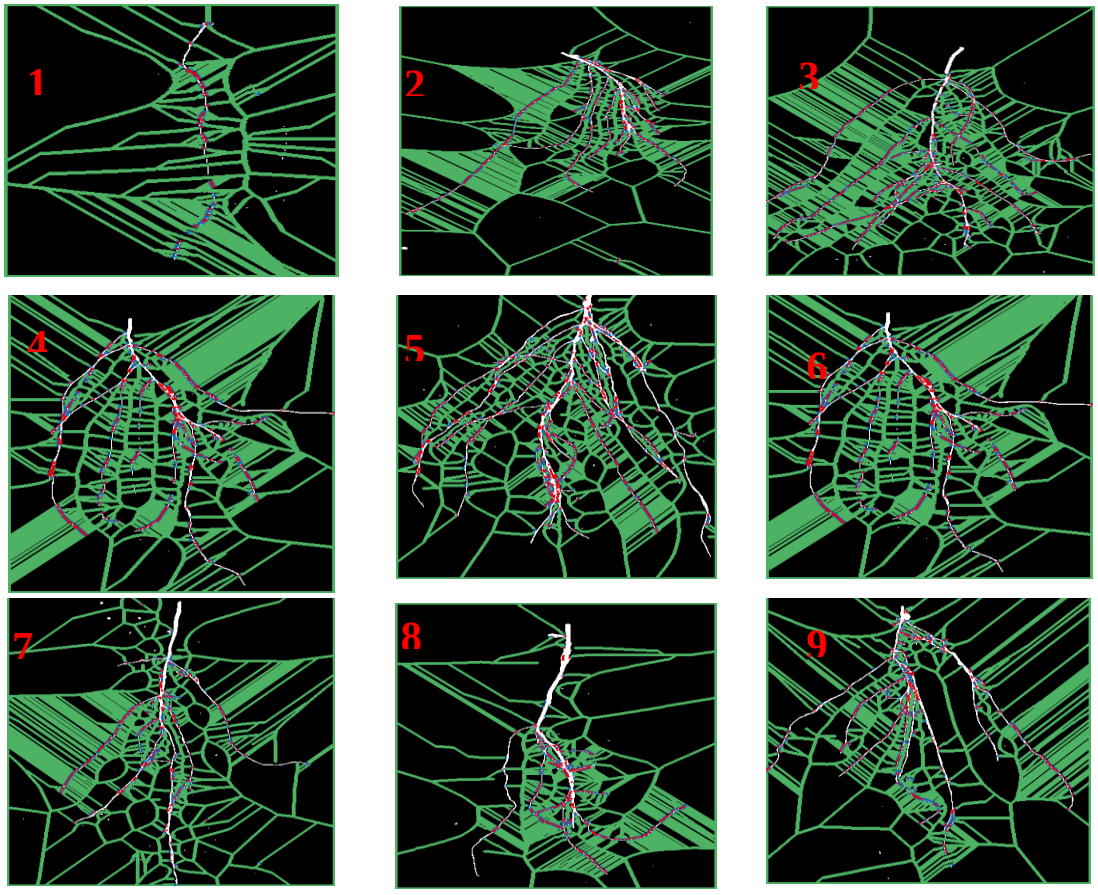
[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jcb.16.3.91]



شکل ۲- تاثیر محلول‌پاشی سطوح مختلف نانوذرات بر طول، متوسط قطر، سطح و حجم ریشه عدس و مقایسات میانگین با استفاده از آزمون حداقل اختلافات معنی‌دار در سطح ۵ درصد

Figure 2. Effects of foliar application of different levels of nanoparticles on length, average diameter, surface area, and volume of lentil roots and mean compare using LSD5%.



