University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research
Vol. 15, No. 2, Summer 2025 (183-198)
doi: 10.22124/CR.2025.29615.1851
pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115

RESEARCH PAPER OPEN ACCESS

Role of micronutrients of Fe and Zn and foliar application of salicylic acid in improving maize (*Zea mays* L.) tolerance to drought stress

Mohammad Behzad Amiri[1*], Mohammad Sepehri Bimorghi[2] and Atefeh Mirzaeian[3]

1. Associate Professor, Department of Plant Production, Faculty of Agriculture, University of Gonabad, Gonabad, Iran (Current address: Associate Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran ([*] Corresponding author: amiri@gonabad.ac.ir; mb.amiri@um.ac.ir)
2. M.Sc. Graduate Student, Medicinal Plants and Drugs Research Institute, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran
3. Ph.D. Student, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Comprehensive abstract

Introduction

Maize (*Zea mays* L.) is one of the vital crop in the world, serving as a significant food source and primary income for farmers, particularly in developing countries. It is also a key raw material for various industries, including biofuel (ethanol) production. Moreover, drought stress, as one of the most important environmental limiting factors, severely affects the growth, productivity and yield of maize. Sustainable and eco-friendly solutions, such as the application of micronutrients and plant growth regulators, can effectively enhance plants drought tolerance. Essential micronutrients like iron (Fe) and zinc (Zn) play crucial roles in plant physiological and biochemical processes. Iron is involved in nitrogen fixation processes and antioxidant enzyme activity, while zinc is vital for chlorophyll synthesis and carbohydrate metabolism. Additionally, salicylic acid (SA), as a plant growth regulator, is known to improve plant drought resistance. Given the arid and semi-arid climate of Iran and the scarcity of water resources, it is essential to investigate innovative strategies to improve maize performance under these conditions. The objective of this study was to evaluate the effects of combined application of iron and zinc micronutrients along with salicylic acid on yield and growth characteristics of maize under drought conditions.

Materials and methods

The experiment was conducted as a split plot factorial in a randomized complete block design with three replications at the University of Gonabad, Khorasan Razavi Province, Iran, in 2019-2020 growing season. Irrigation at two levels including normal irrigation (non-stress or control) and drought stress (complete cutoff irrigation from the grain filling stage) was considered as the main factor and salicylic acid at two levels (foliar application and non-application or control), and micronutrient foliar application at three levels (Fe, Zn, and non-application of micronutrient or control) were considered as sub-factors. Minimum tillage was employed for land preparation. The used maize variety was SC704, which is a high-yielding grain maize variety suitable for cultivation in semi-arid to temperate regions with relative resistance to environmental stresses, especially drought. The measured traits included plant height, ear diameter and weight, number of grains per row, 1000-grain weight, grain yield, and harvest index. Statistical analysis of the data, including analysis of variance and comparison of means with Duncan's multiple range test, was performed using SAS software ver. 9.4 and the graphs were drawn using Excel software ver. 14.

Research findings

The results showed that drought stress significantly reduced all the studied traits, however, foliar application of salicylic acid and micronutrients of iron and zinc effectively reduced the negative effects of drought. The simultaneous foliar application of SA with Fe and Zn, especially under drought conditions, led to a significant improvement in most of the studied traits, such as number of grains per row, 1000-grain weight, grain yield and harvest index, so that the combined application of SA along with Fe and Zn under drought conditions resulted in the greatest increase in grain yield (94.36% and 87.35%, respectively) and harvest index (77.42% and 99.42%, respectively) compared to other treatments. Also, foliar application of zinc had more favorable effects on ear diameter, grain yield and harvest index than iron. Moreover, foliar application of salicylic acid under drought stress conditions increased key traits including plant height and 1000-grain weight by 16% to 37%. Also, combination of salicylic acid and micronutrients synergistically enhanced the positive effects of their separate application.

Conclusion

The results of this study showed that foliar application of salicylic acid and micronutrient iron and zinc can be an effective strategy to reduce the negative effects of drought stress in maize. The combined application of these substances significantly improved the yield and physiological characteristics of maize plant. While foliar application of each micronutrient (iron or zinc) together with salicylic acid led to positive results, investigating the synergistic effects of the combined application of both micronutrients together with salicylic acid in future studies can clarify the metabolic pathways of drought resistance, such as antioxidant enzyme activity and phytohormone synthesis, and provide more optimal strategies to increase maize productivity in arid and semi-arid climate regions.

Keywords: Cutoff irrigation, Harvest index, Hormone-like, Micronutrients, Organic acid

Received: January 20, 2025 Accepted: August 11, 2025

Cite this article:

Amiri, M. B., Sepehri Bimorghi, M., & Mirzaeian, A. (2025). Role of micronutrients of Fe and Zn and foliar application of salicylic acid in improving maize (*Zea mays* L.) tolerance to drought stress. *Cereal Research*, *15*(2), 183-198. doi: 10.22124/CR.2025.29615.1851.

تحقیقات غلات
دوره پانزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۴ (۱۹۸-۱۸۳)
doi: 10.22124/CR.2025.29615.1851
مقاله پژوهشی
دسترسی آزاد

نقش عناصر ریزمغذی آهن و روی و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در بهبود تحمل ذرت (*Zea mays* L.) به خشکی

محمدبهزاد امیری[۱*]، محمد سپهری بیمرغی[۲] و عاطفه میرزائیان[۳]

۱- دانشیار، گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران (آدرس فعلی: دانشیار، مأمور آموزشی، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران (* نویسنده مسئول: amiri@gonabad.ac.ir; mb.amiri@um.ac.ir)

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، پژوهشکده گیاهان و مواد اولیه دارویی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده جامع

مقدمه: ذرت (*Zea mays* L.) یکی از غلات حیاتی در جهان است که به‌عنوان یک منبع غذایی و درآمدی مهم برای کشاورزان به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه به‌شمار می‌آید. این گیاه در صنایع مختلفی از جمله تولید سوخت زیستی (اتانول) کاربرد دارد. از سوی دیگر، تنش خشکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده محیطی، رشد، بهره‌وری و عملکرد ذرت را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. راه‌کارهای پایدار و سازگار با محیط زیست نظیر کاربرد ریزمغذی‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی، به‌طور موثری می‌توانند در بهبود تحمل گیاه به خشکی کمک کنند. ریزمغذی‌های ضروری مانند آهن و روی نقش حیاتی در فرآیندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیک گیاه ایفا می‌کنند. آهن در فرآیندهای تثبیت نیتروژن و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و روی در سنتز کلروفیل و متابولیسم کربوهیدرات‌ها دخیل است. علاوه بر این، اسید سالیسیلیک، به‌عنوان یک تنظیم‌کننده رشد گیاهی، مقاومت گیاهان به خشکی را افزایش می‌دهد. با توجه به شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک ایران و کمبود منابع آبی، بررسی راه‌کارهای نوآورانه برای بهبود عملکرد ذرت تحت این شرایط ضروری است. هدف از این مطالعه، بررسی اثرات کاربرد توأم ریزمغذی‌های آهن و روی همراه با اسید سالیسیلیک بر ویژگی‌های رشد و عملکرد ذرت تحت شرایط خشکی بود.

مواد و روش‌ها: آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده-فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مجتمع آموزش عالی گناباد (استان خراسان رضوی) طی سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ انجام شد. آبیاری در دو سطح شامل آبیاری نرمال (بدون تنش) و تنش خشکی (قطع کامل آبیاری از مرحله پر شدن دانه‌ها) به‌عنوان عامل اصلی و دو عامل محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در دو سطح شامل با و بدون محلول‌پاشی و محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها در سه سطح شامل آهن، روی و بدون محلول‌پاشی به‌صورت فاکتوریل به‌عنوان عوامل فرعی آزمایش در نظر گرفته شدند. از روش خاک‌ورزی حداقل برای آماده‌سازی زمین استفاده شد. رقم ذرت مورد استفاده نیز رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ بود که از رقم‌های ذرت دانه‌ای پرمحصول و مناسب کشت در مناطق نیمه‌خشک تا معتدل و دارای مقاومت نسبی در برابر تنش‌های محیطی به‌ویژه خشکی است. صفات اندازه‌گیری شده شامل ارتفاع بوته، قطر و وزن بلال، تعداد دانه در ردیف، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و شاخص برداشت بودند.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها شامل تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 انجام و نمودارهای مربوطه نیز با استفاده از نرم‌افزار Excel 14 رسم شدند.

