

Research Paper

Effects of ZnSO₄ and Fe₂O₃ Nanoparticles of Lentil (*Lens culinaris* Medik.) on the Antioxidant System, Agronomic, Physiologic, and Root Characteristics under Drought Stress

Mojhgan Tabrizvand Taheri¹  and Amin Abbasi²

1- Assistant Professor, Dryland Agricultural Research Institute (DARI), Agricultural Research Education and Extension (AREEO), Maragheh, Iran, (Corresponding author: tabrizvand@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 ZnSO₄ and Fe₂O₃ 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 ZnSO₄, 1% nano ZnSO₄, 0.5% ZnSO₄, 1% ZnSO₄, 0.5% nano Fe₂O₃, 1% nano Fe₂O₃, 0.5% Fe₂O₃, and 1% Fe₂O₃. 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 Fe₂O₃ 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 ZnSO₄ 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 ZnSO₄ treatment. The lowest activity of these enzymes as well as the highest H₂O₂, 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), H₂O₂ (-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

root length was respectively measured in 1% nano ZnSO₄, 0.5% nano ZnSO₄, 0.5% nano Fe₂O₃, and 1% nano Fe₂O₃. NPs had no effect on average diameter while applying 1% Fe₂O₃ led to the highest effect on the root volume. Root surface showed the highest increase by using 1% nano Fe₂O₃, 0.5% nano ZnSO₄, and 0.5% nano ZnSO₄. The highest root length belonged to 1% nano ZnSO₄ and 0.5% nano ZnSO₄ while this trait was lowermost in no spray treatment.

Conclusion: According to the results, 1% Fe₂O₃ exerted the highest effect on agronomic and physiological traits while 0.5% ZnSO₄ was effective on the antioxidant system, and ZnSO₄ NPs positively affected the root length and average diameter. While Fe₂O₃ NPs were effective in improving the root surface area and volume.

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

How to Cite This Article: Tabrizvand 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



مقاله پژوهشی

تأثیر محلول پاشی 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^۱ ID و امین عباسی^۲

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹ صفحه: ۹۱ تا ۱۰۳
 تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶

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 زمانی که 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 و ۰/۵ 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 کانوبی 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، گلوتاتیون پراکسیداز، سوپر اکسید دیسموتاز، پراکسیداز و غلظت پرولین، کلروفیل a، کلروفیل b و کارنتنوئیدها محاسبه شد.

یافته‌ها: بین تیمارها از نظر محتوای رطوبت نسبی، پایداری غشای سلولی، دمای کانوبی، 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 کانوبی 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 کارنتنوئید و بالاترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون پراکسیداز و سوپر اکسید دیسموتاز در تیمار نانو سولفات روی ۱ درصد مشاهده شد. بالاترین میزان پراکسیداز، گلوتاتیون پراکسیداز 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 کارنتنوئید، بیشترین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون پراکسیداز و سوپر اکسید دیسموتاز در تیمار نانو سولفات روی ۱ درصد مشاهده شد. پائین‌ترین سطح فعالیت این آنزیم‌ها در شرایط عدم محلول‌پاشی محاسبه گردید. بیشترین مقدار پرولین، پراکسیداز 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)، سوپر اکسید دیسموتاز (۰/۸۰)، پراکسیداز هیدروژن (۰/۸۲)، مالون دی‌آلدئید (۰/۹۰)، پرولین (۰/۸۹)، کلروفیل a (۰/۸۳)، کلروفیل b (۰/۶۴)، کارنتنوئیدها (۰/۷۴)، وزن صد دانه (۰/۵۰)، شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (۰/۸۶)، دمای کانوبی (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 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. کاربرد نانو ذرات تأثیری بر افزایش قطر ریشه نداشته است. در حالی که کاربرد نانو اکسید 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 نانو سولفات 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 حالی که 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 حالی که نانو ذرات اکسید آهن در بهبود سطح و حجم ریشه مؤثر می‌باشد.

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

مقدمه

بر پروتئین، دانه این گیاه از نظر کربوهیدرات‌ها، مواد معدنی، ویتامین‌ها و فیبر نیز غنی می‌باشد. باکتری‌های تثبیت‌کننده موجود در ریشه این گیاه باعث تثبیت زیستی نیتروژن می‌شوند (Kumar, 2015).