شکل ۳- نمونه‌های ریشه با نرم‌افزار Rhizo Vision تجزیه شدند (تصاویر متعلق به نمونه‌های تکرار اول آزمایش است)

Figure 3. Root samples were analyzed with Rhizo Vision software (samples belong to the first replication of the experiment)

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jcb.16.3.91]

نتیجه‌گیری

زراعت بهاره عدس در مناطق سردسیر عمدتاً با تنش خشکی آخر فصل همراه است. تنش خشکی مهم‌ترین تنش غیرزیستی است که به‌طور قابل‌توجهی محدود کننده تولید در محصولات زراعی بوده و باعث اثرات منفی متعددی در گیاهان می‌شود. یکی از مهم‌ترین اثرات آن، کاهش مواد مغذی است. مدیریت مواد مغذی نقش حیاتی در مکانیسم مقاومت گیاهان در شرایط تنش خشکی ایفا می‌کند. پژوهشگران نشان دادند که عنصر روی تأثیر مثبت در رشد و نمو و عملکرد گیاه دارد. همچنین این عنصر از میکروالمنت‌های درگیر در سنتز تریپتوفان است. این اسیدآمینه به‌عنوان پیش‌ساز ایندول‌استیک اسید، یعنی یک فیتوهورمون مسئول در تقسیم سلولی می‌باشد. عنصر روی همچنین به‌عنوان بهبودگر تأثیرات منفی تنش‌های غیرزیستی است. از طرف دیگر عنصر آهن جز تشکیل دهنده و کوفاکتور آنزیم‌های مختلف بوده و برای فرآیندهای فیزیولوژیکی از جمله بیوسنتز کلروفیل، توسعه کلروپلاست، تعرق، واکنش‌های احیا و متابولیسم اسیدهای نوکلوئیک تاثیرگذار است (Mimmo *et al*., 2014). تأثیر نانوذرات در مقابله با آثار سمی تنش خشکی در مطالعات مختلف اثبات شده است. بنابراین، در غلبه بر آثار تنش خشکی در عدس دو ترکیب نانو اسفاده شد. براساس نتایج، نانو اکسید آهن ۱ درصد بیشترین تأثیر را بر صفات زراعی و فیزیولوژیکی داشت. در حالی‌که نانو سولفات روی ۵ درصد بر سیستم آنتی‌اکسیدانی مؤثر بود. صفات ریشه‌ای مطلوب در بهره‌وری از مواد مغذی و منبع آب در خاک مؤثر می‌باشد. در این مطالعه مشاهده شد که نانو ذرات سولفات روی اثر مثبت بر روی طول و قطر متوسط ریشه دارد. در حالی‌که نانو ذرات اکسید آهن در بهبود سطح و حجم ریشه مؤثر می‌باشد.

References

Abadia, J., Fernandez, A. A., Morales, F., Sanz, M., & Abadia, A. (2002). Correction of iron chlorosis by foliar sprays. *Acta Hortic*, 594, 115–121.

Abdel Salam, M.A. (2018). Implications of applying nano-hydroxyapatite and nano-Iron on Faba Bean (*Vicia Faba* L.). *J. Soil Sci. and Agric. Eng*, 9, 543-548.

Abei, H. (1984). Catalase in vitro. *Methods Enzymol*, 115, 121–126.

Alidoust, D., & Isoda, A. (2013). Effects of Fe2O3 nanoparticles on the photosynthetic characteristic of soybean: foliar spray versus soil amendment. *Acta Physiol. Plan*, 35, 3365-3375.

Amiri, R., Pezeahkpour, P., & Karami, I. (2021). Identification of lentil desirable genotypes using multivariate statistical methods and selection index of ideal genotype under Rainfed conditions. *Journal of Crop Breeding*, 13, 140-151. [In Persian]

Asli, S., & Neumann, P. (2009). Colloidal suspensions of clay or titanium dioxide nanoparticles can inhibit leaf growth and transpiration via physical effects on root water transport. *Plant Cell Environ*, 32, 577-584.