یافته‌های تحقیق: نتایج نشان داد که تنش خشکی به‌طور معنی‌داری تمام صفات مورد بررسی را کاهش داد. با این‌حال، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و ریزمغذی‌های آهن و روی، اثرات منفی خشکی را به‌طور مؤثری کاهش دادند. کاربرد توأم اسید سالیسیلیک با آهن و روی به‌ویژه تحت شرایط خشکی، موجب بهبود قابل توجه صفاتی نظیر تعداد دانه در ردیف، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و شاخص برداشت شد، به‌طوری که کاربرد توأم اسید سالیسیلیک با آهن و روی تحت شرایط خشکی موجب بیش‌ترین افزایش عملکرد دانه (به‌ترتیب ۹۴/۳۶ و ۸۷/۳۵ درصد) و شاخص برداشت (به‌ترتیب ۷۷/۴۲ و ۹۹/۴۲ درصد) نسبت به سایر تیمارها شد. همچنین، محلول‌پاشی روی نسبت به آهن، اثرات مطلوب بیش‌تری بر قطر بلال، عملکرد دانه و شاخص برداشت داشت. علاوه بر این، کاربرد اسید سالیسیلیک تحت شرایط خشکی منجر به بهبود ۱۶ تا ۳۷ درصدی در صفات کلیدی از جمله ارتفاع بوته و وزن هزار دانه شد. همچنین، ترکیب اسید سالیسیلیک با ریزمغذی‌ها به‌طور هم‌افزا اثرات مثبت کاربرد جداگانه هر یک از این عوامل را تقویت کرد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و ریزمغذی‌های آهن و روی می‌تواند راه‌کار مؤثری برای کاهش اثرات منفی تنش خشکی در ذرت باشد. کاربرد ترکیبی این مواد، عملکرد و ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاه را به‌طور معنی‌داری بهبود بخشید. اگرچه محلول‌پاشی هر یک از ریزمغذی‌های آهن و روی همراه با اسید سالیسیلیک منجر به نتایج مثبت شد، اما بررسی اثرات هم‌افزایی کاربرد توأم هر دو ریزمغذی همراه با اسید سالیسیلیک در مطالعات آتی می‌تواند مسیرهای متابولیک مقاومت به خشکی نظیر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و سنتز هورمون‌های گیاهی را روشن‌تر کند و راه‌کارهای بهینه‌تری برای افزایش بهره‌وری ذرت در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: اسید آلی، شاخص برداشت، شبه‌هورمون، عناصر کم‌مصرف، قطع آبیاری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰

نحوه استناد به این مقاله:

امیری، محمدبهزاد، سپهری بیمرغی، محمد، و میرزائیان، عاطفه. (۱۴۰۴). نقش عناصر ریزمغذی آهن و روی و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در بهبود تحمل ذرت (*Zea mays* L.) به خشکی. *تحقیقات غلات*، *۱۵*(۲)، ۱۹۸-۱۸۳.
doi: 10.22124/CR.2025.29615.1851

مقدمه

ذرت (*Zea mays* L.) یکی از غلات مهم در جهان و در کشورهای در حال توسعه و یکی از منابع اصلی درآمد کشاورزان است. پتانسیل تولید بالای و اهمیت ذرت در تغذیه دام و طیور و همچنین تنوع فرآورده‌های حاصل از آن سبب شده است که این گیاه بیش‌تر از گذشته مورد توجه تولیدکنندگان و محققین قرار گیرد. از گیاه ذرت برای مصارف مختلفی از قبیل کاربردهای دارویی، صنعتی و تولید اتانول به‌عنوان سوخت زیستی استفاده می‌شود. ذرت در بین محصولات زراعی، از نظر سطح زیر کشت، پس از گندم (*Triticum aestivum* L.) و برنج (*Oryza sativa* L.)، رتبه سوم و از نظر عملکرد، رتبه اول را دارد (Karimi & Jolaini, 2022). گیاهان تحت شرایط طبیعی و زراعی به‌طور مداوم در معرض تنش‌های مختلف قرار می‌گیرند و در این بین خشکی مهم‌ترین عامل محدودکننده عملکرد گیاهان زراعی در بسیاری از نقاط جهان محسوب می‌شود (Arvin *et al*., 2017). یکی از اثرات مهم خشکی، برهم زدن تعادل تغذیه‌ای در گیاه از طریق کاهش حلالیت عناصر غذایی و در نتیجه کاهش جذب این عناصر است (Heidari *et al*., 2016). در این شرایط، اضافه کردن عناصر غذایی از طریق محلول‌پاشی آن‌ها می‌تواند منجر به بهبود وضعیت رشد و عملکرد گیاه شود (Rezaei-Chiyaneh *et al*., 2017).

عنصر روی یکی از ریزمغذی‌های ضروری برای رشد مطلوب گیاه است. این عنصر نقش مهمی در بسیاری از واکنش‌های بیوشیمیایی داخل گیاه دارد (Alloway, 2008). روی در تشکیل اسید ایندول استیک دخالت دارد و از این طریق رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزون بر این، روی باعث فعال شدن بسیاری از آنزیم‌های سلولی مؤثر در تولید کلروفیل و تشکیل کربوهیدرات‌ها می‌شود (Ma *et al*., 2017). کاربرد توأم محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و روی در ذرت سینگل‌کراس ۷۰۴ تحت شرایط خشکی منجر به بهبود شاخص سطح برگ، دوام سطح برگ، عملکرد زیست‌توده و عملکرد علوفه تر شد (Sam Deliri *et al*., 2021). علاوه بر این، کاربرد عنصر روی در ذرت، قطر، طول و تعداد ردیف دانه در بلال و به‌تبع آن عملکرد دانه را افزایش داد (Ahmed Hisham *et al*., 2021). آهن نیز یکی دیگر از عناصر کم‌مصرف و ضروری گیاهان است که نقش مهمی در تثبیت نیتروژن و فعالیت برخی آنزیم‌ها نظیر کاتالاز، پراکسیداز و سیتوکروم اکسیداز ایفا می‌کند. وجود عنصر آهن در ساخت کلروفیل، تولید کربوهیدرات‌ها، تنفس سلولی، احیای شیمیایی نیترات و سولفات و تبدیل نیتروژن نیتراته به اسیدهای آمینه حیاتی است (Daryosh Karimi *et al*., 2021). نتایج آزمایشی نشان داد که محلول‌پاشی عناصر آهن و روی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری، فعالیت آنزیم کاتالاز، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و به‌طور کلی رشد و نمو ذرت را افزایش داد (Daryosh Karimi *et al*., 2021).

اسید سالیسیلیک یکی از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی است که در افزایش تحمل گیاهان به تنش‌هایی نظیر خشکی مؤثر است و در بهبود فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه نقش اساسی دارد. افزایش جوانه‌زنی، القای گلدهی، بهبود رشد و نمو، افزایش میزان محصول و عملکرد گیاه، تأثیر در فعالیت‌های گیاهی از جمله باز و بسته شدن روزنه‌ها، روابط آبی، پایداری غشا، جذب عناصر غذایی، بازدارندگی سنتز اتیلن و فعال شدن عامل ایجاد مقاومت به بیماری از جمله مواردی هستند که به اسید سالیسیلیک نسبت داده می‌شوند (Hafeez *et al*., 2017; Ghassemi *et al*., 2019). در یک پژوهش، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک سبب افزایش محتوای آب نسبی برگ، میزان کلروفیل، وزن بلال و عملکرد علوفه در ذرت در شرایط خشکی شد (Madadi & Fallah, 2018). همچنین، افزایش عملکرد زیستی، شاخص برداشت، وزن هزار دانه و شاخص سطح برگ ذرت در شرایط کم‌آبیاری در اثر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک گزارش شده است (Hayati *et al*., 2019).

با توجه به اهمیت اقتصادی گیاه ذرت و همچنین اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران که در بسیاری از مناطق کشور به‌شدت با کمبود آب مواجه است، یافتن راه‌کارهای بوم‌سازگار که علاوه بر تعدیل خسارات ناشی از خشکی، منجر به بهبود ویژگی‌های کمی و کیفی این گیاه راه‌بردی شوند، ضروری به‌نظر می‌رسد. از این‌رو، این پژوهش با هدف بررسی کاربرد توأم عناصر ریزمغذی آهن و روی و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر ویژگی‌های رشدی و عملکرد ذرت انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده-فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی مجتمع آموزش عالی گناباد با عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول ۵۸ درجه

و ۴۵ دقیقه شرقی با ارتفاع ۱۰۶۰ متر از سطح دریا در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ انجام شد. اطلاعات اقلیمی منطقه طی دوره رشد گیاه در جدول ۱ ارائه شده است. آبیاری در دو سطح شامل آبیاری نرمال (بدون تنش) و تنش خشکی (قطع کامل آبیاری از مرحله پر شدن دانه‌ها) به‌عنوان عامل اصلی و دو عامل محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در دو سطح شامل با و بدون محلول‌پاشی و محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها در سه سطح شامل آهن، روی و بدون محلول‌پاشی به‌صورت فاکتوریل به‌عنوان عوامل فرعی آزمایش در نظر گرفته شدند. رقم ذرت مورد استفاده، سینگل‌کراس ۷۰۴ بود که از رقم‌های پرمحصول و متداول ذرت دانه‌ای در ایران و مناسب کشت در مناطق نیمه‌خشک تا معتدل با مقاومت نسبی مطلوب نسبت به تنش‌های محیطی (به‌ویژه خشکی) است و کیفیت دانه آن برای مصارف خوراک دام و صنایع غذایی مطلوب است.