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

پراکسیداز و کاتالاز می شود. 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 می شود. در مطالعه ای دیگر، کاربرد نانو اکسید آهن به صورت محلول پاشی و خاک کاربرد مقایسه شد. براساس نتایج، کاربرد نانوذرات به صورت محلول پاشی 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). جهان آرای و همکاران (Jahanaray et al., 2013) تأثیر محلول پاشی نانو کامپوزیت آهن بر عملکرد و اجزای آن را در لوبیا بررسی کردند. براساس نتایج مشاهده شده محلول پاشی نانو کامپوزیت آهن موجب افزایش عملکرد در ژنوتیپ های صدری، خمین و محلی گیلان شد. اما در مورد ژنوتیپ تلاش این نتیجه عکس بود. حمزهئی و همکاران (Hamzei et al., 2014) اثر محلول پاشی نانوکلات آهن و تلقیح باکتری مزوریزوبیوم بر گره زایی 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 + غلاف دهی، بیشترین میزان گره زایی ریشه شاخص های زراعی و عملکرد دانه را ایجاد کرد. مکاران و همکاران (Makkarian et al., 2017) تأثیر 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 محلول پاشی عنصر روی محتوای پرولین و عملکرد بیولوژیک دانه را در حالت تنش خشکی به طور معنی داری افزایش داد و همین طور محلول پاشی عنصر روی به صورت 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 نعنای 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 آنتی اکسیدانی و ریشه ای 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 بیله سوار تحت شرایط دیم انجام گرفت.

عدس یکی از محصولات مهم در نظام های زراعی مناطق خشک و دیم زارهای کشور است که به واسطه 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 به صورت بهاره است. اما به دلیل رطوبت زیاد مزرعه در اسفند ماه و عدم امکان ورود ماشین آلات به مزرعه جهت آماده سازی زمین در اغلب سال ها، کشت عدس در مناطق سردسیر تا فروردین ماه به تأخیر می افتد (Sedaghatkhani et al., 2011). در مناطق دیم کشور گل دهی از ۱۵ اردیبهشت شروع می شود. بیشترین نیاز آبی گیاه عدس در مرحله گل دهی و غلاف بندی است. در مناطق سردسیر اغلب سال ها در نیمه دوم اردیبهشت ریزش باران های مؤثر اتفاق نمی افتد. عدم ریزش بارندگی در نیمه دوم اردیبهشت و خرداد که مصادف با مرحله گل دهی و غلاف دهی گیاه عدس است، موجب وارد شدن تنش خشکی به گیاه شده و با افزایش گرمای آخر فصل، اثرات تنش خشکی مضاعف می گردد (Tabrizvand Taheri et al., 2024). نانو ذرات به عنوان ابزارهای اساسی در مقابله با چالش تغییرات اقلیمی پیش رو می باشند. اخیراً نانو ذرات جهت تقویت جوانه زنی، رشد، بهبود ویژگی های فیزیولوژیکی، تولید و کیفیت محصولات زراعی مختلف در شرایط تنش به کار رفته است (Maswada et al., 2020; Semida et al., 2021; Pandey et al., 2010). تاکنون مطالعات گسترده ای در زمینه کاربرد نانوذرات در افزایش عملکرد و مقابله با تنش ها انجام شده است (Li et al., 2016).