Badawy, S. A., Zayed, B. A., Bassiouni, S. M., Mahdi, A. H., Majrashi, A., Ali, E. F., & Seleiman, M. F. (2021). Influence of nano silicon and nano selenium on root characters, growth, ion selectivity, yield, and yield components of rice (*Oryza sativa* L.) under salinity conditions. *Plants*, *10*(8), 1657. DOI: 10.3390/plants10081657.

Behboudi, F., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Kassaee, M. Z., Modarres-Sanavy, S. A. M., Sorooshzadeh, A., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2019). Evaluation of chitosan nanoparticles effects with two application methods on wheat under drought stress. *Journal of Plant Nutrition*, *42*(13), 1439-1451. DOI: 10.1080/01904167.2019.1617308

Burman, U., Saini, M., & Kumar, P. (2013). Effect of Zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant system of chickpea seedlings. *Toxicol. Environ. Chem*, 95, 05-612.

Cakmak, I., & Marschner, H. (1992). Magnesium deficiency and high light intensity enhance the activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves. *Plant Physiol*, 98(4), 1222-1227.

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujitam, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms, and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 185-212.

Farooqui, A., Tabassum, H., Ahmad, A., Mabood, A., Ahmad, A., & Zareen Ahmad, I. (2016). Role of nanoparticles in growth and development of plants: a review. *Int. J. Pharma Bio Sci*, 7, 22-37.

Varnaseri Ghandali, V., & Nasiri Dehsorkhi, A. (2017). Investigation of foliar application of Zinc and Iron elements in nano form on growth and yield of cowpea under water deficit stress. Applied Research of Plant Ecophysiology, 4(1), 109-136.

Gopalakrishnan, N., & Chung, I. M. (2014). Impact of copper oxide nanoparticles exposure on Arabidopsis thaliana growth, root system development, root lignification, and molecular level changes. *Environ. Sci. pollute. Res*, 21, 12709-12722.

Hamzei, J., Najjari, S., Sadeghi, F., & Seyedi, M. (2014). Effect of foliar application of nano-iron chelate and inoculation with mesorhizobium bacteria on root nodulation, growth and yield of chickpea under rainfed conditions. *IJPR*, 2, 9-18.

Hassan, M. U., Chattha, M., Ullah, A., Khan, I., Qadeer, A., Aamer, M., Khan, A.U., Nadeem, F., & Khan, T. A. (2019). Agronomic biofortification to improve productivity and grain Zn concentration of bread wheat. *Int J Agric Biol*, 21, 615–620.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jcb.16.3.91]

Jahanaray, F., Sadeghi, S. M., & Ashouri, M. (2013) The effect nanocomposites of iron spraying on yield and yield components of wax bean genotypes inoculated with Rhizobium bacteria (*Rhizobium leguminosarum*) in the farm conditions of Gilan. *IJPR*, 2, 111-120.

Janmohammadi, M. (2012). Alleviation of the adverse effect of cadmium on seedling growth of greater burdock (*Aractium lappa* L.) through pre-sowing treatments. *Int. J. Agric. For. Fish*, 56, 1-13.

Karimi, Z., Pourakbar, L., & Feizi, H. (2014). Comparison effect of nano-iron chelate and iron chelate on growth parameters and antioxidant enzymes activity of *Mung Bean*. *Adv. Enviro. Biol*, 8(13), 16-930.

Kaviani, B., Negahdar, N., & Ghaziani, M. V. F. (2014). The effect of iron nano-chelate and cycocel on some morphological and physiological characteristics, proliferation, and enhancing the quality of *Euphorbia pulcherrima* Willd. *Sci. Papers Ser. B Hortic*, 58, 337–342.

Kumar, S. H. (2015). Current knowledge in lentil genomics and its application for crop improvement. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1-13.

Li, J., Hu, J., Ma, C., Wang, Y., Wu, C., Huang, J., & Xing, B. (2016). Uptake, translocation and physiological effects of magnetic iron oxide (g-Fe2O3) nanoparticles in corn (*Zea mays* L.). *Chemosphere*, 15(9), 326-334.

Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in enzymology*, 148, 350-382.

Liu, Y. J., Yuan, Y., Liu, Y. Y., Liu, Y., Fu, J. J., Zheng, J., & Wang, G. Y. (2012). Gene families of maize glutathione-ascorbate redox cycle respond differently to abiotic stresses. *J. Plant Physiol*, 169, 83–192.

Loreto, F., & Velikova, V. (2001). Isoprene produced by leaves protects the photosynthetic apparatus against ozone damage, quenches ozone products, and reduces lipid peroxidation of cellular membranes. *Plant Physiol*, 127, 1781-1787.

Ma, D., Sun, D., Wang, C., Ding, H., Qin, H., Hou, J., Huang, X., Xie, Y., & Guo, T. (2017). Physiological responses and yield of wheat plants in zinc-mediated alleviation of drought stress. *Front. Plant Sci*, 8, 860-870.

Mahdieh, M., Sangi, M. R., Bamdad, F., & Ghanem, A. (2018). Effect of seed and foliar application of nano-zinc oxide, Zinc Chelate, and Zinc sulfate rates on yield and growth of pinto bean cultivars. *J. Plant Nutr*, DOI: 10.1080/01904167.2018.1510517.

Makarian, H., Shojaei, H., Damavandi, H., Nasiri Dehsorkhi, A., & Akhyani, A. (2017). The effect of foliar application of Zn oxide in common and nanoparticles forms on some growth and quality traits of Mungbean (*Vigna radiat*e L.) under drought stress conditions. *IJPR*. 8, 166-180.

Maswada, H. F., Mazrou, Y. S., Elzaawely, A. A., & Alam-Eldein, S. (2020). Nanomaterials. Effective tools for field and horticultural crops to cope with drought stress: A review, Span. *J. Agric. Res*, 18, 1-15.

Mimmo, T., Del Buono, D., Terzano, R., Tomasi, N., Vigani, G., Crecchio, C., Pinton, R., Zocchi, G., & Cesco, S., (2014). Rhizospheric organic compounds in the soil–microorganism–plant system: their role in iron availability. *Eur. J. Soil Sci*, 65(5), 629–642.

Mohammadi, M., Majnoon Hosseini, N., Chaichi, M. R., Alipour, H., Dashtaki, M., & Safikhani, S. (2018). Influence of nano-iron and Zinc sulphate on physiological characteristics of peppermint. *Commun Sci Plasnt Anal*, 49, 2315- 2326.

Mohsenzadeh, S., & Moosavian, S. S. (2017). Zinc sulfate and nano-zinc oxide effects on some physiological parameters of *Rosmarinus officialis*. *Am. J. of Sci*, 8, 2635-2649.

Nadi, E., Aynehband, A., & Mojaddam, M. (2013). Effect of nano-iron chelate fertilizer on grain yield, protein percent, and chlorophyll content of faba bean (*Vicia faba*. L). *Int. J. Biosci*, 9, 267-272.

Ninou, E., Papathanasiou, F., Vlachostergios, D., Mylonas, I., Kargiotidou, A., Pankou, C. H., Papadopulos, I., Sinapidou, E., & Tokatlidis, I. (2019). Intense breeding within lentil landraces for high-yielding pure sustained the seed quality characteristics. *Agriculture*, 9, 1-13.

Pandy, A. C., Sanjay, S. S., & Yadav, R. S. (2010). Application of ZnO nanoparticlesin influencing the growth rate of *cicer arietinum*. *J. Exp. Nanosci*. 5, 488-497.

Pawar, V. A., Ambekar, J. D., Kale, B. B., Apte, S. K., & Laware, S. L. (2019). Response in chickpea seeding growth to seed priming with iron oxide nanoparticles. *Int. J. Biosci*, 14, 82-91.

Rajiput, V. D., Minkina, T., Harish, A. K., Singh, V. K., Verma, K., Mandzhieva, S., Sushkova, S., Srivastava, S., & Keswani, C. (2021). Coping with the challenges of abiotic stress in plants: new dimensions in the field application of nanoparticles. *Plants*, 10, 1-25.