مزرعه آزمایشی در سال قبل از کشت ذرت، به‌صورت آیش بود. آماده‌سازی زمین با تأکید بر خاک‌ورزی حداقل انجام شد، به این صورت که زمین فقط دیسک زده شد و پس از آن کلیه عملیات آماده‌سازی زمین به‌صورت دستی توسط کارگر انجام گرفت. قبل از انجام آزمایش، از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک، نمونه‌برداری و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن تعیین شد (جدول ۲). به‌منظور تغذیه گیاهان، کلیه تیمارها با مقادیر یکسان کودهای نیتروژن، فسفر و پتاس بر اساس آزمون خاک تغذیه شدند. کاشت بذر در تاریخ ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۹ به‌صورت کپه‌ای انجام شد و در هر کپه چهار عدد بذر قرار داده شد. فاصله بین ردیف‌ها ۵۰ سانتی‌متر، فاصله بین بوته‌ها روی ردیف‌ها ۳۰ سانتی‌متر و تراکم بوته، هفت بوته در متر مربع بود. این تراکم با توجه به شرایط و اهداف آزمایش انتخاب شد، زیرا در شرایط محدودیت آب، تراکم‌های بالاتر می‌توانند رقابت بین گیاهان را افزایش دهند و خشکی را تشدید کنند. بنابراین، کاهش تراکم به بهینه‌سازی مصرف آب و کاهش رقابت بین بوته‌ها کمک می‌کند. توحیدی و فلاحی (Tohidi & Falahi, 2016) نیز به‌منظور بررسی تأثیر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر عملکرد ذرت، تراکم هفت بوته در متر مربع را استفاده کردند. ابعاد کرت‌های اصلی ۸×۲ متر و کرت‌های فرعی ۲×۲ متر در نظر گرفته شد. آبیاری مزرعه بلافاصله پس از کشت به‌روش نشتی انجام شد و برای اجتناب از اختلاط آب کرت‌های مجاور، لوله‌های آبیاری جداگانه برای هر کرت در نظر گرفته شد. آبیاری برای تمامی تیمارها تا آغاز مرحله پر شدن دانه به‌صورت یکسان (هر هفت روز یک‌بار) انجام شد و برای تیمار شاهد (آبیاری کامل) تا پایان فصل رشد ادامه یافت، اما در تیمار خشکی، آبیاری از آغاز مرحله پر شدن دانه‌ها به‌طور کامل قطع شد. عملیات تنک کردن در مرحله چهار برگی برای دستیابی به تراکم مناسب گیاه انجام گرفت. جهت کنترل علف‌های هرز، سه نوبت وجین دستی، ۲، ۴ و ۶ هفته پس از کاشت انجام شد و از هیچ نوع علف‌کش، آفت‌کش یا قارچ‌کش شیمیایی استفاده نشد.

محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی آهن و روی روی برگ‌ها، هم‌زمان با اسید سالیسیلیک در دو نوبت در ساعات خنک روز (صبح زود) انجام شد: مرحله اول، شش تا هفت برگی و مرحله دوم، قبل از گلدهی (به‌ترتیب کدهای ۱۹-۱۶ و ۵۹-۵۱ در مقیاس BBCH). این روش علاوه بر کاهش هزینه‌ها و تنش ناشی از تعدد عملیات محلول‌پاشی، سبب بهبود جذب عناصر ریزمغذی توسط اسید سالیسیلیک می‌شود (Hafeez *et al*., 2017). ریزمغذی آهن به‌صورت محلول دو در هزار کلات آهن ۱۳ درصد از نوع اتیلن دی‌آمین دی‌هیدروکسی فنیل استیک اسید با فرمول شیمیایی $C_{18}H_{16}N_2O_6Fe$ و روی به‌صورت محلول دو در هزار کلات روی ۱۵ درصد از نوع اتیلن دی‌آمین تترا استیک اسید با فرمول شیمیایی $C_{10}H_{12}N_2O_8Zn$ مورد استفاده قرار گرفت (Davaran Hagh *et al*., 2016). اسید سالیسیلیک نیز با غلظت یک میلی‌مولار محلول‌پاشی شد (Tohidi & Falahi, 2016). مشخصات اسید سالیسیلیک در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- اطلاعات اقلیمی منطقه طی دوره رشد گیاه در سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹

Table 1. Meteorological parameters during plant growth period in 2019-2020

Meteorological parameter	April	May	June	July	August	September
Rainfall (mm)	0	49.5	0.5	0.5	0	0
Average monthly temperature (°C)	19.2	23.5	30.5	30.9	29.7	26.8
Maximum monthly temperature (°C)	26.4	36.5	42.4	42.8	39.7	38.8
Minimum monthly temperature (°C)	3.3	13	18.9	17.2	16.7	15.4
Monthly evapotranspiration (mm)	259.4	282.1	460.3	434.2	404.2	348.1

جدول ۲- ویژگی‌های خاک و اسید سالیسیلیک استفاده شده در این آزمایش

Table 2. Characteristics of the soil and salicylic acid used in this experiment

Soil characteristics	Value	Salicylic acid characteristics	Value
Total nitrogen (%)	0.019	Chemical formula	$C_7H_6O_3$
Available phosphorus (ppm)	8	Molar mass	138
Available potassium (ppm)	103	Density	1.4
Electrical conductivity ($dS.m^{-1}$)	4.2	Melting temperature (ºC)	158
Soil organic carbon (%)	21.7	Boiling temperature (ºC)	200
pH	8.1	Solubility in water ($g.Lit^{-1}$)	2.4
Soil texture	Sandy loam	pH	2.1

نمونه‌برداری و برداشت در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک با زرد شدن کامل برگ‌ها و خشک شدن دانه‌ها (کد ۸۹ در مقیاس BBCH) انجام شد. رطوبت دانه‌ها در زمان برداشت ۱۸ تا ۲۰ درصد بود. به‌منظور اندازه‌گیری اجزای عملکرد، پنج بوته تصادفی از هر کرت انتخاب و ارتفاع بوته، قطر و وزن بلال، تعداد دانه در ردیف و وزن هزار دانه اندازه‌گیری شد. وزن هزار دانه، با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت یک‌هزارم گرم تعیین شد. جهت تعیین عملکرد دانه، بوته‌های خطوط اصلی هر واحد آزمایشی با رعایت اثر حاشیه، برداشت و وزن دانه‌ها تعیین شد. شاخص برداشت از تقسیم عملکرد دانه به عملکرد زیستی ضرب در صد به‌دست آمد. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel 14 انجام شد.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر تیمارهای خشکی، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی بر ارتفاع بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳)، به‌طوری که محلول‌پاشی هم‌زمان اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی باعث افزایش معنی‌دار ارتفاع گیاه نسبت به عدم کاربرد عناصر و اسید آلی شد. بیش‌ترین ارتفاع گیاه (۱/۵۸ متر) در تیمار کاربرد آهن و اسید سالیسیلیک و کم‌ترین ارتفاع (یک متر) در تیمار عدم کاربرد عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک مشاهده شد (جدول ۷). نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سه‌گانه عامل‌ها نیز نشان داد که بیش‌ترین ارتفاع گیاه (۱/۶۷ متر) در شرایط بدون تنش آبی و کاربرد توأم محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و آهن و کم‌ترین ارتفاع گیاه (یک متر) تحت شرایط تنش کم‌آبی در مرحله پر شدن دانه و عدم‌کاربرد عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک مشاهده شد که البته ارتفاع گیاه با تیمار محلول‌پاشی مشابه در شرایط بدون خشکی تفاوت معنی‌داری نشان داد (جدول ۸).

