University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research
Vol. 15, No. 2, Summer 2025 (149-166)
doi: 10.22124/CR.2025.30629.1866
pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115

RESEARCH PAPER **OPEN ACCESS**

Enhancing the physiological characteristics and yield of maize (*Zea mays* L.) with the soil application and spraying of zinc under different moisture conditions

Fariborz Shekari[1], Amin Abbasi[2], Farid Shekari[3] and Maryam Mohammadzadeh[*4]

1. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran
2. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran
3. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran
4. Ph. D. Graduate, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran ([*] Corresponding author: mohammadzadeh.m73@gmail.com)

Comprehensive abstract

Introduction

Water deficit is the most significant environmental stress that limits plant growth in the world. Meanwhile, zinc is recognized as a vital micronutrient that plays a crucial role in the normal growth of plants. Its application has been shown to enhance both the quantity and quality of agricultural products by increasing the photosynthesis rate, activity of antioxidant enzymes, and some osmolyte compounds such as proline. This enhancement can mitigate the adverse effects of environmental stresses, including drought. In the present study, the effects of various amounts and methods of zinc application were investigated on the activity of antioxidant enzymes as well as the growth and grain yield of maize under drought stress conditions. The aim of this experiment was to improve the physiological aspects, growth and yield of maize under various droght conditions.

Materials and methods

This research was conducted as split-plot in a randomized complete block design with three replications in research field of the Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran, in 2020. The maize variety studied in this research was grain maize SC704, belonging to the late-maturing group with a growing period of 125 to 135 days. The main factor included drought stress at three levels (by applying irrigation at 90%, 60%, and 30% of field capacity) and sub-factor was the rates and methods of zinc application at six levels (including no zinc application, soil application of zinc sulfate at 10 and 25 $kg.ha^{-1}$, and foliar application of 5 $g.Lit^{-1}$ zinc at stem elongation, tassel emergence and milking stages. The characteristics evaluated in this study included grain iron, zinc, and phosphorus concentrations, the activity of antioxidant enzymes of catalase, ascorbate peroxidase, guaiacol peroxidase, and superoxide dismutase, as well as proline content, malondialdehyde content, hydrogen peroxide concentration, leaf chlorophyll index, leaf area index, grain yield, and biological yield. Data analysis including analysis of variance and comparison of means by least significant difference (LSD) test at a probability level of 5% were performed using SAS software version 9.3, and graphs were drawn using Excel software.

Research findings

The results of the analysis of variance showed that the effect of drought stress and application of zinc was significant on all evaluated traits in the SC704 variety. The interaction of zinc×drought stress was also significant on all evaluated traits, except grain yield and biological yield. The results showed

that drought stress significantly reduced the grain iron, zinc, and phosphorus concentrations, the activity of antioxidant enzymes including superoxide dismutase, guaiacol peroxidase, catalase, and ascorbate peroxidase, as well as leaf chlorophyll index and leaf area index in the SC704 variety. On the other hand, hydrogen peroxide, malondialdehyde, and proline contents increased by 197%, 256% and 129%, respectively, with increasing drought stress intensity. In contrast, the application of zinc with enhancing these traits, led to decrease in the production of hydrogen peroxide and malondialdehyde. Furthermore, drought stress reduced grain yield and biological yield, but zinc application especially soil application of 25 $kg.ha^{-1}$, significantly improved the grain yield and biological yield of SC704 variety by 62% and 44%, respectively.

Conclusion

The findings of this study showed that drought stress, especially at high intensities, by disrupting the absorption of nutrient from the soil, soil, led to a decrease in the concentration of grain elements, leaf area index, leaf chlorophyll index, and antioxidant enzyme activities, and an increase in proline content. In contrast, the application of zinc, especially its soil application of $kg.ha^{-1}$, by changing (intensifying) the mentioned traits, improved the physiological and morphological aspects and grain yield of maize, so that its application under moderate drought stress reduced hydrogen peroxide and malondialdehyde contents, and increased proline content and antioxidant enzymes activities. Also, the results of this experiment showed that foliar application of zinc was more effective in increasing the concentration of grain elements than soil application.

Keywords: Antioxidant enzymes, Chlorophyll index, Grain mineral concentration, Hydrogen peroxide, Phenological stages, Proline

Received: May 10, 2025 Accepted: July 27, 2025

Cite this article:

Shekari, F., Abbasi, A., Shekari, F., & Mohammadzadeh, M. (2025). Enhancing the physiological characteristics and yield of maize (*Zea mays* L.) through the soil application and spraying of zinc under different moisture conditions. *Cereal Research*, *15*(2), 149-166. doi: 10.22124/CR.2025.30629.1866.

تحقیقات غلات
دوره پانزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۴ (۱۶۶-۱۴۹)
doi: 10.22124/CR.2025.30629.1866

مقاله پژوهشی
دسترسی آزاد

بهبود جنبه‌های فیزیولوژیک و عملکرد ذرت (*Zea mays* L.) با کاربرد خاکی و افشانه کردن عنصر روی تحت شرایط متفاوت رطوبتی

فریبرز شکاری[۱]، امین عباسی[۲]، فرید شکاری[۳] و مریم محمدزاده[۴*]

۱- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
۳- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
۴- دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
(* نویسنده مسئول: mohammadzadeh.m73@gmail.com)

چکیده جامع

مقدمه: کمبود آب مهم‌ترین عامل تنش‌زای محیطی است که رشد گیاهان را در جهان محدود می‌سازد. از سوی دیگر، عنصر روی به‌عنوان یک ریزمغذی ضروری برای رشد طبیعی گیاهان شناخته می‌شود. مشخص شده است که کاربرد عنصر روی، علاوه بر افزایش کمیت و کیفیت محصولات تولیدی، به‌واسطه افزایش فعالیت فتوسنتزی و همچنین افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و ترکیبات اسمولیت از جمله پرولین، در کاهش اثرات زیان‌بار تنش‌های محیطی از جمله تنش خشکی در گیاهان تأثیرگذار است. در پژوهش حاضر، تأثیر مقادیر مختلف و روش‌های گوناگون کاربرد عنصر روی بر میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و همچنین رشد و عملکرد ذرت در رویارویی با تنش خشکی بررسی شد. هدف از اجرای آزمایش، بهبود جنبه‌های فیزیولوژیک، رشد و عملکرد ذرت تحت شرایط متفاوت رطوبتی بود.

مواد و روش‌ها: این آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در کشتزار پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان در سال ۱۳۹۹ انجام شد. رقم ذرت مورد مطالعه در این پژوهش، ذرت دانه‌ای رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ متعلق به گروه دیررس با طول دوره رویش ۱۲۵ الی ۱۳۵ بود. تنش خشکی با اعمال آبیاری در سه سطح شامل ۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی، به‌ترتیب به‌عنوان شرایط عدم تنش، تنش متوسط و تنش شدید، به‌عنوان عامل اصلی آزمایش و مقادیر و روش‌های کاربرد عنصر روی در شش سطح شامل عدم مصرف روی، کاربرد خاکی سولفات روی در مقادیر ۱۰ و ۲۵ کیلوگرم در هکتار، افشانه‌کردن در مراحل ساقه‌روی، ظهور تاسل و مرحله شیری دانه به‌میزان پنج گرم در لیتر به‌عنوان عامل فرعی آزمایش در نظر گرفته شد. صفات ارزیابی شده در این پژوهش، شامل غلظت آهن، روی و فسفر دانه، میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گایاکول پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز، محتوای پرولین، پراکسید هیدروژن، مالون دی‌آلدئید، شاخص کلروفیل برگ، شاخص سطح برگ، عملکرد دانه و عملکرد زیست‌توده بودند. تجزیه و تحلیل داده‌ها از جمله تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه 9.3) و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شد.

یافته‌های تحقیق: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تنش خشکی و کاربرد عنصر روی بر تمامی ویژگی‌های ارزیابی شده در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ معنی‌دار بود. برهم‌کنش عنصر روی × تنش خشکی نیز بر تمامی ویژگی‌های ارزیابی

شده، به‌جز عملکرد دانه و عملکرد زیست‌توده معنی‌دار شد. نتایج این آزمایش نشان داد که وقوع تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار غلظت آهن، روی و فسفر دانه، میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شامل سوپراکسیددیسموتاز، گایاکول پراکسیداز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز و همچنین شاخص کلروفیل برگ و شاخص سطح برگ در رقم سینگل کراس ۷۰۴ شد. از سوی دیگر، با افزایش شدت تنش خشکی، میزان پراکسید هیدروژن، مالون دی‌آلدئید و پرولین به‌ترتیب به‌میزان ۱۹۷، ۲۵۶ و ۱۲۹ درصد افزایش یافت. در مقابل، کاربرد روی با بهبود صفات ذکر شده، موجب کاهش تولید پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید شد. افزون بر این، تنش خشکی، عملکرد دانه و عملکرد زیست‌توده رقم سینگل کراس ۷۰۴ را کاهش داد، اما کاربرد روی به‌ویژه کاربرد خاکی روی به‌میزان ۲۵ کیلوگرم در هکتار موجب بهبود معنی‌دار عملکرد دانه و عملکرد زیست‌توده این رقم به‌ترتیب به‌میزان ۶۲ و ۴۴ درصد شد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که با بروز تنش خشکی به‌ویژه در شدت‌های بالای تنش، به‌دلیل ایجاد اختلال در جذب عناصر غذایی از خاک، غلظت عناصر دانه، شاخص سطح برگ، شاخص کلروفیل برگ و میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاهش یافت، در حالی‌که تنش خشکی باعث افزایش میزان پرولین شد. در مقابل، کاربرد عنصر روی به‌ویژه کاربرد خاکی آن به‌میزان ۲۵ کیلوگرم در هکتار با تغییر (تشدید) صفات ذکرشده، موجب بهبود جنبه‌های فیزیولوژیک، ریخت‌شناختی و عملکرد ذرت شد، به‌طوری که کاربرد آن در تنش متوسط خشکی، میزان پراکسیدهیدروژن و مالون دی‌آلدئید را کاهش و میزان پرولین و میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را افزایش داد. همچنین، نتایج این آزمایش نشان داد که افشانه‌کردن روی در افزایش غلظت عناصر دانه موثرتر از کاربرد خاکی بود.

واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، پراکسید هیدروژن، پرولین، شاخص کلروفیل، غلظت عناصر دانه، مراحل فنولوژیک

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵

نحوه استناد به این مقاله:

شکاری، فریبرز، عباسی، امین، شکاری، فرید، و محمدزاده، مریم. (۱۴۰۴). بهبود جنبه‌های فیزیولوژیک و عملکرد ذرت (*Zea mays* L.) با کاربرد خاکی و افشانه کردن عنصر روی تحت شرایط متفاوت رطوبتی. *تحقیقات غلات*، *۱۵*(۲)، ۱۶۶-۱۴۹.
doi: 10.22124/CR.2025.30629.1866

مقدمه

ذرت (*Zea mays* L.) از ارزش‌مندترین گیاهان زراعی جهان به‌شمار می‌آید که به‌دلیل دارا بودن فعالیت‌های رشدی و متابولیک بالا، حساسیت بیش‌تری نسبت به کمبود عنصر روی (Martínez-Cuesta *et al*., 2021) و تنش خشکی (Aslam *et al*., 2015) دارد. تنش خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود که بروز آن صرف نظر از دوره رشدی گیاه، می‌تواند عملکرد دانه را به‌طور چشم‌گیری کاهش دهد. بروز این تنش موجب فعال شدن شماری از پاسخ‌های مولکولی، بیوشیمیایی و فیزیولوژیک در گیاهان جهت غلبه بر اثرات زیان‌بار تنش می‌شود (Oguz *et al*., 2022). یکی از دلایل عمده کاهش کمیت و کیفیت محصولات زراعی در چنین مواقعی، تولید گونه‌های فعال اکسیژن و بروز تنش‌های اکسیداتیو است. در وضعیت عادی رشد، به‌دلیل جمع‌آوری گونه‌های فعال اکسیژن توسط ساز و کارهای دفاعی، از بروز تنش‌های اکسیداتیو جلوگیری می‌شود. این در حالی است که در شرایط تنش، به‌دلیل افزایش میزان تولید این گونه‌ها، بروز تنش اکسیداتیو امری طبیعی به‌شمار می‌آید. در چنین شرایطی، یاخته‌های گیاهی برای کاستن از اثرات سوء تنش‌های اکسیداتیو از سازگان‌های دفاعی گوناگونی مانند آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیر آنزیمی (Ashraf *et al*., 2019) بهره می‌گیرند.

عنصر روی به‌عنوان یک ریزمغذی برای رشد طبیعی گیاهان زراعی ضروری محسوب می‌شود و افزون بر بالا بردن کمیت و کیفیت محصولات تولیدی، به‌واسطه دخالت این عنصر در سنتز و ساختمان برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، می‌تواند در کاهش اثرات تنش‌های محیطی از جمله تنش خشکی تأثیرگذار باشد (Shoormij *et al*., 2024). در رابطه با تغییرات میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و عملکرد دانه با کاربرد عنصر روی در شرایط تنش خشکی، آشکار شده است که اعمال تنش موجب کاهش معنی‌دار تعداد دانه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد زیست‌توده و کلروفیل کل می‌شود (Ahmadi *et al*., 2022; Qamari *et al*., 2023). در مقابل، کاربرد روی باعث افزایش محتوای پرولین، پایداری غشا، فعالیت آنزیم‌هایی مانند سوپراکسید دیسموتاز و در نتیجه افزایش تحمل به تنش خشکی خواهد شد (Karami *et al*., 2016). در ارتباط با تأثیر عنصر روی بر گیاه گندم، گزارش شده است که کاربرد این عنصر موجب افزایش معنی‌دار شمار سنبله در متر مربع، شمار دانه در سنبلچه، میزان روی دانه و عملکرد زیست‌توده شد (Shekari *et al*., 2015). نتایج مطالعه دیگری در گیاه ذرت تحت شرایط خشکی نشان داد که وقوع تنش موجب کاهش رشد، بسته شدن روزنه‌ها و کاهش میزان فتوسنتز شد، با این‌حال، کاربرد نانو اکسید روی در شرایط تنش منجر به افزایش فتوسنتز، رشد گیاه، هدایت روزنه‌ای، میزان تعرق و جلوگیری از تخریب رنگدانه‌های فتوسنتزی شد (Sun *et al*., 2021). در پژوهش دیگری، وقوع تنش خشکی موجب کاهش عملکرد دانه، اجزای عملکرد و میزان کلروفیل برگ در ذرت شد و افشانه‌کردن عنصر روی تحت شرایط خشکی موجب بهبود چشم‌گیر همه ویژگی‌های فوق شد. همچنین، گزارش شده است که تنش خشکی به‌طور معنی‌داری باعث افزایش میزان پراکسید هیدروژن و رادیکال سوپراکسید و در نهایت افزایش میزان مالون دی‌آلدئید شد، ولی افشانه‌کردن عنصر روی با افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، میزان پراکسید هیدروژن، رادیکال سوپر اکسید و مالون دی‌آلدئید را کاهش داد و موجب افزایش رشد و تاب‌آوری گیاه نسبت به شرایط تنش شد (Shemi *et al*., 2021). ال‌شاملی و همکاران (Elshamly *et al*., 2024) نیز گزارش کردند که کاربرد خاکی کلات روی در ذرت تحت تنش خشکی موجب افزایش معنی‌دار جذب عناصر روی، آهن و مس شد. همچنین، کاربرد روی در این شرایط موجب تنظیم فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز شد.

با توجه به این‌که خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله ایران، به‌دلیل آهکی بودن، pH بالا و مواد آلی پایین، با کمبود عناصر ریزمغذی به‌ویژه روی مواجه هستند (Roozitalab *et al*., 2018)، بنابراین کمبود این عنصر همواره به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم موثر بر کمیت و کیفیت محصولات زراعی مطرح بوده است (Qamari *et al*., 2023). در این راستا، این آزمایش انجام شد که هدف از آن، برآورد میزان آسیب وارد شده به گیاه ذرت با اعمال تنش خشکی کنترل شده، ارزیابی اثرات کاربرد روی بر کارکردهای گیاهی در شرایط بدون تنش و بروز تنش، مقایسه کاربرد خاکی در مقابل افشانه‌کردن عنصر روی و یافتن بهترین غلظت روی به‌همراه بهترین روش کاربرد این عنصر بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در کشتزار پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان واقع در عرض جغرافیایی °۳۶ و ′۴۱ شمالی و طول °۴۸ و ′۲۷ شرقی با ارتفاع ۱۶۴۰ متری از سطح دریا در سال ۱۳۹۹ انجام شد. قبل از اجرای آزمایش، نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متری تهیه و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اندازه‌گیری شد (جدول ۱). طبق نتایج آزمون خاک، مودهای سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم به‌ترتیب به‌میزان ۱۷۵ و ۳۰ کیلوگرم در هکتار پیش از کاشت به خاک افزوده شد. در این پژوهش از ذرت دانه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴ متعلق به گروه دیررس با طول دوره رویش ۱۲۵ الی ۱۳۵ استفاده شد. آزمایش در قالب کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل‌های مورد بررسی، تنش خشکی در سه سطح شامل ۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی (به‌ترتیب به‌عنوان شرایط عدم تنش، تنش متوسط و تنش شدید) به‌عنوان عامل اصلی و مقادیر و روش‌های کاربرد عنصر روی شامل عدم کاربرد روی، کاربرد خاکی سولفات روی در مقادیر ۱۰ و ۲۵ کیلوگرم در هکتار پس از کاشت به‌صورت نواری در دو طرف ردیف‌های کاشت، و افشانه‌کردن سولفات روی در مراحل ساقه‌روی، ظهور تاسل و مرحله شیری دانه (به‌ترتیب کدهای V9، VT و R3، بر پایه روش کدبندی Zhao *et al*., 2012) به‌میزان پنج گرم در لیتر (Lamlom *et al*., 2024) به‌عنوان عامل فرعی بودند. گزارش شده است که سطح بحرانی عنصر روی در ذرت در دامنه کم‌تر از ۱۵ تا ۲۰ قسمت در میلیون (ppm) است (Mutambu *et al*., 2023). ابعاد هر کرت آزمایشی در این پژوهش، سه در چهار متر و فاصله بین ردیف‌ها و روی ردیف‌ها به‌ترتیب ۷۵ و ۲۰ سانتی‌متر بود. عملیات کاشت و برداشت نیز به‌ترتیب در ۱۵ اردیبهشت و ۱۰ مهر انجام گرفت.

اعمال تنش خشکی

به‌منظور اعمال تنش خشکی، همه تیمارها تا مرحله پیش از ساقه‌روی با استفاده از روش قطره‌ای آبیاری شدند. میزان آب آبیاری برای هر سطح تنش با اندازه‌گیری رطوبت خاک تا ۴۰ سانتی‌متری عمق خاک در کلیه مراحل رشد تعیین شد. برای این‌کار، رطوبت وزنی خاک با قرارگیری نمونه‌ها در آون در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس به‌مدت پنج ساعت، تعیین و سپس حجم آب ورودی با شیرهای تعبیه شده و کنتور حجمی، کنترل شد. چگالی ظاهری خاک نیز ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب لحاظ شد. رطوبت وزنی خاک در ظرفیت زراعی، ۳۰ درصد و برای ۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۲۷، ۱۸ و ۹ درصد بود. حجم آب مصرفی برای سطح تنش ۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۱۵۱۲، ۱۰۰۸ و ۵۰۴ متر مکعب در هکتار بود.

اندازه‌گیری ویژگی‌های ریخت‌شناختی، عملکرد دانه و زیست‌توده

برای اندازه‌گیری شاخص سطح برگ، هفت بوته تصادفی از هر کرت در مرحله خمیری دانه، گزینش و سپس سطح برگ با دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ (Delta T Devices Ltd., UK) سنجش و به سطح زمین اشغال شده توسط گیاه تقسیم و شاخص سطح برگ محاسبه شد (Hunt, 1983). شاخص کلروفیل برگ نیز با دستگاه SPAD-502 (Minolta, Japan) تعیین شد (Qamari *et al*., 2023). عملکرد دانه و زیست‌توده نیز در مرحله بلوغ فیزیولوژیک، زمانی‌که انباشت ماده خشک در دانه‌ها متوقف و دانه‌ها در حال خشک شدن بودند، اندازه‌گیری شد. برای این‌کار، نمونه‌ها به‌طور تصادفی از خطوط میانی (دو متر مربع از هر کرت) برداشت و تا رسیدن به رطوبت صفر درصد در آون با دمای ۷۵ درجه سلسیوس نگهداری و سپس توزین شدند.