میکروالمنت روی (Zn) در تحمل گیاهان به تنش خشکی از طریق تنظیم مکانیسم های فیزیولوژیکی و مولکولی نقش مهمی را ایفا می کند. کاربرد این عنصر در شرایط تنش خشکی، باعث بهبود وضعیت جوانه زنی، رابطه آب و گیاه، پایداری غشای سلولی، تنظیم اسمزی، کارایی مصرف آب و فتوسنتز و در نهایت افزایش عملکرد گیاه می شود (Umair Hassan et al., 2020). حسن و همکاران (Hassan et al., 2019) گزارش کردند که پرایمینگ بذر با عنصر روی، همراه با محلول پاشی و ترکیب با خاک، باعث افزایش عملکرد و محتوای روی در دانه گندم شده است. آهن از عناصر تاثیر گذار بر رشد گیاه از طریق فرآیندهای فیزیولوژیکی از قبیل فتوسنتز، اکسایش، تبخیر می باشد و کمبود آن منجر به کاهش شدید عملکرد می شود (Pawar et al., 2019). با کاربرد آهن و روی، پاسخ های مختلفی در گیاهان مشاهده است (Abdel salam 2018., Farooqui et al., 2016., Sabaghnia 2014., Mahdiah et al., 2018). کاربرد نانو ذرات باعث بهبود خصوصیات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان از طریق تأثیر بر سنتز آنزیم های پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز، افزایش جذب مواد معدنی، جلوگیری از کاهش الکترولیت ها، افزایش پروتئین های محلول، کاهش فرآیند پراکسیدازی و کاهش در سطح پرولین و گلوکاتایون می شود و در نتیجه باعث افزایش تحمل گیاهان به تنش خشکی می شود (Li et al., 2016). کریمی و همکاران (Karimi et al., 2014) تأثیر نانو کلات آهن و کلات آهن را بر روی آنزیم های آنتی اکسیدانی ماش مطالعه کردند. نتایج نشان داد که کاربرد نانوکلات آهن باعث افزایش فعالیت آنزیم های آسکوربات

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. محلول پاشی 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 کانوبی، وزن صد دانه، عملکرد، محتوای رطوبت نسبی (RWC)^۱، پایداری غشای سلولی (CMS)^۲ و شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)^۳ یادداشت و اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایش خاک محل اجرای آزمایش در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکیوشیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

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

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

و گلوکاتینون 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 به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ گردید (Janmohammadi, 2012). فعالیت آنزیم کاتالاز براساس روش ابی (Abei, 1984) محاسبه شد. بدین منظور ۳ میلی‌لیتر مخلوط واکنش، شامل ۱/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=7)، ۰/۵ میلی‌لیتر H₂O₂ ۷۵ میلی‌مولار، ۰/۰۵ میلی‌لیتر آنزیم استخراج شده و آب دیونیزه تا رسیدن به ۳ میلی‌لیتر تهیه شد. واکنش با H₂O₂ آغاز شد میزان فعالیت آنزیم از طریق محاسبه تجزیه H₂O₂ 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 لیچنتتالر (Lichtenthaler, 1987) و با استفاده از اسپکتروفوتومتر محاسبه شد.

دمای کانوبی: 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 این صورت که در مزرعه پای بوته کاملاً آبیاری شد تا اینکه خروج ریشه از خاک با سهولت انجام شود. سپس با کمک بیل و به صورت 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 هگزامتا فسفات سدیم استفاده شد.

شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)

با استفاده از دستگاه (Green seeker (Trimbel, USA) در 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:

آماس - وزن خشک برگ) = محتوای رطوبت نسبی
 $100 \times (\text{وزن تر برگ} - \text{وزن خشک برگ}) / \text{وزن برگ پس از پایداری غشای سلولی (CMS)}$: در دو مرحله گلدهی و پر شدن غلاف، نمونه‌های برگی از قسمت انتهایی بوته به‌تعداد 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 (C₁). نمونه‌ها مجدداً به‌مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه قرار داده شد و هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شد (C₂). در نهایت شاخص پایداری غشای سلولی از طریق فرمول زیر محاسبه شد:

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

محاسبات بیوشیمیایی: بدین‌منظور نمونه‌های برگی تازه از قسمت انتهایی بوته به‌تعداد 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

نتایج و بحث

صفات زراعی و فیزیولوژیکی

اکسید آهن ۰/۵ درصد و ۱ درصد با ۵/۱ گرم مشاهده شد. کمترین وزن صد دانه در تیمار عدم محلول پاشی ثبت شد. بین تیمارها از نظر ارتفاع بوته تفاوت معنی داری مشاهده نشد. میانگین کلی ارتفاع بوته در این آزمایش برابر ۲۱/۵ سانتی متر بود. کمترین ارتفاع به ترتیب در تیمار عدم محلول پاشی، نانو سولفات روی ۱ درصد و نانو سولفات روی ۰/۵ درصد مشاهده شد.