کومار و همکاران (Kumar *et al*., 2017) نیز همانند این مطالعه افزایش ارتفاع ذرت را با کاربرد عنصر روی گزارش کردند. عنصر روی احتمالاً از طریق بهبود کارآیی آنزیم‌های مختلف سبب بهبود شرایط رشدی گیاه در زمان وقوع خشکی می‌شود (Afshari *et al*., 2022). هوانگ و همکاران (Huang *et al*., 2022) کاهش ارتفاع گیاه، شاخص سطح برگ و قطر ساقه ذرت را تحت شرایط خشکی و قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه گزارش کردند. در پژوهشی دیگر، محلول‌پاشی عناصر بور و آهن سبب افزایش ارتفاع ذرت شد و علت آن به تأثیرگذاری این عناصر در فرآیندهای سوخت و ساز گیاه و نقش آن‌ها در فرآیند فتوسنتز نسبت داده شد (Sewhag *et al*., 2022). آریبام و همکاران (Aribam *et al*., 2024) نیز گزارش کردند که محلول‌پاشی عنصر روی موجب بهبود رشد و نمو و افزایش عملکرد و کیفیت غذایی ذرت شد. عنصر روی در ایجاد کلروفیل ضروری است و محلول‌پاشی آن احتمالاً میزان کلروفیل را افزایش می‌دهد و از این طریق سبب بهبود فتوسنتز و در نتیجه تولید گیاهان سالم‌تر و سبزتر با ویژگی‌های رشدی مطلوب‌تر می‌شود. حیاتی و همکاران (Hayati *et al*., 2019) نشان دادند که کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط خشکی باعث بهبود صفات رویشی و عملکرد ذرت شد و علت آن را نقش این اسید آلی در تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه عنوان کردند. اسید سالیسیلیک در القای گلدهی، رشد و نمو، سنتز اتیلن، باز و بسته شدن روزنه‌ها و بهبود تنفس سلولی نقش اساسی دارد و سبب بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تلفات آب در شرایط خشکی می‌شود و در نتیجه منجر به بهبود مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی از جمله خشکی می‌شود (Hayati *et al*., 2019).

قطر و وزن بلال

تأثیر سطوح خشکی، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی بر قطر بلال در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). اعمال خشکی در مرحله پر شدن دانه سبب کاهش ۲۲ درصدی قطر بلال نسبت به شرایط بدون خشکی شد (جدول ۴). کاربرد اسید سالیسیلیک، آهن و روی نیز به‌ترتیب سبب افزایش ۲۱، ۴ و ۳۰ درصدی قطر بلال نسبت به شاهد شدند (جدول ۴). کاربرد اسید سالیسیلیک در هر دو تیمار بدون خشکی و اعمال خشکی در مرحله پر شدن دانه به‌ترتیب باعث افزایش ۲۲ و ۳۵ درصدی قطر بلال نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی این اسید آلی شد (جدول ۵). محلول‌پاشی عنصر روی در شرایط بدون خشکی افزایش ۳۴ درصدی قطر بلال را نسبت به تیمار عدم‌کاربرد عناصر ریزمغذی در همین شرایط به‌همراه داشت (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین برهمکنش اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی نشان داد که بیش‌ترین قطر بلال (۸/۹۲ سانتی‌متر) در تیمار کاربرد توأم محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عنصر روی و کم‌ترین قطر بلال (۴/۸۰ سانتی‌متر) در تیمار عدم محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی به‌دست آمد (جدول ۷). محلول‌پاشی عنصر روی توأم با اسید سالیسیلیک نسبت به عدم کاربرد این عنصر و اسید آلی باعث بهبود قطر بلال به مقدار ۶۸ و ۱۱۵ درصد به‌ترتیب در تیمار بدون خشکی و خشکی در مرحله پر شدن دانه شد (جدول ۸). در شرایط بدون خشکی، استفاده از عنصر آهن به‌صورت محلول‌پاشی توأم با اسید سالیسیلیک باعث افزایش ۴۳ درصدی قطر بلال نسبت به محلول‌پاشی عنصر آهن بدون اسید سالیسیلیک شد (جدول ۸).

تیمارهای خشکی، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی باعث تغییرات معنی‌دار در صفت وزن بلال شدند (جدول ۳). میانگین وزن بلال در شرایط بدون خشکی به‌میزان ۷۹/۵۹ گرم بیش‌تر از وزن بلال در شرایط اعمال خشکی در مرحله پر شدن دانه بود (جدول ۴). محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک، روی و آهن به‌تنهایی باعث افزایش وزن بلال به‌میزان ۳۰، ۲۵ و ۳۰ درصد نسبت به عدم‌کاربرد این اسید آلی و عناصر ریزمغذی شد (جدول ۴). محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در شرایط بدون خشکی و اعمال خشکی در مرحله پر شدن دانه نیز به‌ترتیب افزایش ۲۷ و ۳۴ درصدی وزن بلال را نسبت به عدم استفاده از این اسید آلی شد (جدول ۵). کاربرد عناصر ریزمغذی آهن و روی در هر دو تیمار بدون خشکی و اعمال خشکی سبب افزایش وزن بلال شدند، به‌طوری که محلول‌پاشی آهن و روی در شرایط بدون خشکی، وزن بلال را به‌ترتیب ۲۵ و ۳۱ درصد نسبت به عدم‌کاربرد عناصر ریزمغذی افزایش داد (جدول ۶). مقایسه میانگین برهمکنش سه‌گانه خشکی، اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی نشان داد که بیش‌ترین وزن بلال در تیمار محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و آهن (۲۲۵/۹۰ گرم) و همچنین اسید سالیسیلیک و روی (۲۴۲/۲۲ گرم) در شرایط بدون خشکی و کم‌ترین وزن بلال در تیمار عدم محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی (۶۲/۶۲ گرم) در شرایط خشکی مشاهده شد (جدول ۸). افزایش وزن و قطر بلال با کاربرد روی، احتمالاً به‌دلیل تأثیر عنصر روی در سوخت‌وساز سلولی و ممانعت این عنصر از آسیب رسیدن به پروتئین‌های غشایی، اسیدهای نوکلئیک، آنزیم‌ها، کلروفیل و ایندول استیک اسید در شرایط خشکی باشد (Ma *et al*., 2017). محلول‌پاشی آهن در مرحله پر شدن دانه سبب افزایش معنی‌دار وزن بلال شد (Afshari *et al*., 2022). در شرایط کمبود آهن، کلروفیل به مقدار کافی تولید نمی‌شود و برگ‌ها رنگ‌پریده به‌نظر می‌رسند و بنابراین مصرف آهن از طریق فرآیندهای ساختاری گیاه بر رشد گیاه اثر گذاشت (Afshari *et al*., 2022) و این اثر در وزن بلال و تعداد دانه در بلال نمایان شد.

بازدارندگی سنتز اتیلن و تأثیر در فعالیت‌های گیاهی از جمله باز و بسته شدن روزنه‌ها، روابط آبی، پایداری غشا، جذب عناصر غذایی و فعال شدن عامل ایجاد مقاومت به بیماری از جمله مواردی به‌شمار می‌روند که به اسید سالیسیلیک نسبت داده می‌شوند (Hafeez *et al*., 2017; Ghassemi *et al*., 2019). اگرچه این موارد در پژوهش حاضر اندازه‌گیری نشدند، ولی به‌نظر می‌رسد که احتمالاً اسید سالیسیلیک با تأثیر بر چنین مکانیسم‌هایی منجر به افزایش مقاومت گیاه به خشکی شده است. مددی و فلاح (Madadi & Fallah, 2018) نشان دادند که محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک سبب بهبود محتوای آب نسبی برگ، افزایش میزان کلروفیل، وزن بلال و عملکرد علوفه ذرت در شرایط خشکی شد. نوریانی (Nouriyani, 2021) نیز گزارش کردند که کاربرد اسید سالیسیلیک باعث افزایش وزن و قطر بلال شد و علت آن به نقش این اسید آلی در بهبود هدایت روزنه‌ای و محتوای نسبی آب، افزایش سرعت اسیمیلاسیون کربن و کارایی بالاتر دستگاه فتوسنتزی نسبت داده شد.

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر سطوح آبیاری، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی بر برخی ویژگی‌های رشدی و عملکرد ذرت

Table 3. Analysis of variance of the effect of irrigation levels and foliar application of salicylic acid and microelements on some growth characteristics and yield of maize

Source of variation	df	Mean square						
		Plant height	Cob diameter	Cob weight	No. of grains per row	1000-grain weight	Grain yield	Harvest index
Replication	2	0.0003^{ns}	0.68^{ns}	119.57^{ns}	0.05^{ns}	76.71^{ns}	269993^{ns}	0.13^{ns}
Drought stress (A)	1	0.18**	22.41**	57001**	336.25**	148285**	19396390**	178.97**
Main error	2	0.003	0.58	77.81	0.79	286	136256	1.37
Salicylic acid (B)	1	0.63**	20.92**	21867**	81.59**	51791**	2251100**	57.36**
Microelement (C)	2	0.29**	25.38**	7706**	50.64**	15648**	6467445**	161.73**
A × B	1	0.006^{ns}	0.14^{ns}	554^{ns}	10.83*	5393**	2097766**	31.01**
A × C	2	0.020^{ns}	1.46^{ns}	809*	5.05*	2813**	1342377**	20.04**
B × C	2	0.04**	0.34^{ns}	438^{ns}	0.51^{ns}	496^{ns}	1229481**	20.54**
A × B × C	2	0.001^{ns}	5.35*	284^{ns}	3.12^{ns}	2244**	1088604**	17.71*
Sub-error	20	0.007	1.27	198	1.42	349	115741	3.14
CV (%)	-	6.45	17.79	9.98	5.27	6.58	5.99	7.40

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

جدول ۴- مقایسه میانگین سطوح آبیاری و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی بر برخی ویژگی‌های رشدی و عملکرد ذرت

Table 4. Comparison of means of the irrigation levels and foliar application of salicylic acid and microelements on some growth characteristics and yield of maize

Experimental factors	Plant height (cm)	Cob weight (g)	No. of grains per row
No drought stress	1.43^{a}	180.91^{a}	25.69^{a}
Drought stress	1.28^{b}	101.32^{b}	19.57^{b}
Foliar application of salicylic acid	1.49^{a}	165.76^{a}	24.14^{a}
Non-application of salicylic acid	1.22^{b}	116.47^{b}	21.12^{b}
Foliar application of Fe	1.42^{a}	149.54^{a}	23.70^{a}
Foliar application of Zn	1.47^{a}	161.17^{a}	23.93^{a}
Non-application of microelement	1.18^{b}	112.63^{b}	20.26^{b}

Means followed by similar letter in each trait and each experimental factor are not significantly different.