جدول ۱- نتایج تجزیه فیزیکو شیمیایی نمونه خاک محل اجرای پژوهش

Table 1. Results of physical and chemical analysis of the soil sample of the research area

Soil characteristics	Amount (unit)	Soil characteristics	Amount (unit)
Available P	9.45 ($mg.kg^{-1}$)	pH	7.86
Available K	275 ($mg.kg^{-1}$)	Electrical conductivity	1.38 ($dS.m^{-1}$)
Available Zn	0.46 ($mg.kg^{-1}$)	$CaCO_3$	374 ($mg.kg^{-1}$)
Available S	275 ($mg.kg^{-1}$)	Organic carbon	9.95 ($g.kg^{-1}$)
Available Fe	5.16 ($mg.kg^{-1}$)	Total Nitrogen	850 ($mg.kg^{-1}$)
Available Cu	1.37 ($mg.kg^{-1}$)	Soil texture	Clay loam

استخراج و اندازه‌گیری آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، پرولین، پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید

به‌منظور استخراج آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، ۰/۵ گرم نمونه برگی از برگ زیرین برگ پرچم در مرحله خمیری دانه تهیه و در هاون چینی با نیتروژن مایع همگن و در دمای ۴ درجه سلسیوس به‌مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد (Sairam *et al*., 1998). میزان فعالیت آنزیم کاتالاز طبق روش آیبی (Aebi, 1984)، آسکوربات پراکسیداز به‌روش سایرام و همکاران (Sairam *et al*., 1998)، گایاکول پراکسیداز به‌روش یوشیمورا (Yoshimura, 2000) و سوپراکسید دیسموتاز به‌روش سایرام و همکاران (Sairam *et al*., 2002)، اندازه‌گیری شد. تعیین میزان پرولین به‌روش بیتس و همکاران (Bates *et al*., 1973)، مالون‌دی‌آلدئید به‌روش استوارت و بیولی (Stewart & Bewley, 1980) و پراکسید هیدروژن نیز به‌روش چن و همکاران (Chen *et al*., 2000) انجام شد.

اندازه‌گیری غلظت عناصر دانه

میزان فسفر، روی و آهن دانه با روش هضم مرطوب اندازه‌گیری شد. ۰/۳ گرم نمونه گیاهی پس از خشک شدن، آسیاب و سپس با ۶ گرم اسید سالیسیلیک، ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۹۸ درصد و ۱۸ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط شد (Walinga *et al*., 1995). میزان آهن و روی با استفاده از دستگاه جذب اتمی (Varian 220 AA, Australia) قرائت شد و سپس بر حسب میلی‌گرم بر گرم ماده خشک گزارش شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

تمامی تجزیه و تحلیل‌های آماری در این پژوهش با سه بار تکرار مستقل انجام گرفت. قبل از تجزیه واریانس، نرمال بودن توزیع خطاها و افزایشی بودن اثر بلوک و تیمار بررسی شد. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه 9.3) و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تنش خشکی و تیمارهای روی بر تمامی ویژگی‌های ارزیابی شده در ذرت رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. برهم‌کنش تنش خشکی × عنصر روی نیز بر تمامی ویژگی‌های ارزیابی شده، به‌جز عملکرد دانه و عملکرد زیست‌توده معنی‌دار شد (جدول ۲).

غلظت عناصر دانه

اعمال تنش خشکی موجب کاهش میزان غلظت عناصر فسفر، روی و آهن دانه شد (جدول ۳). کاربرد روی توانست غلظت این عناصر به‌جز فسفر دانه را بهبود دهد. به‌طور کلی، بیش‌ترین میزان فسفر دانه از عدم کاربرد روی در شرایط عدم تنش و کم‌ترین میزان آن از افشانه کردن روی در مراحل گوناگون در شدت بالای تنش به‌دست آمد. همچنین، بیش‌ترین غلظت روی و آهن دانه با افشانه کردن روی در مراحل ساقه‌روی، ظهور تاسل و شیری دانه در شرایط عدم تنش و کم‌ترین میزان این عناصر از عدم کاربرد روی و کاربردی خاکی روی (۱۰ و ۲۵ کیلوگرم درهکتار) در شرایط تنش شدید حاصل شد (جدول ۳). کاهش در میزان عناصر موجود در بافت‌های گیاه نظیر دانه می‌تواند به‌دلیل کاهش گیاه در دسترسی به آب و اختلال در جذب و انتقال عناصر باشد (Hussain *et al*., 2019). افزون بر این، کاهش فراهمی عناصر غذایی در گیاه تحت شرایط خشکی می‌تواند ناشی از اختلال در جذب عناصر غذایی و سازوکارهای بارگیری و تخلیه در آوندها و کاهش جریان انتقال باشد (Qiao *et al*., 2024). از سوی دیگر، نتایج این پژوهش حاکی از تأثیر مثبت کاربرد روی در افزایش غلظت عناصری مانند روی و آهن در دانه بود. افزایش انباشت روی و آهن در دانه به‌دنبال کاربرد عنصر روی در گیاه می‌تواند به‌دلیل اثرات پلیوتروپیک یا پیوستگی ژن‌های مسئول انباشت آهن و روی در دانه‌ها باشد (Xia *et al*., 2019). گزارش‌های مشابهی از اثر کاربرد روی بر افزایش غلظت روی در دانه رقم‌های گندم (Qamari *et al*., 2023) و گلرنگ (Ahmadi *et al*., 2024) و وجود دارد. نتایج مطالعه ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi *et al*., 2021) در مورد کاربرد عنصر روی بر میزان غلظت عناصر دانه در گندم نیز نشان داد که افشانه کردن این عنصر موجب افزایش معنی‌دار غلظت آهن و روی در دانه نسبت به شاهد شد. همچنین، ایشان دریافتند که افزایش عناصر غذایی دانه با کاربرد روی در مراحل گوناگون رشد گیاه (پنجه‌زنی، ساقه‌روی و پر شدن دانه) وابسته به ارتباطات میان آوند چوب و آبکش در گل‌آذین گیاه و تبادل

مناسب عناصر بین آن‌ها است. لیو و همکاران (Liu *et al*., 2020) گزارش کردند که کاربرد روی در گیاه ذرت باعث افزایش محتوای پروتئین، روی، عملکرد دانه و زیست‌توده شد. نتایج مطالعه دیگری نشان داد که افشانه کردن سولفات روی در مقایسه با کاربرد خاکی و عدم کاربرد روی، به‌طور قابل توجهی محتوای روی دانه در ذرت را افزایش داد و همچنین، تاثیر افشانه کردن روی در مراحل پایانی رشد گیاه (مرحله گرده‌افشانی) در مقایسه با افشانه کردن آن در مرحله رویشی (۹ برگی) بیش‌تر بود (Tariq *et al*., 2014). از سوی دیگر، کاهش در میزان فسفر دانه می‌تواند ناشی از کاهش نسبت مولی فیتات دانه (به‌عنوان ترکیب اصلی اندوخته‌ای فسفر در غلات)، به روی در گیاهان تیمار شده با عنصر روی باشد (Cakmak *et al*., 2010).

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر کاربرد روی بر صفات مورفوفیزیولوژیک ذرت تحت شرایط تنش خشکی

Table 2. Results of analysis of variance of the effect of Zn application on maize morphophysiological characteristics under drought stress conditions

Source of variation	df	Mean square							
		Grain P content	Grain Zn content	Grain Fe content	CAT	APX	GPX	SOD	Proline
Replication (R)	2	0.00002	0.29	0.43	6.35	0.01	0.67	19.57	2.51
Drought stress (A)	2	0.04**	287.9**	2005.76**	827026.35**	29.20**	16512.06**	63952.30**	5788.92 **
R × A	4	0.00003	0.125	0.36	285.66	0.01	2.56	9.32	2.27
Zn (B)	5	0.002**	9.79**	10.99**	5548.65**	0.55**	117.41**	622.25**	87.51 **
A × B	10	0.0001**	0.87*	0.79**	4933.77**	0.39**	94.50**	463.39**	77.20 **
Error	30	0.00002	0.36	0.23	75.96	0.006	3.90	14.78	3.16
CV (%)	-	2.10	4.66	2.58	1.46	3.35	4.59	2.21	3.28

^{ns}, * and ** Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

Table 2. Continued

جدول ۲- ادامه

Source of variation	df	Mean square					
		Chl (SPAD)	LAI	H_2O_2	MDA	Grain yield	Biologycal yield
Replication (R)	2	4.31	0.03	0.118	189.80	0.911	2.19
Drought stress (A)	2	825.14**	128.86**	102.309**	115381.02**	46.264**	948.87**
R × A	4	6.21	0.03	0.28	142.52	0.304	0.47
Zn (B)	5	31.04**	2.47**	1.191**	18701.45**	8.367**	52.96**
A × B	10	5.79**	0.49**	0.46**	4089.31**	0.335 ^{ns}	7.16 ^{ns}
Error	30	1.81	0.08	0.10	77.70	0.487	6.18
CV (%)	-	3.30	5.72	6.99	4.99	13.30	14.62

^{ns}, * and ** Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان

بیش‌ترین میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان از جمله سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز و گایاکول پراکسیداز مربوط به کاربرد خاکی ۲۵ کیلوگرم در هکتار روی در شرایط تنش متوسط بود (جدول ۳). کم‌ترین میزان فعالیت این آنزیم‌ها نیز از تیمارهای گوناگون کاربرد روی در شرایط تنش شدید به‌دست آمد. همچنین، نتایج نشان داد که با آغاز تنش خشکی تا حد متوسط، نخست میزان فعالیت آنزیم‌های مزبور افزایش یافت و سپس با افزایش شدت تنش، از میزان فعالیت آن‌ها کاسته شد. در همین راستا، کاربرد ۲۵ کیلوگرم در هکتار روی نسبت به عدم کاربرد روی در شرایط تنش متوسط، به‌ترتیب موجب افزایش ۲۲، ۶۹ ، ۲۷ و ۴۵/۵ درصدی فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز و گایاکول پراکسیداز شد (جدول ۳).

آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به‌عنوان نخستین عامل دفاعی، رادیکال سوپراکسید را به پراکسید هیدروژن تبدیل می‌کند (Mittler *et al*., 2004). سحا و همکاران (Saha *et al*., 2020) در بررسی خود روی گیاه برنج تحت تنش خشکی، افزایش در میزان فعالیت این آنزیم را گزارش کردند. در پژوهش حاضر نیز با افزایش شدت تنش تا حد متوسط، میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز افزایش یافت، ولی با افزایش شدت تنش در ۳۰ درصد ظرفیت زراعی، از میزان

فعالیت آن کاسته شد. نتایج به‌دست آمده همسو با نتایج محمدزاده و همکاران (Mohamadzadeh *et al*., 2023) در گیاه نخود بود. دلیل این کاهش، آسیب به ساختار پروتئینی آنزیم گزارش شده است. این پژوهش‌گران افزایش در میزان فعالیت این آنزیم با کاربرد روی را نیز گزارش کردند (Mohamadzadeh *et al*., 2023). مطابق با نتایج مطالعه حاضر، افزایش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز در ذرت با کاربرد روی در شرایط تنش به‌دلیل نقش کوفاکتوری این عنصر توسط مقدم و همکاران (Moghadam *et al*., 2013) نیز گزارش شده است.

آنزیم آسکوربات پراکسیداز از آنزیم‌های کلیدی به‌شمار می‌آید که در شرایط تنش، پراکسیدهیدروژن حاصل از کارکرد سوپراکسید دیسموتاز را جمع‌آوری و به آب تبدیل می‌کند (Mudgal *et al*., 2010). همان‌طور که بر اساس نتایج این پژوهش بیان شد، با افزایش شدت تنش تا میزان ۶۰ درصد ظرفیت زراعی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌تواند افزایش و سپس کاهش یابد. بر پایه نتایج پژوهش عابدی و پاک‌نیت (Abedi & Pakniyat, 2010) نیز میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در شدت‌های بالای تنش، به‌دلیل تغییر در زیرواحدهای آنزیمی و یا مهار ساخت آنزیم، کاهش یافت. عبدالعزیز و طاها (Abdelaziz & Taha, 2018) گزارش کردند که کاربرد روی باعث راه‌اندازی سازگان دفاعی آنتی‌اکسیدانی می‌شود، به‌طوری که با کاربرد عنصر یاد شده در شرایط تنش خشکی، افزایش معنی‌داری در میزان فعالیت این آنزیم نسبت به حالت عدم کاربرد این عنصر در شرایط تنش مشاهده شد. پیش‌تر نیز نقش عنصر روی در افزایش بیان ژن آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان از جمله آسکوربات پراکسیداز گزارش شده است (Ma *et al*., 2017).

آنزیم کاتالاز، به‌عنوان جزیی از اکسیدوردوکتازها، پراکسید هیدروژن تولید شده را به آب و اکسیژن تبدیل می‌کند (Karagözler *et al*., 2008). نتایج نشان داد که با وقوع تنش خشکی، میزان فعالیت این آنزیم تا ۶۰ درصد ظرفیت زراعی افزایش یافت و با افزایش شدت تنش از میزان فعالیت آن کاسته شد. یانگ و همکاران (Yang *et al*., 2021) دلیل این کاهش را به اثرات زیان‌بار تنش بر ساختار آنزیم‌ها و بروز ناهنجاری در چین‌خوردگی پروتئین‌ها نسبت داده‌اند. از سوی دیگر، نقش مثبت کاربرد روی در افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نظیر کاتالاز مشاهده شد (جدول ۳). می‌توان چنین بیان داشت که روی به‌عنوان یک عنصر تثبیت‌کننده و محافظ، به احتمال فراوان می‌تواند بیوسنتز آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را تسهیل کند (Cakmak, 2000). افزون بر این، عنوان شده است که کاربرد روی قادر است با تعدیل رادیکال‌های آزاد موجب کاهش اثرات زیان‌بار ناشی از آنها شود و از این راه، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را به‌دنبال داشته باشد (Zago & Oteiza, 2001). مطالعه خیری‌زاده آروق و همکاران (Kheirizadeh Arough *et al*., 2016) در تریتیکاله نشان داد که کاربرد نانواکسید روی در شرایط خشکی شدید باعث افزایش ۲۵ درصدی فعالیت آنزیم کاتالاز نسبت به عدم‌کاربرد آن شد که نشان دهنده تأثیر مثبت این عنصر بر بهبود سازگان دفاعی گیاه می‌باشد.

یکی دیگر از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان که در شرایط تنش میزان فعالیت آن افزایش می‌یابد، آنزیم گایاکول پراکسیداز است (Shafiq *et al*., 2021). نتایج پژوهش حاضر آشکار ساخت که وقوع تنش خشکی باعث افزایش اولیه و کاهش بعدی فعالیت این آنزیم شد (جدول ۳). احمدی و همکاران (Ahmadi *et al*., 2022) نیز در آزمایشی که روی چند ژنوتیپ کلزا تحت شرایط خشکی انجام دادند، گزارش کردند که وقوع تنش خشکی در شدت‌های پایین (آبیاری در ۷۰ درصد ظرفیت زراعی)، میزان فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز را در برخی از ژنوتیپ‌های مورد مطالعه افزایش داد و سپس با افزایش شدت خشکی، از میزان فعالیت آن کاسته شد. این پژوهشگران دلیل این افت را افزایش آسیب ناشی از انباشت گونه‌های اکسیژن فعال در شدت‌های بالای تنش عنوان کردند. از سوی دیگر، کاربرد روی به‌دلیل نقشی که در محافظت از پروتئین‌ها و لیپیدهای غشایی در برابر گونه‌های فعال اکسیژن و فرآورده‌های دیگر حاصل از واکنش‌های احیای درون یاخته‌ای دارد، باعث حفظ یک‌پارچگی غشا یاخته‌ها می‌شود (Sattar *et al*., 2021). عنصر روی با تأثیر بر میزان پتاسیم، در باز و بسته شدن روزنه‌ها و ورود دی‌اکسید کربن دخالت دارد. بنابراین، از این راه نیز می‌تواند در میزان تولید گونه‌های فعال اکسیژن و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند گایاکول پراکسیداز تأثیر داشته باشد (Weisany *et al*., 2011).

جدول ۳- مقایسه میانگین تاثیر کاربرد روی بر صفات مورفولویک و فیزیولوژیک ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ تحت شرایط خشکی

Table 3. Mean comparison of effect of Zn on morphophysiological traits of corn under drought stress

Drought stress	Zn application†	Grain P content (mg/g)	Grain Zn content (mg/g)	Grain Fe content (mg/g)	SOD (Unit per mg protein)	APX (Unit per mg protein)	CAT (Unit per mg protein)	GPX (Unit per mg protein)	Proline (mg/g FW)	Chlorophyl index (SPAD)	Leaf area index
90% Field capasity	No-Zn	0.252 a	14.73 c	28.57 d	189.33 e	1.97 e	592.33 e	35 f	35.9 g	43.5 e	6.70 c
	Soil-10	0.241 b	16.17 b	29.07 cd	187.33 e	2.03 e	589.67 e	34.33 f	36.43 g	46.8 bc	7.87 b
	Soil-25	0.238 b	15.87 b	29.13 bcd	189.67 e	2.07 e	582.00 e	35.33 f	36.4 g	51.23 a	8.40 a
	F-shoot	0.228 c	17.47 a	30.1 a	189.67 e	2.03 e	593.00 e	32.67 f	36.6 g	48.1 b	7.83 b
	F-tassel	0.223 c	17.43 a	29.87 abc	186 e	2.03 e	587.00 e	35 f	37.3 g	44.57 c	7.60 b
	F-milk	0.223 c	17.4 a	29.9 ab	187.33 e	1.95 e	577.67 e	33 f	36.83 g	44.07 de	7.50 b
60% Field capasity	No-Zn	0.214 d	10.03 f	15.8 f	200.67 d	2.80 d	703.67 d	65.33 e	40.77 f	40.53 f	3.67 g
	Soil-10	0.204 e	10.97 e	16.53 f	242.67 b	4.03 b	871.00 b	79 b	60.27 c	43.67 e	5.07 e
	Soil-25	0.199 e	11.7 e	16.6 f	252.67 a	4.73 a	892.33 a	95 a	66.47 b	46.47 bcd	6.20 d
	F-shoot	0.17 f	13.53 d	19.2 e	240.67 b	4.02 b	863.00 b	76 bc	54.37 d	43.6 e	4.77 e
	F-tassel	0.171 f	13.57 d	19.1 e	211.33 c	3.50 c	795.33 c	73 dc	51.5 de	42.07 ef	4.2 f
	F-milk	0.166 f	13.2 d	19 e	204 d	3.40 c	780.00 c	72.33 d	49 e	40.7 f	4.1 fg
30% Field capasity	No-Zn	0.151 g	8.12 h	7.2 h	108 f	1.21 f	381.33 f	18 g	71.53 a	33.07 g	2.17 h
	So-10	0.150 g	7.95 h	7.6 h	111.67 f	1.29 f	386.33 f	18.67 g	72.27 a	32.33 g	2.47 h
	So-25	0.152 g	7.84 h	7.1 h	111.33 f	1.31 f	393.33 f	19 g	72.67 a	34.13 g	2.53 h
	F-shoot	0.134 h	9.06 g	9.43 g	107.67 f	1.30 f	394.67 f	18 g	73 a	34.03 g	2.27 h
	F-tassel	0.135 h	9.07 g	9.5 g	105.67 f	1.24 f	391.33 f	17.33 g	72.8 a	32.77 g	2.23 h
	F-milk	0.133 h	9.1 g	9.4 g	107.67 f	1.23 f	388.67 f	18 g	72.33 a	33.4 g	2.2 h

Means followed by the similar letters are not significantly differen by LSD test at 5% probability level.

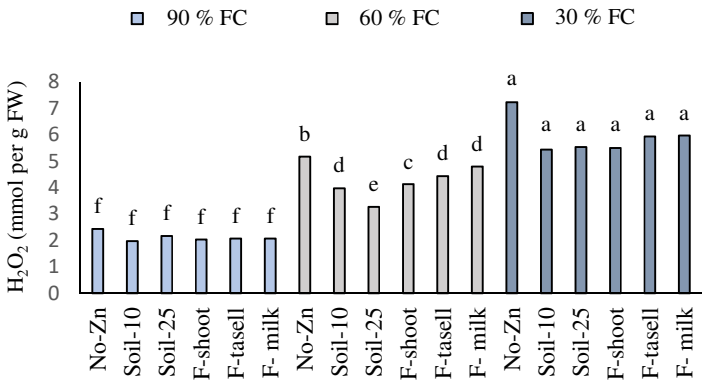
† No-Zn, Non-application of Zn; Soil-10 and Soil-25, 10 and 25 kg.ha^{-1} Zn soil application, respectively; F-shoot, F-tassel and F-milk, foliar application of Zn at shooting, tassel emergence and milk stages, respectively.