با توجه به نتایج جدول ۲، بین تیمارها از نظر محتوای رطوبت نسبی، پایداری غشای سلولی، دمای کانوپی، شاخص NDVI و عملکرد اختلاف معنی دار در سطح ۱ درصد و برای وزن صد دانه اختلاف معنی دار 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

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات زراعی و فیزیولوژیکی

Table 2. Analysis of variance for agronomic and physiological traits

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

ns, * and ** respectively non- significant, significant at 5% and 1% level
ns, * and ** به ترتیب غیر معنی دار، معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد

کانوپی شده است. افزایش میزان رطوبت نسبی با به کارگیری 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 آسیب دیده، میزان بالای از نور قرمز را جذب کرده و همچنین نور مادون قرمز را منعکس می کنند و به همین دلیل است که شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) بالاتری دارند (Singh et al., 2017). در این آزمایش نیز بالاترین مقدار شاخص نرمال شده پوشش گیاهی در تیمار نانو اکسید آهن یک درصد یادداشت شد.

تنش خشکی فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی را تحت تاثیر قرار می دهد. به طوری که با افزایش دمای کانوپی و برگ، محتوای آب در گیاه را کاهش داده و باعث کاهش رطوبت برگ و کاهش رطوبت نسبی، کاهش هدایت روزنه ای و سرعت تعرق می شود که در آزمایش حاضر نیز تأیید شده است. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود، پائین ترین محتوای رطوبت نسبی و بالاترین دمای کانوپی در تیمار عدم محلول پاشی یادداشت شده است. در حالی که محلول پاشی نانو اکسید آهن یک درصد، باعث استحصال بالاترین میزان رطوبت نسبی و کمترین دمای

جدول ۳- میانگین صفات زراعی و فیزیولوژیکی

Table 3. Means of agronomic and physiological traits

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

محلول پاشی 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). نادى 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 تأیید کردند. همان طور که در جدول ۴ مشاهده می شود، عملکرد با میزان فعالیت آنزیم

پایداری غشای سلولی از صفات مؤثر بر مدیریت فعالیت های حیاتی گیاه است. همان طور که انتظار می رود، پایین ترین مقدار پایداری غشای سلولی در تیمار عدم محلول پاشی مشاهده شد. در حالی که اعمال نانو اکسید آهن ۱ درصد باعث افزایش ۵۷ درصدی در پایداری غشا شد. محلول پاشی نانو اکسید آهن ۱ درصد باعث ایجاد بالاترین میزان عملکرد (۴۸۰/۲۹ کیلوگرم در هکتار) نیز شد. رتبه های بعدی از نظر عملکرد به ترتیب در

گیاه بنت قنصول و محلول پاشی نانو ذرات اکسید آهن ۳۰ روز پس از جوانه زنی مشاهده شده است (Kaviani *et al.*, 2014). در مطالعه‌ای دیگر طلوعی و همکاران (Tullui *et al.*, 2021) با استفاده از محلول پاشی 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، به ترتیب ۲۵/۶ درصد و ۳۵/۵ درصد افزایش عملکرد مشاهده شده است.

کاتالاز (۰/۸۱)، گلوکاتینون پراکسیداز (۰/۸۸)، سوپراکسید دیسموتاز (۰/۸۰)، پراکسید هیدروژن (۰/۸۲)، مالون دی آلدئید (۰/۹۰)، پرولین (۰/۸۹)، کلروفیل a (۰/۸۳)، کلروفیل b (۰/۶۴)، کارتنوئیدها (۰/۷۴)، وزن صددانه (۰/۵۰)، شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (۰/۸۶)، دمای کانویی (۰/۷۶)، محتوای رطوبت نسبی (۰/۸۴) و پایداری غشای سلولی (۰/۹۵) همبستگی معنی‌دار در سطح یک درصد داشت. تأثیر مثبت کاربرد نانو ذرات اکسید آهن در مراحل مختلف رشدی گیاهان گزارش شده است. همبستگی مثبت بین رشد

جدول ۴- همبستگی بین صفات

Table 4. Correlation between traits

17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1	1
1	1	0.9**	1	0.5**	0.6**	0.4**	0.8**	0.5**	0.36	0.8**	0.5**	0.95**	0.67**	0.60**	0.79**	0.8**	0.82**	0.83**
(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)		

۶ مشاهده می‌شود، نانو ذرات 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 به دلیل حضور آن در ساختار سیتوکرومها در فتوسنتز نقش دارد (Abadia *et al.*, 2002). نتایج علی‌دوست و ایزودا (Alidoust & Isoda, 2013) نیز در تأیید یافته‌های پروژه حاضر است. با توجه به نتایج، استفاده از نانو ذرات باعث افزایش میزان کارتنوئیدها شد. به طوری که در مقایسه با تیمار عدم محلول پاش، 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. به نظر می‌رسد که میزان خاصی از عنصر روی باعث سنتز کارتنوئیدها در تنش 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 به کارگیری نانو ذرات روی در سایر گیاهان نیز گزارش شده است (Wu *et al.*, 2015; Thounaojam, 2014).