جدول ۵- مقایسه میانگین برهمکنش سطوح آبیاری و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر برخی ویژگی‌های رشدی و عملکرد ذرت

Table 5. Comparison of means of the irrigation levels and salicylic acid foliar application interaction on some growth characteristics and yield of maize

Salicylic acid	Drought stress	Plant height (cm)	Cob diameter (cm)	Cob weight (g)	No. of grains per row	1000-grain weight (g)	Harvest index
Foliar application	Non-stress	1.58^{a}	7.84^{a}	209.48^{a}	26.64^{a}	373.95^{a}	26.49^{a}
Non-application		1.28^{bc}	6.44^{ab}	152.33^{b}	24.73^{a}	322.57^{b}	25.82^{a}
Foliar application	Drought stress	1.40^{b}	6.39^{ab}	122.04^{c}	21.63^{b}	270.07^{c}	23.89^{a}
Non-application		1.17^{c}	4.74^{b}	80.60^{d}	17.52^{c}	169.73^{d}	19.51^{b}

Means followed by similar letter in each column are not significantly different at 5% probability level.

جدول ۶- مقایسه میانگین برهمکنش سطوح آبیاری و محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی بر برخی ویژگی‌های رشدی و عملکرد ذرت

Table 6. Comparison of means of the interaction of irrigation levels and micronutrients foliar application on some growth characteristics and yield of maize

Micronutrient	Drought stress	Plant height (cm)	Cob diameter (cm)	Cob weight (g)	No. of grains per row	1000-grain weight (g)	Harvest index
Fe	Non-stress	1.50^{ab}	6.27^{bc}	191.45^{a}	26.69^{a}	360.53^{a}	25.30^{b}
Zn		1.58^{a}	9.12^{a}	207.91^{a}	26.37^{ab}	390.38^{a}	30.27^{a}
Non-application		1.21^{c}	6.03^{bc}	143.36^{b}	24.00^{b}	293.87^{b}	22.90^{b}
Fe	Drought stress	1.34^{bc}	4.54^{c}	107.64^{bc}	20.70^{c}	239.85^{bc}	23.83^{b}
Zn		1.36^{bc}	6.93^{b}	114.42^{bc}	21.49^{c}	228.28^{c}	24.21^{b}
Non-application		1.15^{c}	5.22^{bc}	81.90^{c}	16.53^{d}	191.56^{c}	17.06^{c}

Means followed by similar letter in each column are not significantly different at 5% probability level.

جدول ۷- مقایسه میانگین برهمکنش محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی بر برخی ویژگی‌های رشدی و عملکرد ذرت
Table 7. Comparison of means of the interaction of salicylic acid foliar application and micronutrients of on some growth characteristics and yield of maize

Micronutrient	Salicylic acid	Plant height (cm)	Cob diameter (cm)	Cob weight (g)	No. of grains per row	1000-grain weight (g)	Grain yield ($kg.ha^{-1}$)	Harvest index
Fe	Foliar application	1.58[a]	5.98[bc]	179.56[ab]	25.01[a]	345.35[a]	6175.33[ab]	26.43[ab]
Zn		1.53[ab]	8.92[a]	186.98[a]	25.41[a]	342.17[a]	6779.00[a]	29.40[a]
Non-application		1.36[cd]	6.45[bc]	130.73[bc]	21.99[ab]	278.50[ab]	4821.72[c]	19.74[c]
Fe	Non-application	1.27[d]	4.83[c]	119.53[c]	22.38[ab]	255.03[b]	5198.33[bc]	22.70[bc]
Zn		1.41[bc]	7.13[b]	135.35[abc]	22.46[ab]	276.48[ab]	6028.17[abc]	25.08[b]
Non-application		1.00[e]	4.80[c]	94.52[c]	18.54[b]	206.93[b]	5049.18[bc]	20.22[c]

Means followed by similar letter in each column are not significantly different at 5% probability level.

تعداد دانه در ردیف

تعداد دانه در ردیف تحت تأثیر تیمارهای خشکی، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۳). با اعمال خشکی در مرحله پر شدن دانه، تعداد دانه در ردیف به‌میزان ۲۴ درصد کاهش یافت (جدول ۴). کاربرد اسید سالیسیلیک میانگین تعداد دانه در ردیف را به‌میزان ۱۳ درصد نسبت به عدم‌محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک افزایش داد (جدول ۴). با کاربرد اسید سالیسیلیک در تیمار خشکی، تعداد دانه در ردیف به‌میزان ۲۰ درصد افزایش یافت که البته این مقدار نسبت به تیمار متناظر در شرایط بدون خشکی، ۱۹ درصد کم‌تر بود (جدول ۵). محلول‌پاشی با آهن در هر دو تیمار بدون خشکی و خشکی سبب افزایش معنی‌دار تعداد دانه در ردیف نسبت به عدم کاربرد آهن شد (جدول ۶). محلول‌پاشی با عنصر روی در تیمار بدون خشکی و خشکی نیز به‌ترتیب باعث افزایش ۳۱ و ۲۸ درصدی تعداد دانه در ردیف نسبت به عدم‌محلول‌پاشی با عنصر روی شد (جدول ۶). کاربرد توأم اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی به‌طور معنی‌داری سبب افزایش تعداد دانه در ردیف نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی شد (جدول ۷). محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی آهن و روی توأم با اسید سالیسیلیک تحت شرایط خشکی سبب شد تعداد دانه در ردیف از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با تیمار محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک به‌تنهایی و توأم با عناصر ریزمغذی آهن و روی در تیمار بدون خشکی نداشته باشد (جدول ۸). کاربرد توأم اسید سالیسیلیک با هر کدام از عناصر ریزمغذی در هر دو تیمار بدون خشکی و تنش خشکی، تعداد دانه در بوته را نسبت به عدم‌کاربرد توأم اسید سالیسیلیک و این عناصر افزایش داد (جدول ۸).

جدول ۸- مقایسه میانگین برهمکنش سطوح آبیاری، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و ریزمغذی‌های آهن و روی بر برخی ویژگی‌های ذرت
Table 8. Comparison of means of the interaction of irrigation levels and foliar application of salicylic acid and Fe and Zn micronutrients on some growth characteristics of maize

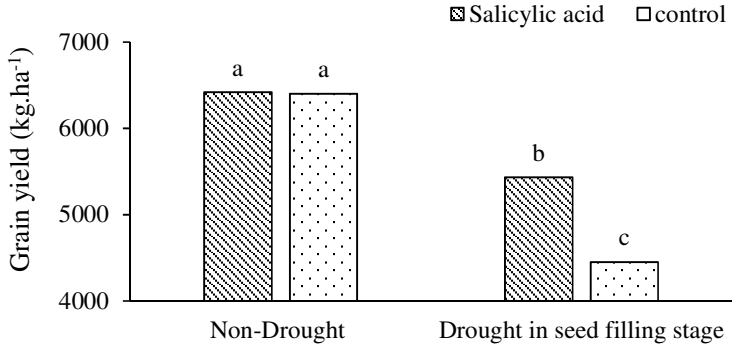
Salicylic acid	Micronutrient	Plant height (cm)	Cob diameter (cm)	Cob weight (g)	No. of grains per row	1000-grain weight (g)	Grain yield ($kg.ha^{-1}$)	Harvest index
		Non-drought stress						
Foliar application	Fe	1.67[a]	7.37[bc]	225.90[a]	28.02[a]	388.70[b]	6479.13[c]	26.63[bc]
	Zn	1.65[ab]	10.08[a]	242.25[a]	27.16[ab]	426.40[a]	7783.73[a]	32.48[a]
	Non-application	1.41[cd]	6.07[cde]	160.28[b]	24.75[cde]	306.74[de]	4991.07[e]	20.38[e]
Non-application	Fe	1.33[de]	5.17[def]	157.00[b]	25.36[bc]	332.35[cd]	5670.97[e]	23.98[cd]
	Zn	1.52[bc]	8.16[b]	173.56[b]	25.58[bc]	354.35[d]	7135.13[b]	28.06[b]
	Non-application	1.00[f]	6.00[cde]	126.43[c]	23.25[de]	281.00[ef]	6395.83[cd]	25.43[bc]
		Drought stress						
Foliar application	Fe	1.49[c]	4.58[ef]	133.23[c]	22.00[e]	302.00[de]	5871.53[cde]	26.23[bc]
	Zn	1.42[cd]	7.76[bc]	131.72[c]	23.66[de]	257.95[f]	5774.27[de]	26.33[bc]
	Non-application	1.30[de]	6.83[bcd]	101.19[d]	19.2[f]	250.25[f]	4652.37[f]	19.11[e]
Non-application	Fe	1.20[e]	4.50[ef]	82.04d[de]	19.40[f]	177.70[g]	4725.70[f]	21.42[de]
	Zn	1.30[de]	6.11[cde]	97.12[d]	19.33[f]	198.62[g]	4921.20[f]	22.09[de]
	Non-application	1.00[f]	3.61[f]	62.62[e]	13.83[g]	132.87[h]	3702.53[g]	15.01[f]

Means followed by similar letter in each column are not significantly different at 5% probability level.