پرولین

نتایج به‌دست آمده نشان داد که کاربرد روی در شرایط تنش خشکی موجب افزایش معنی‌دار میزان پرولین شد. بیش‌ترین و کم‌ترین میزان پرولین به‌ترتیب از کاربرد ترکیبات تیماری در تنش شدید و عدم کاربرد روی در شرایط ۹۰ درصد ظرفیت زراعی به‌دست آمد (جدول ۳). با وقوع خشکی و آغاز تجزیه پروتئین‌ها، غلظت اسیدهای آمینه‌ای نظیر پرولین در گیاهان افزایش می‌یابد. افزایش در میزان پرولین به‌عنوان فراگیرترین واکنش گیاهان نسبت به تنش خشکی، سبب تنظیم فشار اسمزی، کاهش هدررفت آب و حفظ آماس یاخته‌ای خواهد شد (Barker *et al*., 1993). گیاهان در این شرایط، با افزایش غلظت شیره یاخته‌ای از راه انباشت اسمولیت‌هایی مانند پرولین، به تداوم روند جذب آب کمک می‌کنند (Bandurska & Stroiński, 2003). به‌طور کلی، انباشت پرولین در پاسخ به انواع گوناگون تنش‌های محیطی با انجام مسیر گلوتامات به‌جای مسیر آرنیتین، نقش حیاتی در هنگام رویارویی گیاهان با تنش‌های محیطی بازی می‌کند (Delauney & Verma, 1993). در ارتباط با نقش عنصر روی در افزایش میزان پرولین، فیزان و همکاران (Faizan *et al*., 2018) گزارش کردند که حضور نانواکسید روی سبب بهبود سازگان آنتی‌اکسیدانی و تسریع انباشت پرولین و در نتیجه پایداری گیاهان می‌شود. گذشته از این، نقش این عنصر در انگیزش ساخت و افزایش بیان ژن‌های مربوط به پرولین نیز گزارش شده است (Helaly *et al*., 2014; Faizan *et al*., 2021). مانولیان و همکاران، (Manvelian *et al*., 2021) نیز عنوان کردند که عنصر روی، به‌عنوان یک تقویت‌کننده تنظیم اسمزی در شرایط تنش عمل می‌کند و از این طریق موجب افزایش محتوای پرولین در شرایط تنش می‌شود.

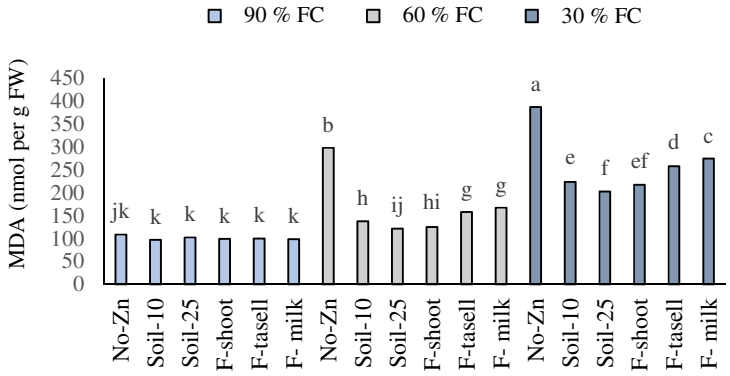
پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید

نتایج نشان‌دهنده افزایش معنی‌دار انباشت پراکسید هیدروژن (۱۹۷ درصد) و مالون دی‌آلدئید (۲۵۶ درصد) تحت شرایط خشکی بود (شکل‌های ۱ و ۲). بیش‌ترین میزان هر دو صفت از عدم کاربرد روی در شرایط تنش شدید به‌دست آمد، اما از نظر میزان پراکسید هیدروژن در تنش شدید، اختلاف معنی‌داری میان هیچ‌یک از تیمارها مشاهده نشد. کم‌ترین میزان هر دو صفات نیز مربوط به تیمارهای به‌کار رفته در شرایط عدم تنش بود. کاربرد روی در شرایط تنش شدید موجب کاهش ۱۸ تا ۲۵ درصدی پراکسید هیدروژن نسبت به عدم کاربرد روی شد (شکل ۱). میزان این‌گونه از انواع اکسیژن فعال بستگی به گروهی از آنزیم‌های متابولیز کننده دارد و افزایش میزان آن می‌تواند پیامدهای شدید و جبران‌ناپذیری برای یاخته‌های گیاهی داشته باشد (Smirnoff & Arnaud, 2019). شمی و همکاران (Shemi *et al*., 2021)، افزایش معنی‌داری در میزان پراکسید هیدروژن در شرایط خشکی در ذرت مشاهده و این افزایش را ناشی از عملکرد زیربهینه آنزیم‌های متابولیزکننده عنوان کردند. نتایج آزمایش حاضر نقش موثر کاربرد عنصر روی را در کاهش گونه‌های فعال اکسیژن تحت شرایط تنش متوسط نشان داد (شکل ۱). افزون بر این، افزایش میزان تولید پراکسید هیدروژن با کاربرد عنصر روی در شرایط تنش شدید نسبت به کاربرد این عنصر در شرایط عدم تنش و تنش متوسط خشکی، از هم‌گسیختگی سازگان دفاعی گیاه را در شدت‌های بالای تنش نشان داد (شکل ۱). ما و همکاران (Ma *et al*., 2017) با کاربرد عنصر روی در شرایط تنش خشکی در گندم، کاهش میزان پراکسید هیدروژن گیاه را گزارش کردند. از سوی دیگر، با تولید بیش از اندازه گونه‌های اکسیژن فعال در اثر تنش، میزان مالون‌دی‌آلدئید افزایش می‌یابد. در پژوهش حاضر، میزان مالون دی‌آلدئید به‌طور معنی‌داری در شرایط تنش شدید نسبت به عدم تنش افزایش یافت. افزایش مالون دی‌آلدئید در شرایط تنش، به‌دنبال افزایش تولید گونه‌های اکسیژن فعال توسط حسین و همکاران (Hussain *et al*., 2019) نیز گزارش شده است. وو و همکاران (Wu *et al*., 2015) نیز عنوان کردند که به‌دلیل نقش عنصر روی در افزایش مقاومت در برابر تنش خشکی، کاربرد سولفات روی منجر به کاهش محتوای مالون دی‌آلدئید در گیاه پنبه شد. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش به‌دلیل این‌که بیش‌ترین میزان فعالیت آنزیم‌هایی نظیر سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز، گایاگول پراکسیداز و کاتالاز از تیمار کاربرد خاکی ۲۵ کیلوگرم در هکتار در شرایط تنش متوسط ثبت شد، بنابراین میزان مالون دی‌آلدهید در این تیمار کاهش یافت (جدول ۳، شکل‌های ۱ و ۲). شورمیج و همکاران (Shoormij *et al*., 2024) عنوان کردند که کاربرد روی در شرایط تنش خشکی، به‌دلیل نقشی که این عنصر در بهبود جذب آب و افزایش سیستم دفاعی گیاه دارد، منجر به کاهش تولید پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید در گیاه گندم شد.



شکل ۱- تأثیر کاربرد روی بر میزان پراکسید هیدروژن تحت شرایط خشکی

Figure 1. Effec of Zn application on H_2O_2 under drought conditions. No-Zn, Non-application of Zn; Soil-10 and Soil-25, 10 and 25 kg.ha^{-1} Zn soil application, respectively; F-shoot, F-tassel and F-milk, foliar application of Zn at shooting, tassel emergence and milk stages, respectively.



شکل ۲- تأثیر کاربرد روی بر میزان مالون دی‌آلدئید تحت شرایط خشکی

Figure 2. Effec of Zn application on malondialdehyde (MDA) under drought stress. No-Zn, Non-application of Zn; Soil-10 and Soil-25, 10 and 25 kg.ha^{-1} Zn soil application, respectively; F-shoot, F-tassel and F-milk, foliar application of Zn at shooting, tassel emergence and milk stages, respectively.

شاخص کلروفیل برگ (SPAD)

نتایج نشان داد که با اعمال تنش خشکی و افزایش شدت آن، شاخص کلروفیل برگ به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۳). در مقابل، کاربرد روی در شرایط تنش، میزان این صفت را بهبود بخشید، به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان شاخص کلروفیل برگ از تیمار کاربرد خاکی ۲۵ کیلوگرم در هکتار روی در شرایط عدم تنش و کم‌ترین میزان آن از کاربرد تیمارهای گوناگون در تنش شدید به‌دست آمد. همسو با نتایج این پژوهش، مانولیان و همکاران (Manvelian *et al*., 2021) نیز عنوان کردند که به‌علت تخریب کلروفیل یا کاهش سنتز آن در شرایط تنش که به‌دنبال اختلال در فعالیت آنزیم‌های دخیل در ساخت رنگدانه‌های فتوسنتزی اتفاق می‌افتد، شاخص کلروفیل برگ کاهش یافت. در ارتباط با نقش مثبت عنصر روی بر رنگدانه‌های فتوسنتزی نیز عنوان شده است که این عنصر با محافظت از گروه سولفیدریل کلروفیل، نقش حیاتی در بیوسنتز آن ایفا می‌کند (Mansoor *et al*., 2019). ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi *et al*., 2021) بیان کردند که افشانه کردن عناصری مانند روی و آهن، به‌دلیل نقشی که این عناصر در تشکیل کلروفیل، فتوسنتز، سوخت‌وساز نیتروژن، سازگان آنزیمی و ساختار کلروپلاست دارند، موجب افزایش محتوای کلروفیل برگ در گیاهان شد. از سوی دیگر، عنوان شده است که به‌دلیل افزایش تولید پراکسید هیدروژن و تخریب رنگدانه‌ها تحت شرایط تنش، میزان شاخص کلروفیل برگ در این شرایط کاهش می‌یابد (Liu *et al*., 2015).