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 به دلیل 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 این رو، تغییر در میزان کلروفیل به صورت مستقیم در توانایی پاسخ گیاهان به محیط تأثیرگذار است. با توجه به نتایج جدول ۵، میزان کلروفیل a و b در نتیجه محلول پاشی نانو ذرات افزایش یافته و بالاترین مقدار مربوط به اعمال تیمار نانو سولفات روی ۱ درصد و کمترین مقدار در عدم محلول پاشی 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 به کارگیری نانو ذرات گزارش کردند. همان طور که در جدول

جدول ۵- تجزیه واریانس صفات بیوشیمیایی

Table 5. Analysis of variance for biochemical traits

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

** significant and 1% level

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

آمد (شکل ۲). طلوعی و همکاران (Tullui *et al.*, 2021) افزایش فعالیت آنزیم گلوکاتایون پراکسیداز در نتیجه به کارگیری ترکیب نانو ذرات آهن و روی را در نخود و تحت تنش خشکی گزارش کردند. آنتی اکسیدان های آنزیمی و غیر آنزیمی در مکانیسم دفاع سلولی در پاسخ به رادیکال های 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 می کنند (Roychoudhury *et al.*, 2012; Semida *et al.*, 2021).

محلول پاشی نانوسولفات روی ۱ درصد باعث افزایش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز شد. کمترین میزان فعالیت این آنزیم در عدم محلول پاشی مشاهده شد. یافته های ما و همکاران (Ma *et al.*, 2017) و لیو و همکاران (Liu *et al.*, 2012) تأیید کردند که کاربرد نانو ذرات روی به طور معنی داری باعث افزایش فعالیت آسکوربات پراکسیداز در گندم و ذرت تحت تنش خشکی می شود. فعالیت آنزیم گلوکاتایون پراکسیداز در نتیجه تیمار نانو سولفات روی ۱ و ۰/۵ درصد به طور معنی داری افزایش یافت. همان طور که انتظار می رفت، کمترین میزان فعالیت این آنزیم در شرایط عدم محلول پاشی به دست

جدول ۶- میانگین صفات زراعی و فیزیولوژیکی

Table 6. Means of agronomic and physiological traits

CARs	Chlb	Chla	PRO	MDA	H_2O_2	SOD	GPX	CAT	APX	NO
کارتنوئید	کلروفیل b	کلروفیل a	پروپن	مالون دی آلدئید	پراکسید هیدروژن	سوپراکسید دیسموتاز	گلوکاتایون پراکسیداز	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز	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%

Rhizo Vision Explorer (2.0.3) (شکل ۳) برحسب پیکسل محاسبه گردید. همان طور که در جدول ۷ مشاهده می شود، بالاترین طول ریشه به ترتیب 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. در رابطه با سیستم ریشه ای 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 می توان گفت که کاربرد نانو ذرات تأثیری بر افزایش قطر ریشه نداشته است. در حالی که کاربرد نانو اکسید 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 به کارگیری نانو اکسید آهن ۱ درصد، نانو اکسید آهن ۰/۵ درصد، نانو سولفات روی ۰/۵ درصد و نانو سولفات روی ۱ درصد داشت.