به‌نظر می‌رسد که عناصر ریزمغذی آهن و روی با تأثیرگذاری بر واکنش‌های انتقال الکترون در چرخه کربس و مشارکت در تقسیم سلولی بافت مریستمی سبب افزایش تعداد دانه در ردیف شدند (Payandeh & Mojaddam, 2021). اثرات مثبت محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی در شرایط خشکی بر تعداد دانه در ردیف در ذرت در مطالعات موسانا و خلیل‌وند بهروزیار (Mosanna & Khalilvand Behrozyar, 2015) و زاهدی و علیپور (Zahedi & Alipour, 2018) نیز گزارش شده است. با وقوع تنش خشکی در مرحله پر شدن دانه، به‌دلیل کاهش انتقال مواد فتوسنتزی به دانه، تعداد دانه در بلال و تعداد دانه در ردیف کاهش می‌یابد. تحت این شرایط، کاربرد عناصر ریزمغذی احتمالاً به‌دلیل رفع کمبود عناصر غذایی و تنظیم فرآیندهای رشد و نمو در گیاه و همچنین بهبود قابلیت جذب و نگهداری رطوبت منجر به افزایش تعداد دانه در بلال می‌شوند (Abbaspour *et al.*, 2014). گزارش شده است که افزایش عملکرد دانه با محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در هر سطح آبیاری می‌تواند به‌دلیل افزایش هدایت روزنه‌ای و بهبود محتوای نسبی آب برگ باشد که زمینه را برای افزایش فتوسنتز در واحد سطح برگ فراهم می‌کند و موجب افزایش تعداد دانه در ردیف، وزن هزار دانه و عملکرد دانه می‌شود (Nouriyani, 2021). هوروات و همکاران (Horváth *et al.*, 2007) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند و گزارش کردند که تیمار اولیه گیاهان با غلظت‌های پایین اسید سالیسیلیک منجر به افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و افزایش تحمل گیاهان نسبت به انواع تنش‌های غیرزیستی می‌شود.

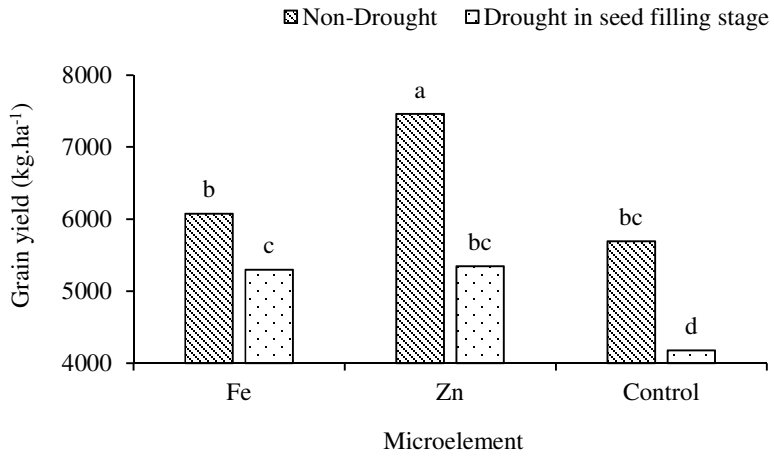
وزن هزار دانه و عملکرد دانه

وزن هزار دانه تحت تأثیر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک، عناصر ریزمغذی و تیمارهای خشکی در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۳). میانگین وزن هزار دانه در شرایط بدون خشکی ۱۲۸/۳۶ گرم نسبت به وزن هزار دانه در شرایط خشکی بیش‌تر بود (جدول ۴). محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی آهن و روی، وزن هزار دانه را به‌ترتیب ۱۹ و ۲۲ درصد نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی با این عناصر افزایش داد (جدول ۴). همچنین، کاربرد اسید سالیسیلیک در هر دو تیمار بدون خشکی و خشکی باعث افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه شد (جدول ۵). محلول‌پاشی آهن در شرایط خشکی در مرحله پر شدن دانه، وزن هزار دانه را بهبود بخشید که البته تفاوت بین این تیمار و تیمار عدم مصرف عناصر ریزمغذی در شرایط بدون خشکی از نظر آماری معنی‌دار نبود. وزن هزار دانه با محلول‌پاشی هم‌زمان اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی آهن و روی ۴۰ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت (جدول ۷). بیش‌ترین وزن هزار دانه در تیمار بدون خشکی و محلول‌پاشی هم‌زمان اسید سالیسیلیک و عنصر روی (۴۲۶/۴۰ گرم) و کم‌ترین مقدار آن در تیمار خشکی و عدم محلول‌پاشی (۱۳۲/۸۷ گرم) به‌دست آمد (جدول ۸). محلول‌پاشی هم‌زمان اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی آهن و روی در شرایط خشکی در مرحله پر شدن دانه اثرات چشم‌گیری بر وزن هزار دانه داشت، به‌طوری که بین این تیمار و تیمار بدون خشکی (بدون محلول‌پاشی) از نظر وزن هزار دانه تفاوت معنی‌داری وجود داشت (جدول ۸).



شکل ۱- مقایسه میانگین برهمکنش تنش خشکی و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر عملکرد دانه ذرت. میانگین‌های دارای حروف مشترک، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Figure 1. Comparison of means of the interaction of drought stress and salicylic acid foliar application on grain yield of maize. Means followed by similar letter are not significantly different at 5% probability level.



شکل ۲- مقایسه میانگین برهمکنش تنش خشکی و محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی بر عملکرد دانه ذرت. میانگین‌های دارای حروف مشترک، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Figure 2. Comparison of means of the interaction of drought stress and micronutrients foliar application on grain yield of maize. Means followed by similar letter are not significantly different at 5% probability level.

نتایج نشان داد که اثر هر سه عامل تنش کم‌آبی و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و ریزمغذی‌های آهن و روی بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). اعمال خشکی در مرحله پر شدن دانه منجر به کاهش ۲۳ درصدی عملکرد دانه نسبت به شرایط بدون خشکی شد (جدول ۴). در مقابل، عملکرد دانه تحت تأثیر محلول‌پاشی جداگانه آهن، روی و اسید سالیسیلیک به‌ترتیب ۱۳، ۲۳ و ۸ درصد نسبت به عدم محلول‌پاشی این عوامل افزایش یافت (جدول ۴). در شرایط اعمال تنش خشکی در مرحله پر شدن دانه نیز محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و همچنین محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی آهن و روی، عملکرد دانه را به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد (عدم محلول‌پاشی این عوامل) افزایش دادند (شکل‌های ۱ و ۲). محلول‌پاشی آهن و روی همراه با اسید سالیسیلیک در شرایط خشکی، عملکرد دانه را به‌ترتیب ۳۷ و ۳۶ درصد نسبت به شاهد بهبود بخشید (جدول ۸). همچنین، محلول‌پاشی هم‌زمان عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک به‌میزان چشم‌گیری در تخفیف خسارات ناشی از خشکی بر عملکرد دانه مؤثر بود، به‌طوری که مقدار عملکرد دانه در شرایط خشکی توأم با محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک معادل عملکرد دانه در تیمار بدون خشکی (بدون محلول‌پاشی) بود (جدول ۸).