شاخص سطح برگ

تنش خشکی، شاخص سطح برگ را به‌طور معنی‌داری کاهش داد، ولی کاربرد روی موجب بهبود شاخص سطح برگ شد (جدول ۳). به‌طوری‌که بالاترین میزان این شاخص از تیمار کاربرد خاکی روی به‌میزان ۲۵ کیلوگرم در هکتار در شرایط عدم تنش به‌دست آمد. همچنین، کم‌ترین مقدار شاخص سطح برگ در شرایط تنش شدید کم‌آبی مشاهده شد و کاربرد روی به روش‌های مختلف و در غلظت‌های متفاوت نیز اثر معنی‌داری در بهبود آن نداشت. رشد یاخته‌ای از جمله حساس‌ترین فرآیندها به تنش خشکی است. به‌همین دلیل، تنش خشکی با کاهش آماس و در پی آن کاهش رشد یاخته، موجب کاهش توسعه یاخته‌ای به‌ویژه در برگ‌ها می‌شود (Shekari *et al*., 2009). در واقع در شرایط تنش خشکی، به‌دلیل کاهش تولید برگ‌های تازه و همچنین تولید برگ‌هایی با اندازه‌های کوچک‌تر و تشدید ریزش آن‌ها، شاخص سطح برگ کاهش می‌یابد (Pagter *et al*., 2005). از سوی دیگر، افزایش سطح برگ در اثر کاربرد سولفات روی در گیاه لوبیا (Kermanshahi & Noriani, 2019) و انواع نانو و سولفات روی در گیاه گل گاوزبان (Mahmoodi *et al*., 2018) گزارش شده است. هم‌راستا با یافته‌های این پژوهش، امیرانی و کسرایی (Amirani & Kasraei, 2015) گزارش کردند که افزایش شاخص سطح برگ با کاربرد عناصر ریزمغذی مانند روی به نقش این عناصر در سنتز اکسین در برگ‌ها مربوط می‌شود و از آن جایی که اکسین در تقسیم یاخته‌ها نقش دارد، بنابراین می‌تواند در افزایش شاخص سطح برگ در شرایط تنش نیز موثر باشد.

عملکرد دانه و زیست‌توده

بررسی روند تغییرات عملکرد دانه و زیست‌توده نشان داد که با وقوع تنش و افزایش شدت آن، میزان هر دو ویژگی فوق کاهش یافت. در مقابل، کاربرد عنصر روی با تأثیر مثبت موجب بهبود رشد و نمو گیاه شد، به‌طوری که بیش‌ترین میزان عملکرد دانه و زیست‌توده در شرایط عدم تنش و همچنین با کاربرد خاکی ۲۵ کیلوگرم در هکتار روی و کم‌ترین میزان این صفات در شرایط تنش شدید و عدم کاربرد روی به‌دست آمد (جدول ۴). با وقوع تنش خشکی شدید، میزان عملکرد دانه و زیست‌توده به‌ترتیب در حدود ۴۵ و ۶۰ درصد نسبت به حالت عدم تنش کاهش داشت. افزون بر این، کاربرد خاکی روی به‌میزان ۲۵ کیلوگرم در هکتار موجب افزایش ۶۲ درصدی عملکرد دانه و ۴۴ درصدی عملکرد زیست‌توده شد. تنش خشکی از جمله مهم‌ترین عوامل محیطی تأثیرگذار بر عملکرد گیاهان زراعی است که به‌دلیل تسریع در سپری شدن مراحل فنولوژیک و کاهش طول دوره رشد گیاه، موجبات کاهش تولید دانه را فراهم می‌آورد (Shekari *et al*., 2009). همچنین، به‌نظر می‌رسد که در شرایط خشکی، وقوع تنش اکسیداتیو موجب کاهش کلروفیل برگ و میزان فتوسنتز می‌شود و این امر تأثیر مستقیمی در کاهش رشد و میزان عملکرد نهایی دانه دارد. بعلاوه، کاهش شاخص سطح برگ در اثر تنش خشکی با کاهش سطح جذب کننده نور، می‌تواند موجب کاهش تولید ماده خشک در واحد سطح شود (Shekari *et al*., 2009). حسین و همکاران (Hussain *et al*., 2019) بیان کردند که با بروز تنش، به‌دلیل کاهش رشد گیاه و همچنین کاهش سطح برگ، میزان عملکرد دانه کاهش یافت. از سوی دیگر، افزایش عملکرد دانه ناشی از کاربرد روی را می‌توان به نقش موثر این عنصر در بهبود گرده‌افشانی و تلقیح مرتبط دانست (Brennan, 2001). همچنین، کاربرد عنصر روی، به‌دلیل نقش این عنصر به‌عنوان کوفاکتور آنزیم کربونیک ان‌هیدراز و وظیفه‌ای که این آنزیم در تثبیت کربن دارد نیز می‌تواند سودمند باشد (Sharma *et al*., 2020). در واقع، این عنصر قادر است با فراهمی شرایط مناسب برای رشد گیاه، با افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی و بهبود سطح سبز و فتوسنتز کننده، منجر به افزایش عملکرد شود (Mohamadi Dizaj & Shekari, 2016).

در ارتباط با تاثیر بیش‌تر کاربرد خاکی عنصر روی در مقایسه با روش افشانه‌کردن آن، نتایج مشابهی توسط محمدی دیزج و شکاری (Mohamadi Dizaj & Shekari, 2016)، گزارش شده است. ایشان عنوان کردند که کاربرد خاکی روی، به‌دلیل اینکه از ابتدای دوره رشد در اختیار گیاه قرار می‌گیرد، بنابراین رشد اولیه و نمو بخش‌های رویشی گیاه با کاربرد عنصر روی در مقاطع مناسب، بهبود می‌یابد و عملکرد دانه و زیست‌توده را بیش از افشانه کردن افزایش می‌دهد. این در حالی است که افشانه کردن عنصر روی بیش‌تر روی غلظت عناصر دانه تأثیرگذار است و همان‌طور که مطالعات قبلی در ذرت نیز نشان داده است، تاثیر افشانه کردن روی در مراحل پایانی رشد بر غلظت عناصر دانه موثرتر می‌باشد (Tariq *et al*., 2014). به بیان دیگر، بالا بودن عملکرد دانه و زیست‌توده در کاربرد خاکی روی می‌تواند ناشی از سازوکارهای متفاوت جذب و انتقال روی در دو روش خاکی و افشانه

کردن باشد. به این معنی که کاربرد خاکی، با فراهم کردن تدریجی روی از آغاز فصل رشد، امکان بهره‌برداری بهینه از این عنصر را در مراحل گوناگون رشد رویشی و زایشی فراهم می‌آورد و سرانجام منجر به افزایش عملکرد می‌شود (Ali *et al*., 2025). در مقابل، افشانه کردن روی، با انتقال مستقیم این عنصر به برگ‌ها در زمان پر شدن دانه، اگرچه باعث افزایش غلظت روی در بافت‌های هوایی می‌شود، اما به‌دلیل عدم تأثیرگذاری در مراحل نخستین رشد، نمی‌تواند به اندازه کاربرد خاکی بر عملکرد نهایی تأثیرگذار باشد. در واقع، کاربرد خاکی روی در مراحل نخستین رشد، سبب بهبود ساختارهای فتوسنتزی و تولید آنزیم‌های حیاتی می‌شود، در حالی‌که افشانه کردن آن، به‌طور نسبی تاثیرات کم‌تری در این زمینه دارد. به‌نظر می‌رسد که افشانه کردن روی در مراحل پایانی رشد، به‌دلیل همزمانی آن با مراحل تکوین دانه و جذب مستقیم روی از طریق برگ‌ها، تجمع عناصر دانه را بیش‌تر تحت تأثیر قرار می‌دهد (Mutambu *et al*., 2023). علاوه بر این، کاربرد عنصر روی به‌ویژه تحت شرایط تنش متوسط، به‌دلیل افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان به‌عنوان عوامل جمع‌آوری کننده گونه‌های اکسیژن فعال و نیز ایفای نقش آن در افزایش جذب عناصر غذایی و افزایش شاخص کلروفیل و شاخص سطح برگ (جدول ۳)، موجب بهبود شرایط و افزایش فتوسنتز می‌شود و در نتیجه عملکرد زیست‌توده افزایش می‌یابد. یافته‌های این مطالعه با نتایج سلام و همکاران (Salam *et al*., 2022) که افزایش چشم‌گیر رنگدانه‌های فتوسنتزی و در نهایت افزایش عملکرد زیست‌توده را در اثر کاربرد نانواکسید روی تحت شرایط تنش کبالت در ذرت گزارش کردند، مطابقت داشت. افزایش عملکرد دانه ذرت با کاربرد عنصر روی تحت شرایط خشکی توسط شمی و همکاران (Shemi *et al*., 2021) نیز گزارش شده است.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر اصلی تنش خشکی و کاربرد روی بر عملکرد دانه و زیست‌شناختی ذرت

Table 4. Mean comparison of effect of Zn and drought stress on grain and biologycal yield of maize

Drought stress / Zn application	Grain yield (ton/ha)	Biologycal yield (ton/ha)
Drought stress at 90% field capasity	6.84 a	24.04 a
Drought stress at 60% field capasity	5.27 b	17.45 b
Drought stress at 30% field capasity	3.63 c	9.54 c
No-Zn application	4.22 d	14.63 d
10 $kg.ha^{-1}$ Zn soil application	5.78 b	17.99 b
10 $kg.ha^{-1}$ Zn soil application	6.85 a	21.08 a
Zn foliar application at shooting stage	5.35 bc	17.72 bc
Zn foliar application at tassel emergence stage	4.73 cd	15.47 cd
Zn foliar application at milk stage	4.57 d	15.18 d

نتیجه‌گیری کلی

جذب عناصر غذایی توسط دو عامل اصلی یعنی حاصل‌خیزی خاک و توانایی گیاهان برای جذب آن‌ها کنترل می‌شود. به‌طور کلی، نتایج مطالعه حاضر نشان داد که هر دو روش کاربرد خاکی و افشانه کردن عنصر روی، موجب بهبود جنبه‌های فیزیولوژیک، ریخت‌شناختی، عملکرد و همچنین، افزایش سازگان دفاعی گیاه شد. در حالت کلی، کاربرد ۲۵ کیلوگرم در هکتار روی به‌ویژه در تنش متوسط خشکی، با افزایش پرولین و جذب آب منجر به افزایش جذب عناصر غذایی شد. افزون بر این، کاربرد این تیمار موجب افزایش سازگان دفاعی گیاه شد و تأثیر این افزایش در کاهش پراکسید هیدروژن و در نتیجه کاهش میزان پراکسیداسیون لیپیدی غشا، نمود بیش‌تری یافت. همچنین، با کاربرد عنصر روی، کاهش در میزان تولید گونه‌های اکسیژن فعال از یک سو و افزایش جذب عناصر غذایی از سوی دیگر، موجب افزایش شاخص کلروفیل برگ و افزایش سطح سبز و فتوسنتز شد. در نهایت، تمامی این نتایج موجب شد تا بیش‌ترین عملکرد دانه و زیست‌توده از تیمار کاربرد روی به‌ویژه کاربرد خاکی ۲۵ کیلوگرم در هکتار آن به‌دست آید. در مقابل، کاربرد روی به‌روش افشانه کردن، در انباشت عناصر غذایی در دانه موثرتر از کاربرد خاکی آن بود.