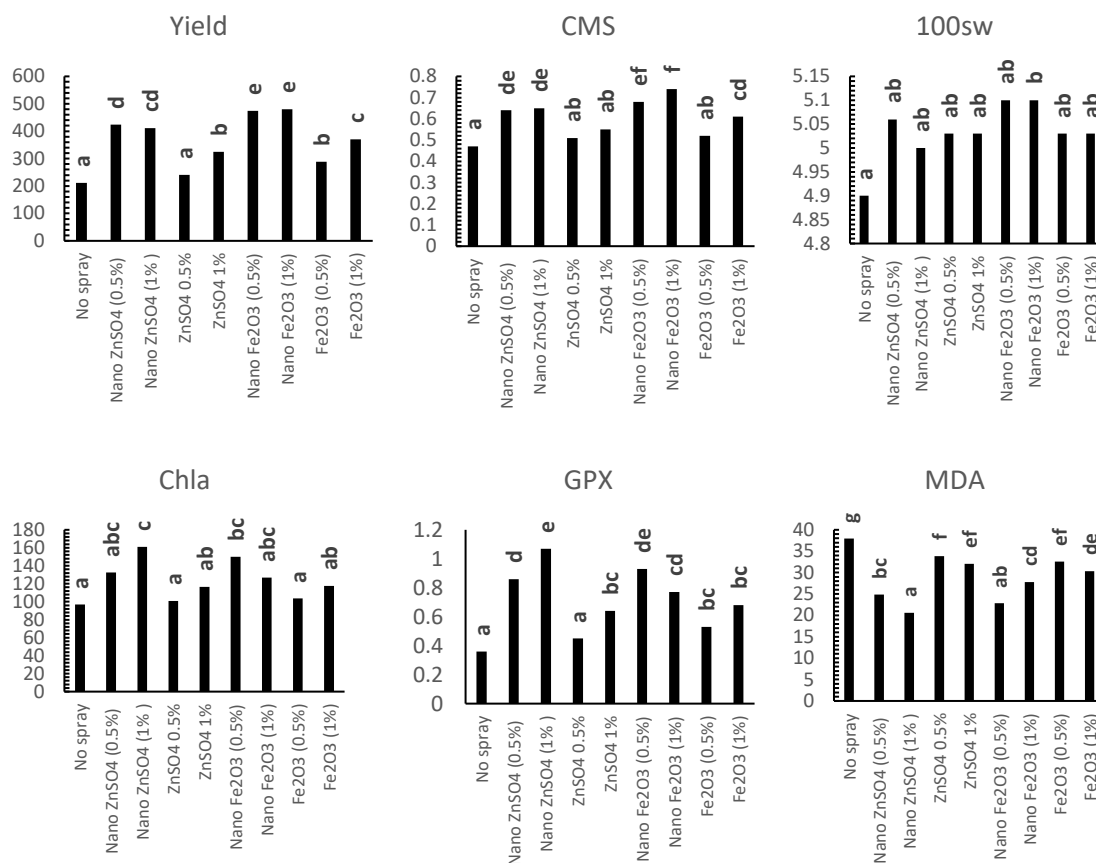
فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز توسط تیمار نانو سولفات روی ۱ درصد بیشترین افزایش را داشت. راجی پوت و همکاران (Rajiput *et al.*, 2021) نیز تأثیر نانو ذرات روی را بر افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در شرایط تنش خشکی را تأیید کردند. بالاترین میزان پراکسید هیدروژن و مالون دی آلدئید در تیمار عدم محلول پاشی مشاهده شد. سایر مطالعات نیز همین نتیجه را در نخود گزارش کردند (Burman *et al.*, 2013., Tului *et al.*, 2021). پروپن از جمله آمینو اسیدهای پایدار در گیاهان است که در نتیجه تنش خشکی به طور طبیعی در گیاهان تجمع می یابد. در شرایط عدم محلول پاشی بالاترین میزان پروپن و به هنگام کاربرد نانو سولفات روی یک درصد، کمترین میزان پروپن مشاهده شد. اما محسن زاده و موسویان (Mohsenzadeh & Mousavian, 2017) تأثیر نانو ذرات اکسید روی را بر افزایش محتوای پروپن گزارش کردند. **بررسی صفات ریشه:** صفات مرتبط با ریشه از جمله طول، قطر متوسط، سطح و حجم با استفاده از نرم افزار

جدول ۷- صفات ریشه در محلول پاشی 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)	Surface area (PX ²)	Avg. diameter (PX)	Length (PX)	Treatment
حجم	سطح	متوسط قطر	طول	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