کاهش عملکرد و وزن هزار دانه تحت خشکی احتمالاً به‌دلیل بسته شدن روزنه‌ها و در نتیجه کاهش ورود دی‌اکسید کربن به برگ، افت محتوای نسبی آب برگ و کاهش فتوسنتز در پاسخ به کمبود رطوبت خاک می‌باشد (Najafinezhad *et al*., 2020). عناصر ریزمغذی آهن و روی برای رشد ضروری هستند و در فرآیندهای فیزیولوژیک نظیر فتوسنتز، تولید هورمون‌های گیاهی و تشکیل کلروفیل دخالت دارند و با کمبود آن‌ها توازن عناصر غذایی در گیاه دستخوش تغییر می‌شود. بنابراین، افزایش عملکرد و وزن هزار دانه تحت‌تأثیر محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی می‌تواند به موارد ذکر شده نسبت داده شود (Ma *et al*., 2017; Daryosh Karimi *et al*., 2021). در پژوهشی، کاربرد عنصر روی قطر و طول بلال و تعداد ردیف در بلال و به تبع آن عملکرد دانه را در ذرت افزایش داد (Ahmed Hisham *et al*., 2021). در یک پژوهش دیگر، کاربرد توأم ریزمغذی روی و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک، شاخص سطح برگ، دوام سطح برگ، عملکرد زیست‌توده و عملکرد علوفه تر ذرت سینگل‌کراس ۷۰۴ را در شرایط خشکی بهبود بخشید (Sam Deliri *et al*., 2021). بهبود وزن هزار دانه و عملکرد دانه در شرایط خشکی با کاربرد عناصر غذایی آهن و روی توسط پاینده و مجدم (Payandeh & Mojaddam, 2021) و داریوش کریمی و همکاران (Daryosh Karimi *et al*., 2021) نیز گزارش شده است. محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک احتمالاً به‌دلیل نقشی که این اسید آلی در کاهش تعرق و فعال‌سازی سیستم آنتی‌اکسیدانی دارد، منجر به بهبود عملکرد دانه می‌شود. آنتی‌اکسیدان‌ها به‌طور مؤثری آسیب‌های حاصل از اکسیداسیون ایجاد شده توسط

رادیکال‌های آزاد را کاهش می‌هند و یا متوقف می‌کنند و از این طریق به سلامت سلول‌ها کمک می‌کنند. اثرات مثبت اسید سالیسیلیک در افزایش عملکرد سویا (Razmi *et al*., 2017)، لوبیا (Jahan & Amiri, 2019) و ذرت (Hayati *et al*., 2019) نیز گزارش شده است.

شاخص برداشت

تأثیر خشکی و محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک بر شاخص برداشت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). شاخص برداشت با اعمال خشکی ۱۷ درصد نسبت به شرایط بدون خشکی کاهش یافت (جدول ۴). محلول‌پاشی آهن و روی به‌ترتیب منجر به افزایش ۵ و ۷ درصدی شاخص برداشت نسبت به شاهد شدند (جدول ۴). تأثیر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در شرایط تنش خشکی در مرحله پر شدن دانه سبب شد که تفاوت معنی‌داری بین این تیمار با تیمارهای محلول‌پاشی و عدم محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در شرایط بدون خشکی از نظر شاخص برداشت مشاهده نشود (جدول ۷). بیش‌ترین شاخص برداشت در تیمار محلول‌پاشی هم‌زمان اسید سالیسیلیک و عنصر روی (۲۹/۴۰) و کم‌ترین آن در تیمار محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بدون عناصر ریزمغذی (۱۹/۷۴) به‌دست آمد (جدول ۷). محلول‌پاشی توأم اسید سالیسیلیک با عناصر ریزمغذی آهن و روی در شرایط خشکی افزایش ۴۳ درصدی شاخص برداشت را نسبت به شاهد به‌دنبال داشت (جدول ۸). در شرایط بدون خشکی، کاربرد اسید سالیسیلیک به‌همراه آهن و روی شاخص برداشت را به‌ترتیب ۲۳ و ۳۷ درصد نسبت به تیمار محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بدون مصرف عناصر ریزمغذی افزایش داد (جدول ۸).

در این پژوهش تأثیر عناصر ریزمغذی بر شاخص برداشت مطلوب بود که احتمالاً به‌دلیل مشارکت این عناصر در ساختار برخی از اندامک‌ها و بسیاری از واکنش‌های بیوشیمیایی گیاه باشد. عنصر آهن در تشکیل کلروفیل و انجام فتوسنتز دخالت دارد و کمبود آن به‌شدت آسیمیلاسیون را کاهش می‌دهد. عنصر روی نیز به‌عنوان بخشی از ساختمان آنزیم‌ها و یا به‌صورت کوفاکتور عمل می‌کند (Khalesi *et al*., 2022). اسید سالیسیلیک با تنظیم ویژگی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاهان تحت تنش‌های غیرزنده و به‌عنوان یک سیگنال مهم در نوسانات گیاهی در پاسخ به تنش‌های محیطی (Ghai *et al*., 2002) قادر به تغییر عملکرد گیاه در شرایط خشکی است و با افزایش عملکرد دانه باعث بهبود شاخص برداشت می‌شود. افزایش شاخص برداشت با کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط خشکی در کلزا (*Brassica napus* L.) (Eskandari Zanjani *et al*., 2021) و ذرت (Hayati *et al*., 2019) نیز گزارش شده است.

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی نتایج این آزمایش نشان داد که خشکی منجر به کاهش کلیه صفات مورد مطالعه شد. محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک، عملکرد و اجزای عملکرد ذرت را بهبود بخشید و محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی آهن و روی دارای اثر مثبت بر کلیه صفات مورد مطالعه بود. علاوه بر این، محلول‌پاشی با عنصر روی در صفات قطر بلال، عملکرد دانه و شاخص برداشت نسبت به عنصر آهن برتری داشت. نتایج نشان داد که محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک تحت شرایط خشکی در مرحله پر شدن دانه، ارتفاع بوته، وزن بلال، تعداد دانه در ردیف، وزن هزار دانه و شاخص برداشت ذرت را به‌ترتیب به‌میزان ۱۶، ۳۴، ۱۹، ۳۷ و ۱۸ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. همچنین، محلول‌پاشی عنصر روی تحت شرایط آبیاری کامل، کلیه صفات مورد مطالعه به‌جز تعداد دانه در ردیف و محلول‌پاشی آهن، ارتفاع بوته، وزن بلال، تعداد دانه در ردیف و عملکرد دانه را در مقایسه با شاهد افزایش داد. در شرایط خشکی در مرحله پر شدن دانه نیز محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی آهن و روی موجب افزایش معنی‌دار تعداد دانه در ردیف و شاخص برداشت نسبت به تیمار شاهد شد. علاوه بر این، اثرات مثبت محلول‌پاشی آهن بر صفات ارتفاع بوته، وزن بلال و وزن هزار دانه توأم با محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک تشدید شد و کاربرد هم‌زمان عنصر روی و اسید سالیسیلیک نیز قطر بلال و شاخص برداشت را نسبت به کاربرد جداگانه این عنصر افزایش داد. بررسی برهمکنش سه‌گانه تنش خشکی و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و ریزمغذی‌های آهن و روی نشان داد که در هر دو شرایط تنش و بدون تنش خشکی، محلول‌پاشی ریزمغذی‌های آهن و روی به‌همراه اسید سالیسیلیک دارای اثر مثبت بر ارتفاع بوته، قطر و وزن بلال، تعداد دانه در ردیف، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و شاخص برداشت بود. به‌طور کلی، با توجه به یافته‌های این پژوهش، کاربرد جداگانه آهن و روی در ترکیب با اسید سالیسیلیک، بهبود معنی‌داری در تحمل به خشکی و عملکرد ذرت نشان داد.

با این‌حال، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، اثرات هم‌افزایی کاربرد توأم آهن و روی (به‌صورت ترکیبی) همراه با اسید سالیسیلیک جهت دست‌یابی به راه‌کارهای بهینه‌تر برای کاهش خسارات خشکی در ذرت مورد بررسی بیش‌تر قرار گیرد. چنین مطالعاتی می‌توانند تعاملات احتمالی بین این دو عنصر را در مسیرهای متابولیک مرتبط با مقاومت به خشکی (مانند فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان یا سنتز هورمون‌های گیاهی) روشن سازند.

تضاد منافع

نویسندگان تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هر گونه روابط تجاری یا مالی که می‌تواند به‌عنوان 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 تا کنون 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

Abbaspour, E., Sinaki, J. M., Alipour, Z. T., & Saeedi Sar, S. (2014). Effect of cycocel and zinc foliar application on protein content and important elements and water use efficiency on corn under water deficit condition. *Journal of New Finding in Agriculture*, *8*(2), 159-172. [In Persian].

Afshari, M., Naderi, A., Mojadam, M., Lak, S., & Alavifazel, M. (2022). Response of physiological and biochemical parameters of maize (*Zea mays* L.) to the application of zinc and iron at irrigation cutoff conditions. *Journal of Crop Ecophysiology*, *15*(60), 515-533. [In Persian]. doi: 10.30495/jcep.2022.689804.

Ahmed Hisham, A. R., Ch'ng, H. Y., Rahman, M. M., Mat, K., & Zulhisyam, A. K. (2021). Effects of zinc on the growth and yield of maize (*Zea mays* L.) cultivated in a tropical acid soil using different application techniques. IOP Conference Series: Earth & Environmental Science, Vol. 756, 012056. 3rd Asia Pacific Regional Conference on Food Security (ARCoFS 2021). 9 March 2021, Kelantan, Malaysia. doi: 10.1088/1755-1315/756/1/012056.