تضاد منافع

نویسندگان تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هرگونه روابط تجاری یا مالی می‌تواند به عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسندگان اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تاکنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده است و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

نویسندگان با چاپ این مقاله به‌صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

References

Abdelaziz, M. E., & Taha, S. S. (2018). Foliar potassium and zinc stimulates tomato growth, yield and enzymes activity to tolerate water stress in soilless culture. *Journal of Food Agriculture & Environment*, *16*(2), 113-118.

Abedi, T., & Pakniyat, H. (2010). Antioxidant enzyme changes in response to drought stress in ten cultivars of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Czech Journal of Genetics & Plant Breeding*, *46*(1), 27-34. doi: 10.17221/67/2009-CJGPB.

Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. *Methods Enzymology*, *105*, 121-126. doi: 10.1016/s0076-6879(84)05016-3.

Ahmadi, H., Abbasi, A., Taleei, A., Mohammadi, V., & Pueyo, J. J. (2022). Antioxidant response and calcium-dependent protein kinases involvement in canola (*Brassica napus* L.) tolerance to drought. *Agronomy*, *12*(1), 125. doi: 10.3390/agronomy12010125.

Ahmadi, R., Mahmoudi, M., Shekari, F., Afsahi, K., Shekari, K., Saba, J., & Mastinu, A. (2024). Application methods of zinc sulphate increased safflower seed yield and quality under end-season drought stress. *Horticulturae*, *10*(9), 963. doi: 10.3390/horticulturae10090963.

Ali, M., Ahmed, I., Zia, M. H., Abbas, S., Sultan, T., & Sharif, M. (2025). Enhancing wheat yield and zinc biofortification through synergistic action of potent zinc-solubilizing bacteria and zinc sulfate in calcareous soil. *Agricultural Research*, *14*, 159-170. doi: 10.1007/s40003-024-00750-6.

Amirani, D. C., & Kasraei, P. (2015). The effect of foliar application of microelements on phenological and physiological characteristics of mung bean under drought stress. *International Journal of Agronomy & Agricultural Research*, *7*(3), 1-8.

Ashraf, M. A., Riaz, M., Arif, M. S., Rasheed, R., Iqbal, M., Hussain, I., & Mubarik, M. S. (2019). The role of non-enzymatic antioxidants in improving abiotic stress tolerance in plants. In: Hasanuzzaman, M., Fujita, M., Oku, H., & Islam, M. T. (Eds.). Plant Tolerance to Environmental Stress. CRC Press.

Aslam, M., Maqbool, M. A., & Cengiz, R. (2015). Drought Stress in Maize (*Zea mays* L.): Effects, Resistance Mechanisms, Global Achievements and Biological Strategies for Improvement. Springer Cham. doi: 10.1007/978-3-319-25442-5.

Bandurska, H., & Stroiński, A. (2003). ABA and proline accumulation in leaves and roots of wild (*Hordeum spontaneum*) and cultivated (*Hordeum vulgare* 'Maresi') barley genotypes under water deficit conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, *25*(1), 55-61. doi: 10.1007/s11738-003-0036-x.

Barker, D., Sullivan, C., & Moser, L. E. (1993). Water deficit effects on osmotic potential, cell wall elasticity, and proline in five forage grasses. *Agronomy Journal*, *85*(2), 270-275. doi: 10.2134/agronj1993.00021962008500020020x.

Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant & Soil*, *39*(1), 205-207. doi: 10.1007/BF00018060.

Brennan, R. F. (2001). Residual value of zinc fertiliser for production of wheat. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, *41*(4), 541-547. doi: 10.1071/EA00139.

Cakmak, I. (2000). Tansley Review No. 111: Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. *The New Phytologist*, *146*(2), 185-205. 10.1046/j.1469-8137.2000.00630.x.

Cakmak, I., Pfeiffer, W. H., & McClafferty, B. (2010). Biofortification of durum wheat with zinc and iron. *Cereal Chemistry*, *87*(1), 10-20. doi: 10.1094/CCHEM-87-1-0010.

Chen, L. M., Lin, C. C., & Kao, C. H. (2000). Copper toxicity in rice seedlings: Changes in antioxidative enzyme activities, H2O2 level, and cell wall peroxidase activity in roots. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, *41*(2), 99-103. doi: 10.7016/BBAS.200004.0099.

Delauney, A. J., & Verma, D. P. S. (1993). Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *The Plant Journal*, *4*(2), 215-223. doi: 10.1046/j.1365-313X.1993.04020215.x.

Ebrahimi, Z., Biabani, A., Mohammadi, R., Sabouri, H., & Rahemi Karizki, A. (2021). Effect of wheat enrichment by foliar application of zinc and iron on quantitive and qualitative traits at differnt phenological stages. *Journal of Crop Breeding*, *13*(38), 138-148. [In Persian]. doi: 10.52547/jcb.13.38.138.

Elshamly, A. M., Iqbal, R., Ali, B., Ahmed, I., Akram, M. I., Ali, S., & Hamed, M. H. (2024). Zinc and amino acids improve the growth, physiological, and biochemical attributes of corn under different irrigation levels. *Rhizosphere*, *29*, 100820. doi: 10.1016/j.rhisph.2023.100820.

Faizan, M., Bhat, J. A., Chen, C., Alyemeni, M. N., Wijaya, L., Ahmad, P., & Yu, F. (2021). Zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) induce salt tolerance by improving the antioxidant system and photosynthetic machinery in tomato. *Plant Physiology & Biochemistry*, *161*, 122-130. doi: 10.1016/j.plaphy.2021.02.002.

Faizan, M., Faraz, A., Yusuf, M., Khan, S. T., & Hayat, S. (2018). Zinc oxide nanoparticle-mediated changes in photosynthetic efficiency and antioxidant system of tomato plants. *Photosynthetica*, *56*(2), 678-686. doi: 10.1007/s11099-017-0717-0.

Helaly, M. N., El-Metwally, M. A., El-Hoseiny, H., Omar, S. A., & El-Sheery, N. I. (2014). Effect of nanoparticles on biological contamination of'in vitro'cultures and organogenic regeneration of banana. *Australian Journal of Crop Science*, *8*(4), 612-624.

Hunt, R. (1982). Plant Growth Curves: The Functional Approach to Plant Growth Analysis. Edward Arnold Press, London.

Hussain, H. A., Men, S., Hussain, S., Chen, Y., Ali, S., Zhang, S., & Wang, L. (2019). Interactive effects of drought and heat stresses on morpho-physiological attributes, yield, nutrient uptake and oxidative status in maize hybrids. *Scientific Reports*, *9*(1), 3890. doi: 10.1038/s41598-019-40362-7.

Karagözler, A. A., Erdağ, B., Emek, Y. Ç., & Uygun, D. A. (2008). Antioxidant activity and proline content of leaf extracts from *Dorystoechas hastata*. *Food Chemistry*, *111*(2), 400-407. doi: 10.1016/j.foodchem.2008.03.089.

Karami, S., Sanavy, S. A. M. M., Ghanehpoor, S., & Keshavarz, H. (2016). Effect of foliar zinc application on yield, physiological traits and seed vigor of two soybean cultivars under water deficit. *Notulae Scientia Biologicae*, *8*(2), 181-191. doi: 10.15835/nsb829793.

Kermanshahi, M., & Noriani, H. (2019). Impact of zinc sulfate and nitrogen fertilizer on growth curves and crop production of green beans (*Phaseolous vulgaris* L.). *Journal of Crop Nutrition Science*, *5*(1), 61-78.

Kheirizadeh Arough, Y., Seyed Sharifi, R., & Seyed Sharifi, R. (2016). Bio fertilizers and zinc effects on some physiological parameters of triticale under water-limitation condition. *Journal of Plant Interactions*, *11*(1), 167-177. doi: 10.1080/17429145.2016.1262914.

Lamlom, S. F., Abdelghany, A. M., Ren, H., Ali, H. M., Usman, M., Shaghaleh, H., & El-Sorady, G. A. (2024). Revitalizing maize growth and yield in water-limited environments through silicon and zinc foliar applications. *Heliyon*, *10*(15), e35118. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e35118.

Liu, D. Y., Zhang, W., Liu, Y. M., Chen, X. P., & Zou, C. Q. (2020). Soil application of zinc fertilizer increases maize yield by enhancing the kernel number and kernel weight of inferior grains. *Frontiers in Plant Science*, *11*, 188. doi: 10.3389/fpls.2020.00188.

Liu, L., Zhu, B., & Wang, G. X. (2015). Azoxystrobin-induced excessive reactive oxygen species (ROS) production and inhibition of photosynthesis in the unicellular green algae *Chlorella vulgaris*. *Environmental Science & Pollution Research International*, *22*(10), 7766-7775. doi: 10.1007/s11356-015-4121-7.

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. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 860. doi: 10.3389/fpls.2017.00860.

Mahmoodi, P., Yarnia, M., Rashidi, V., Amirnia, R., & Tarinejhad, A. (2018). Effects of nano and chemical fertilizers on physiological efficiency and essential oil yield of *Borago officinalis* L. *Applied Ecology & Environtal Research*, *16*(4), 4773-4788. doi: 10.15666/aeer/1604_47734788.

Mansoor, N., Younus, A., Jamil, Y., & Shahid, M. (2019). Assessment of nutritional quality, yield and antioxidant activity of *Triticum aestivum* treated with zinc oxide nanoparticles. *Digest Journal of Nanomaterials & Biostructures*, *14*(2), 491-500.