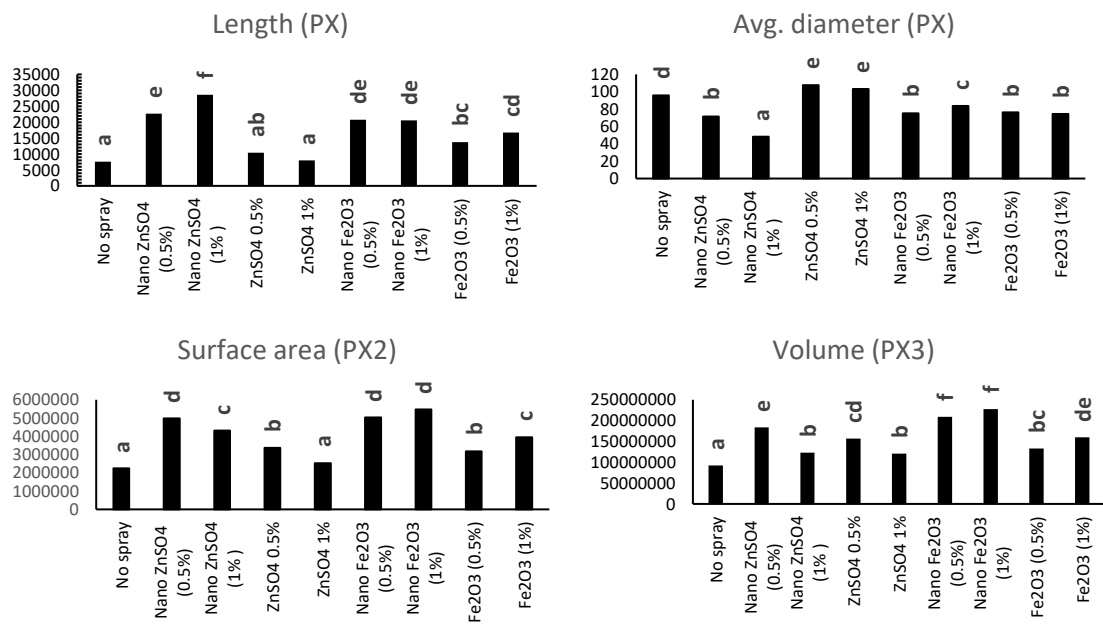


شکل ۱- تاثیر محلول پاشی سطوح مختلف نانوذرات بر صفات زراعی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی و مقایسات میانگین با استفاده از آزمون حداقل اختلافات معنی دار در سطح ۵ درصد

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

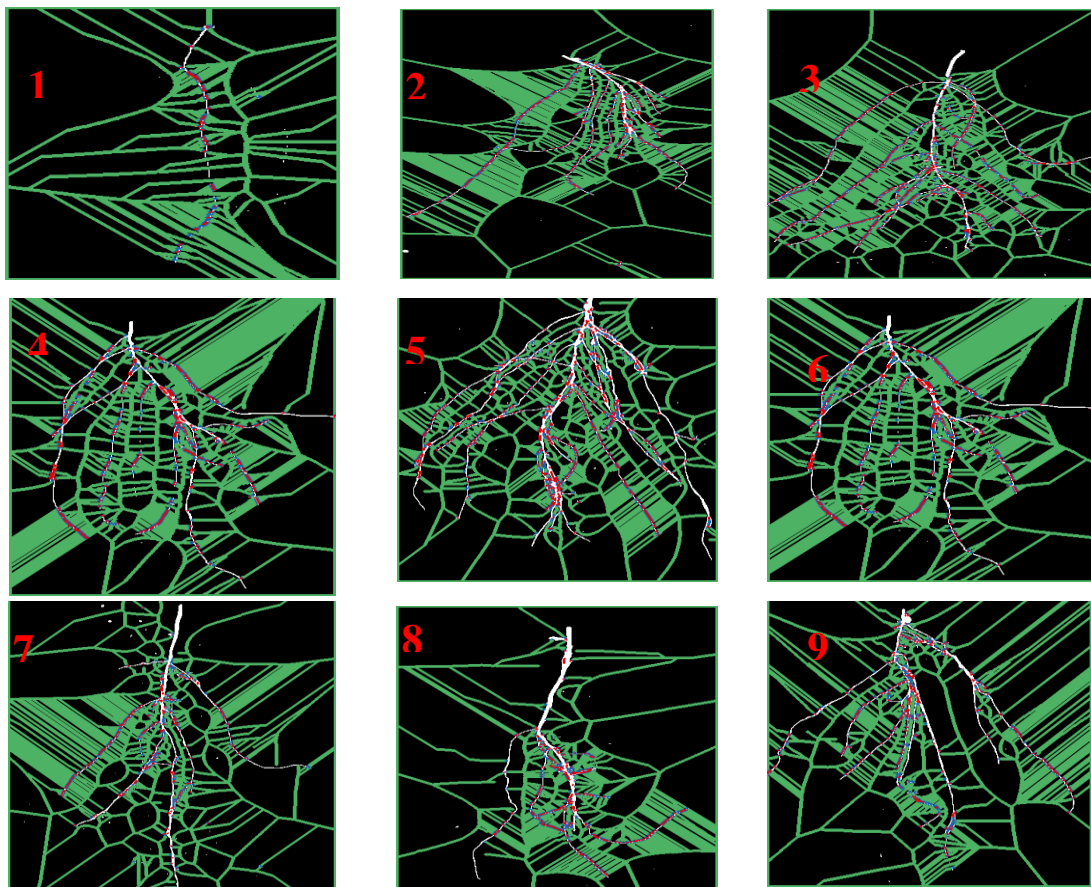
در کل ترکیب نانو اکسید آهن نسبت به نانوسولفات روی در افزایش حجم ریشه مؤثرتر بود. مطالعات اندکی در زمینه ریشه عدس و همچنین ارتباط آن با کاربرد نانوذرات انجام شده است. هر چند در گیاهان دیگر از قبیل ذرت، آراییدوپسیس، نعنای نمونه‌هایی گزارش شده است (Asli & Neumann, 2009; Gopalakrishnan & Chung, 2014; Samadi *et al.*, 2014). تاثیر کاربرد ذرات نانو سیلیکون و نانو سلنیوم به صورت محلول پاشی 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).