Alloway, B. J. (2008). Zinc in Soils and Crop Nutrition. Second Edition. International Zinc Association (IZA) and International Fertilizer Association (IFA) Publishers, Brussels, Belgium and Paris, France. 136 p.

Aribam, B. Sh., Rajeev, D., & Devi, S. (2024). Impact of zinc foliar spray on maize (*Zea mays* L.) growth, yield and nutrient uptake. *International Journal of Research in Agronomy, 7*(6), 477-482. doi: 10.33545/2618060X.2024.v7.i6g.909.

Arvin, P., Vafabakhsh, J., & Mazaheri, D. (2017). Study of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and drought on physiological traits and ultimate yield of cultivars of oilseed rape (*Brassica* spp.). *Journal of Agroecology*, *9*(4), 1208-1226. [In Persian]. doi: 10.22067/jag.v9i4.61808.

Daryosh Karimi, N., Mojaddam, M., Lack, Sh., Payandeh, Kh., & Shokuhfar, A. (2021). The effect of superabsorbent and iron and zinc foliar application on antioxidant enzyme activity and yield maize (S.C.704) (*Zea mays* L.) under irrigation regimes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *14*(2), 387-402. [In Persian]. doi: 10.22077/escs.2020.2589.1736.

Davaran Hagh, E., Mirshekari, B., Ardakani, M. R., Farahvash, F., & Rejali, F. (2016). Evaluating Maize Yield and the Quality of Response to Vermicompost, in *Thiobacillus* and Foliar Application of Fe and Zn. *Journal Of Agroecology*, *8*(3), 359-372. [In Persian]. doi: 10.22067/jag.v8i3.35545.

Eskandari Zanjani, K., Goldani, M., Nezami, A., Shirani Rad, A. H., & Shekari, F. (2021). The effect of salicylic acid application on reducing the effect of cold stress due to delayed planting in rapeseed genotypes (*Brassica napus* L.). *Journal of Crop Production & Processing*, *11*(3), 139-156. [In Persian]. doi: 10.47176/jcpp.11.3.36571.

Ghai, N., Setia, R. C., & Setia, N. (2002). Effect of paclobutrazol and salicylic acid on chlorophyll content, hill activity and yield components in *Brescia napus* L. (cv. GSL-1). *Phytomorphology*, *52*(1), 83-87.

Ghassemi, S., Ghassemi-Golezani, K., & Zehtab Salmasi, S. (2019). Changes in antioxidant enzymes activities and physiological traits of ajowan in response to water stress and hormonal application. *Scientia Horticulturae*, *246*, 957-964. doi: 10.1016/j.scienta.2018.11.086.

Hafeez, Y., Iqbal, S., Jabeen, K., Shahzad, S., Jahan, S., & Rasul, F. (2017). Effect of biochar application on seed germination and seedling growth of *Glycine max* (L.) Merr. under drought stress. *Pakistan Journal of Botany*, *49*(S1), 7-13.

Hayati, M., Maleki, A., Mozafari, A., & Babae, F. (2019). Simultaneous effects of deficit irrigation and transpiration reducer on yield and yield components of corn single cross 704 (*Zea mays* L.). *Journal of Agroecology*, *12*(3), 389-411. [In Persian]. doi: 10.22067/jag.v12i3.74753.

Heidari, M., Goleg, M., Ghorbani, H., & Baradaran Firozabadi, M. (2016). Effect of drought stress and foliar application of iron oxide nanoparticles on gain yield, ion content and photosynthetic pigments in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, *46*(4), 619-628. [In Persian]. doi: 10.22059/ijfcs.2015.56811.

Horváth, E., Szalai, G., & Janda, T. (2007). Induction of abiotic stress tolerance by salicylic acid signaling. *Journal of Plant Growth Regulation*, *26*, 290-300. doi: 10.1007/s00344-007-9017-4.

Huang, C., Ma, S., Gao, Y., Liu, Z., Qin, A., Zhao, B., Ning, D., Duan, A., Liu, X., Chen, H., & Liu, Z. (2022). Response of summer maize growth and water use to different irrigation regimes. *Agronomy*, *12*(4), 768. doi: 10.3390/agronomy12040768.

Jahan, M., & Amiri, M. B. (2019). Effect of water superabsorbent levels, nutrition management and salicylic acid on soil characteristics, water use efficiency and morphological characteristics and yield of bean (*Phaseolous vulgaris* L.) in drought stress. *Journal of Crop Production*, *12*(3), 1-20. [In Persian]. doi: 10.22069/ejcp.2019.14761.2108.

Karimi, M., & Jolaini, M. (2022). Irrigation management and optimal water consumption in corn cultivation. *Water Management in Agriculture*, *8*(2), 79-88. [In Persian]. dor: 20.1001.1.24764531.1400.8.2.7.3.

Khalesi, A., Afsharmanesh, G., & Shirzadi, M. H. (2022). Effect of nano zinc and iron chelates ratios on yield and yield components of grain maize (*Zea mays* L.) in intercropping with cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *Journal of Crop Ecophysiology*, *16*(61), 115-132. [In Persian]. doi: 10.30495/JCEP.2022.1936820.1822.

Kumar, R., Singh, M., Meena, B. S., Ram, H., Parihar, C. M., Kumar, S., Yadav, M. R., Meena, R. K., Kumar, U., & Meena, V. K. (2017). Zinc management effects on quality and nutrient yield of fodder maize (*Zea mays*). *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, *87*(8), 1013-1017. doi: 10.56093/ijas.v87i8.73070.

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.

Madadi, E., & Fallah, S. (2018). The Effect of proline and salicylic acid on the physiological parameters and yield of silage maize under different moisture regimes. *Journal of Crop Production & Processing*, *8*(1), 15-28. [In Persian]. doi: 10.29252/jcpp.8.1.15.

Mosanna, R., & Khalilvand Behrozyar, E. (2015). Morpho-physiological response of maize (*Zea mays* L.) to zinc nano-chelate foliar and soil application at different growth stages. *Journal of New Biological Reports*, *4*(1), 46-50.

Najafinezhad, H., Ravari, S. Z., & Javaheri, M. A. (2020). Variation of forage yields and some agronomic and physiological characteristics of kochia, millet, sorghum and maize under drought stress. *Journal of Crop Ecophysiology*, *52*(4), 535-554. [In Persian]. doi: 10.30495/jcep.2020.671172.

Nouriyani H. (2021). Response of leaf gas exchanges and grain yield of S.C. 704 maize to salicylic acid foliar application under water deficit stress. *Crop Physiology Journal*, *50*(13), 151-163. dor: 20.1001.1.2008403.1400.13.50.9.6.

Payandeh, K., & Mojaddam, M. (2021). Effect of iron and zinc chelates on quantitative characteristics and amount of grain nutrients of corn (*Zea mays* L.) under different irrigation regimes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *14*(3), 719-729. [In Persian]. doi: 10.22077/escs.2019.2929.1754.

Razmi, N., Ebadi, A., Daneshian, J., & Jahanbakhsh, S. (2017). Salicylic acid induced changes on antioxidant capacity, pigments and grain yield of soybean genotypes in water deficit condition. *Journal of Plant Interactions*, *12*(1), 457-464. doi: 10.1080/17429145.2017.1392623.

Rezaei-Chiyaneh, A., Khorramdel, S., Movlodi, A., & Rahimi, A. (2017). Effects of nano chelated zinc and mycorrhizal fungi inoculation on some agronomic and physiological characteristics of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under drought stress conditions. *Iranian Journal of Filed Crops Research*, *15*(1), 168-184. [In Persian]. doi: 10.22067/GSC.V15I1.49876.

Sam Deliri, M., Moballeghi, M., Solymanpour, S., & Mousavi Mirkalaei, A. A. (2021). The effect of drought stress management by hormones and zinc on forage yield of *Zea mays* L. 704 in Isfahan Province. *Journal of Plant Environmental Physiology*, *16*(61), 106-118. [In Persian]. doi: 10.30495/iper.2021.679534.

Sewhag, M., Devi, U., Neelam, S., Hooda, V., Kharor, N., & Nagora, M. (2022). Agronomic fortification through zinc and iron application: A viable option to improve the productivity of fodder maize. *Forage Research*, *47*(4), 470-475.

Tohidi, M., & Falahi, R. (2016). Evaluation of yield and yield components of maize by foliar application of salicylic acid. *Journal of Crop Ecophysiology*, *10*(3), 645-656. [In Persian].

Zahedi, H., & Alipour, A. (2018). Effect of spraying of iron and manganese nano chelated on yield and yield component of barley (*Hordeum vulgare* L.) under water deficit stress at different growth stages. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *11*(4), 847-861. [In Persian]. doi: 10.22077/escs.2018.890.1176.