Roychoudhury, A., Basu, S., Sengupta, D. N. (2012). Antioxidants and stress-related metabolites in the seedlings of two indica rice varieties exposed to cadmium chloride toxicity. *Acta Physiol. Plant*, 34, 835-847.

Sabaghnia, N. (2014). Investigation of some morphological traits in studied lentil (*Lens culinaris* Medik.) genotypes grown with foliar application of nanosized ferric oxide. *Pobrane z czasopisma Annales*, 2, 29-39.

Samadi, N., Yahyaabadi, S., & Rezayatmand, Z. (2014). Effect of Tio2 and Tio2 nanoparticle on germination, root and shoot length and photosynthetic pigments of *Mentha piperita*. *Int. J. Plant Soil Sci*, 3(4), 408-418.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jcb.16.3.91]

Sedaghatkhahi, H., Parsa, M., Nezami, A., Porsa, H., & Bagheri, A. R. (2011). Study yield and yield attributes in cold tolerant chickpea genotypes in winter sowing conditions at Mashhad. *Iranian Journal of Pulses Research*, 9, 322- 330.

Semida, W. M., Abdelkhalik, A., Mohamed, G., El-Mageed, T., Abdel-Mageed, S., Rady, M., & Ali, E. 2021. Foliar application of Zinc Oxide nanoparticles promotes drought stress tolerance in Eggplant. *Plants*, 10, 1-17.

Duhan, J. S., Kumar, R., Kumar, N., Kaur, P., Nehra, K., & Duhan, S. (2017). Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. *Biotechnology Reports*, 15, 11-23. DOI: 10.1016/j.btre.2017.03.002.

Tabrizivand Taheri, M., Pouralibaba, H.R. & Kokab, S. (2024). Study Lentil (*Lens Culinaris* L.) landraces for cold tolerance under field and controlled conditions. *Journal of Crop Breeding*, 15, 213-223. [In Persian]

Thounaojam, T. C., Panda, P., Choudhury, S., Patra, H. K., & Panda, S. K. (2014). Zinc ameliorates copper-induced oxidative stress in developing rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Protoplasma*, 251, 61–69.

Torres, N. R., Naveda, A. F., Castro, E. D. B., Montejo, N. C., Barron, S. R., Escalante, F. B., Medina, G. N., Juarez, A, H., Alonso, C. G., Salinas, P. R., & Lopez, J. G. L. (2021). Zinc Oxide nanoparticles and Zinc Sulphate impact physiological parameters and boosts lipid peroxidation in soil grown coriander plants (*Corianrdum sativum*). *Molecules*, 26, 1-14.

Tullui, V., Janmohammadi, M., Abbasi, A., Vahdati Khaje, S., & Nouraein, M. (2021). Influence of IRON Zinc and bimetallic Zn-Fe nanoparticles on growth and biochemical characterization in chickpea cultivars. *Int. J.Agric. For. Fish*, 67, 179-193.

Umair Hassan, M., Aamer, M., Umer Chattha, M., Haiying, T., Shahzad, B., Barbanti, L., Nawaz, M., Rasheed, A., Afzal, A., Liu, Y., & Ghoqin, H. (2020). The critical role of Zinc in plants facing drought stress. *Agriculture*, 10, 1-20.

Unyayar, S., Keles, Y., & Cekic, F. C. (2005). The antioxidative response of two tomato species with different drought tolerances as a result of drought and cadmium stress combinations. *Plant Soil Environ*, 51(2), 57-64.

Wu, S., Hu, C., Tan, Q., Li, L., Shi, K., Zheng, Y., & Sun, X. (2015). Drought stress tolerance mediated by the zinc-induced antioxidative defense and osmotic adjustment in cotton (*Gossypium hirsutum*). *Acta Physiol. Plant*, 37, 167-171.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/jcb.16.3.91]