طول ریشه عدس به ترتیب 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 محلول پاشی و اعمال نانو اکسید آهن ۱ درصد (۲۲۷۴۴۸۰۷۸/۲) متغیر بود.



شکل ۲- تاثیر محلول پاشی سطوح مختلف نانوذرات بر طول، متوسط قطر، سطح و حجم ریشه عدس و مقایسات میانگین با استفاده از آزمون حداقل اختلافات معنی دار 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- نمونه های ریشه با نرم افزار Rhizo Vision تجزیه شدند (تصاویر متعلق به نمونه های تکرار اول آزمایش است)
 Figure 3. Root samples were analyzed with Rhizo Vision software (samples belong to the first replication of the experiment)

نتیجه‌گیری

است. از طرف دیگر عنصر آهن جز تشکیل دهنده و کوفاکتور آنزیم‌های مختلف بوده و برای فرآیندهای فیزیولوژیکی از جمله بیوسنتز کلروفیل، توسعه کلروپلاست، تعلق، واکنش‌های احیا و متابولیسم اسیدهای نوکلئیک تاثیرگذار است (Mimmo *et al.*, 2014). تاثیر 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 تاثیر را بر صفات زراعی و فیزیولوژیکی داشت. در حالی که 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 حالی که نانو ذرات اکسید آهن در بهبود سطح و حجم ریشه مؤثر می‌باشد.

زراعت بهاره عدس در مناطق سردسیر عمدتاً با تنش خشکی آخر فصل همراه است. تنش خشکی مهم‌ترین تنش غیرزیستی است که به‌طور قابل توجهی 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 تاثیر مثبت در رشد و نمو و عملکرد گیاه دارد. همچنین این عنصر از میکروالمنت‌های درگیر در سنتز تریپتوفان است. این اسیدآمین به‌عنوان پیش‌ساز ایندول استیک اسید، یعنی یک فیتوهورمون مسئول در تقسیم سلولی می‌باشد. عنصر روی همچنین به‌عنوان بهبودگر تأثیرات منفی تنش‌های غیرزیستی

References

- Abadia, J., Fernandez, A. A., Morales, F., Sanz, M., & Abadia, A. (2002). Correction of iron chlorosis by foliar sprays. *Acta Horti*, 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., Kassae, 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., Fujitani, 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., & Seyed, 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.

- 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.
- Mahdiah, 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 radiate* 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., Ayneband, 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., Papanthanasidou, F., Vlachostergios, D., Mylonas, I., Kargiotidou, A., Pankou, C. H., Papadopoulos, 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 nanoparticles in 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.

- 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 (*Coriandrum 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.