Manvelian, J., Weisany, W., Tahir, N. A. R., Jabbari, H., & Diyanat, M. (2021). Physiological and biochemical response of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars to zinc application under drought stress. *Industrial Crops & Products*, *172*, 114069. doi: 10.1016/j.indcrop.2021.114069.

Martínez-Cuesta, N., Carciochi, W., Sainz-Rozas, H., Salvagiotti, F., Colazo, J. C., Wyngaard, N., & Barbieri, P. (2021). Effect of zinc application strategies on maize grain yield and zinc concentration in mollisols. *Journal of Plant Nutrition*, *44*(4), 486-497. doi: 10.1080/01904167.2020.1844754.

Mittler, R., Vanderauwera, S., Gollery, M., & Van Breusegem, F. (2004). Reactive oxygen gene network of plants. *Trends in Plant Science*, *9*(10), 490-498. doi: 10.1016/j.tplants.2004.08.009.

Moghadam, H. R. T., Zahedi, H., & Ashkiani, A. (2013). Effect of zinc foliar application on auxin and gibberellin hormones and catalase and superoxide dismutase enzyme activity of corn (*Zea mays* L.) under water stress. *Maydica*, *58*(3-4), 218-223.

Mohamadi Dizaj, H., & Shekari, F. (2016). The effect of zinc sulfate on biofortification and morphological changes in spring wheat. *Water & Soil Science*, *26*(3), 277-292. [In Persian].

Mohamadzadeh, M., Janmohammadi, M., Abbasi, A., Sabaghnia, N., & Ion, V. (2023). Physiochemical response of *Cicer arietinum* to zinc-containing mesoporous silica nanoparticles under water stress. *Biotechnologia*, *104*(3), 263. doi: 10.5114/bta.2023.130729.

Mudgal, V., Madaan, N., & Mudgal, A. (2010). Biochemical mechanisms of salt tolerance in plants: A review. *International Journal of Botany*, *6*(2), 136-143. doi: 10.3923/ijb.2010.136.143.

Mutambu, D., Kihara, J., Mucheru-Muna, M., Bolo, P., & Kinyua, M. (2023). Maize grain yield and grain zinc concentration response to zinc fertilization: A meta-analysis. *Heliyon*, *9*, e16040. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16040.

Oguz, M. C., Aycan, M., Oguz, E., Poyraz, I., & Yildiz, M. (2022). Drought stress tolerance in plants: Interplay of molecular, biochemical and physiological responses in important development stages. *Physiologia*, *2*(4), 180-197. doi: 10.3390/physiologia2040015.

Pagter, M., Bragato, C., & Brix, H. (2005). Tolerance and physiological responses of *Phragmites australis* to water deficit. *Aquatic Botany*, *81*(4), 285-299. doi: 10.1016/j.aquabot.2005.01.002.

Qamari, P., Shekari, F., Afsahi, K., Tavakoli, A., Samimifard, A., Shekari, K., & Mastinu, A. (2023). Response of wheat cultivars to zinc application for seed yield and quality improvement. *The Journal of Agricultural Science*, *161*(4), 549-562. doi: 10.1017/S0021859623000473.

Qiao, M., Hong, C., Jiao, Y., Hou, S., & Gao, H. (2024). Impacts of drought on photosynthesis in major food crops and the related mechanisms of plant responses to drought. *Plants*, *13*(13), 1808. 10.3390/plants13131808.

Roozitalab, M. H., Siadat, H., & Farshad, A. (2018). The Soils of Iran. World Soils Book Series. Springer Cham, Switzerland. doi: 10.1007/978-3-319-69048-3.

Saha, S., Begum, H. H., Nasrin, S., & Samad, R. (2020). Effects of drought stress on pigment and protein contents and antioxidant enzyme activities in five varieties of rice (*Oryza sativa* L.). *Bangladesh Journal of Botany*, *49*(4), 997-1002. doi: 10.3329/bjb.v49i4.52516.

Sairam, R., Deshmukh, P., & Saxena, D. (1998). Role of antioxidant systems in wheat genotypes tolerance to water stress. *Biologia Plantarum*, *41*(3), 387-394. doi: 10.1023/A:1001898310321.

Sairam, R. K., Rao, K. V., & Srivastava, G. (2002). Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration. *Plant Science*, *163*(5), 1037-1046. doi: 10.1016/S0168-9452(02)00278-9.

Salam, A., Khan, A. R., Liu, L., Yang, S., Azhar, W., Ulhassan, Z., & Gan, Y. (2022). Seed priming with zinc oxide nanoparticles downplayed ultrastructural damage and improved photosynthetic apparatus in maize under cobalt stress. *Journal of Hazardous Materials*, *423*, 127021. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127021.

Sattar, A., Wang, X., Abbas, T., Sher, A., Ijaz, M., Ul-Allah, S., Irfan, M., Butt, M., Wahid, M. A., Cheema, M., & Fiaz, S. (2021). Combined application of zinc and silicon alleviates terminal drought stress in wheat by triggering morpho-physiological and antioxidants defense mechanisms. *PloS One*, *16*(10), e0256984. doi: 10.1371/journal.pone.0256984.

Shafiq, B. A., Nawaz, F., Majeed, S., Aurangzaib, M., Al Mamun, A., Ahsan, M., Ahmad, K. S., Shehzad, M. A., Ali, M., Hashim, S., & Ul-Haq, T. (2021). Sulfate-based fertilizers regulate nutrient uptake, photosynthetic gas exchange, and enzymatic antioxidants to increase sunflower growth and yield under drought stress. *Journal of Soil Science & Plant Nutrition*, *21*(3), 2229-2241. doi: 10.1007/s42729-021-00516-x.

Sharma, T., Sharma, S., Kamyab, H., & Kumar, A. (2020). Energizing the CO2 utilization by chemo-enzymatic approaches and potentiality of carbonic anhydrases: A review. *Journal of Cleaner Production*, *247*, 119138. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119138.

Shekari, F., Mohammadi, H., Pourmohammad, A., Avanes, A., & Benam, M. B. K. (2015). Spring wheat yielding and the content of protein and zinc in its grain depending on zinc fertilisation. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, *18*(1), #08.

Shekari, F., Shekari, F., & Esfandiari, E. (2009). Physiology of Crop Production. Maragheh University Press, Maragheh, Iran. [In Persian].

Shemi, R., Wang, R., Gheith, E. S. M., Hussain, H. A., Hussain, S., Irfan, M., & Wang, L. (2021). Effects of salicylic acid, zinc and glycine betaine on morpho-physiological growth and yield of maize under drought stress. *Scientific Reports*, *11*(1), 3195. doi: 10.1038/s41598-021-82264-7.

Shoormij, F., Mirlohi, A., Saeidi, G., Sabzalian, M. R., & Shirvani, M. (2024). Zinc foliar application may alleviate drought stress in wheat species through physiological changes. *Plant Stress*, *13*, 100534. doi: 10.1016/j.stress.2024.100534.

Smirnoff, N., & Arnaud, D. (2019). Hydrogen peroxide metabolism and functions in plants. *New Phytologist*, *221*(3), 1197-1214. doi: 10.1111/nph.15488.

Stewart, R. R., & Bewley, J. D. (1980). Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. *Plant Physiology*, *65*(2), 245-248. doi: 10.1104/pp.65.2.245.

Sun, L., Song, F., Zhu, X., Liu, S., Liu, F., Wang, Y., & Li, X. (2021). Nano-ZnO alleviates drought stress via modulating the plant water use and carbohydrate metabolism in maize. *Archives of Agronomy & Soil Science*, *67*(2), 245-259. doi: 10.1080/03650340.2020.1723003.

Tariq, A., Anjum, S. A., Randhawa, M. A., Ullah, E., Naeem, M., Qamar, R., & Nadeem, M. (2014). Influence of zinc nutrition on growth and yield behaviour of maize (*Zea mays* L.) hybrids. *American Journal of Plant Sciences*, *5*(18), 2647-2684. doi: 10.4236/ajps.2014.518279.

Walinga, I., Van Der Lee, J. J., Houba, V. J. G., Van Vark, W., & Novozamsky, I. (1995). Digestion in tubes with H_2SO_4-salicylic acid-H_2O_2 and selenium and determination of Ca, K, Mg, N, Na, P, Zn. In: Walinga, I., Van Der Lee, J. J., Houba, V. J. G., Van Vark, W., & Novozamsky, I. (Eds.). Plant Analysis Manual. Springer, Dordrecht. pp: 7-45. doi: 10.1007/978-94-011-0203-2_2.

Weisany, W., Sohrabi, Y., Heidari, G., Siosemardeh, A., & Ghassemi-Golezani, K. (2011). Physiological responses of soybean (*Glycine max* L.) to zinc application under salinity stress. *Australian Journal of Crop Science*, *5*(11), 1441-1447.

Wu, S., Hu, C., Tan, Q., Li, L., Shi, K., Zheng, Y., & Sun, X. (2015). Drought stress tolerance mediated by zinc-induced antioxidative defense and osmotic adjustment in cotton (*Gossypium hirsutum*). *Acta Physiologiae Plantarum*, *37*, 167. doi: 10.1007/s11738-015-1919-3.

Xia, H., Kong, W., Wang, L., Xue, Y., Liu, W., Zhang, C., & Li, C. (2019). Foliar Zn spraying simultaneously improved concentrations and bioavailability of Zn and Fe in maize grains irrespective of foliar sucrose supply. *Agronomy*, *9*(7), 386. doi: 10.3390/agronomy9070386.

Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. (2021). Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, *7*(3), 50. doi: 10.3390/horticulturae7030050.

Yoshimura, K., Yabuta, Y., Ishikawa, T., & Shigeoka, S. (2000). Expression of spinach ascorbate peroxidase isoenzymes in response to oxidative stresses. *Plant Physiology*, *123*(1), 223-234. doi: 10.1104/pp.123.1.223.

Zago, M. P., & Oteiza, P. I. (2001). The antioxidant properties of zinc: Interactions with iron and antioxidants. *Free Radical Biology & Medicine*, *31*(2), 266-274. doi: 10.1016/s0891-5849(01)00583-4.

Zhao, X., Tong, C., Pang, X., Wang, Z., Guo, Y., Du, F., & Wu, R. (2012). Functional mapping of ontogeny in flowering plants. *Briefings in Bioinformatics*, *13*(3), 317-328. doi: 10.1093/bib/bbr054.