Vol 28, No. 1, Spring 2026

University of Tehran Press

Journal of Crops Improvement

Online ISSN: 2345-6957

Homepage: https://jci.ut.ac.ir/

Effect of Bio–Mineral Nutrition Management on Physiological Efficiency and Performance Stability of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under Deficit Irrigation Conditions

Razieh Pourbeirak[1] | Farhad Mohajeri[2]✉ | Mehdi Madandoust[3] | Abolfath Moradi[4]

1. Department of Agronomy, Fa. C., Islamic Azad University, Fasa, Iran. E-mail: razieh.pourbeirak@iau.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agronomy, Fa. C., Islamic Azad University, Fasa, Iran. E-mail: Farhad.mohajeri@iau.ac.ir
3. Department of Agronomy, Fa. C., Islamic Azad University, Fasa, Iran. E-mail: mehdi.madandoust@iau.ac.ir
4. Department of Soil and Water Research, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran. E-mail: ab.moradi@areeo.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 12 November 2025
Received in revised form
24 January 2026
Accepted 8 April 2026
Published online 13 April 2026

Keywords:
BioPhosphor
Irrigation Regimes
Micronutrients
Nitroxine
Proline

ABSTRACT

Objective: This study aimed to evaluate the role of bio–mineral nutrition management in enhancing drought tolerance, maintaining seed yield, and stabilizing physiological and biochemical indices of quinoa under varying irrigation levels.

Method: The experiment was conducted over two consecutive growing seasons (2021–2022 and 2022–2023) using a factorial split-plot arrangement based on a randomized complete block design with three replications. Irrigation levels (100%, 75%, and 50% of field capacity) were considered the main factor, while factorial combinations of biofertilizers (no inoculation, Nitroxine, and BioPhosphor) and foliar micronutrient sprays (control, iron, and zinc) were considered sub-factors. Measured traits included seed yield, harvest index, proline content, total carbohydrates, soluble protein, and catalase enzyme activity. In addition, soil physical and chemical properties were periodically monitored to ensure the accuracy of treatment effects and to assess potential long-term improvements in soil fertility and biological activity. Statistical analyses were performed using combined ANOVA across years, and mean comparisons were conducted by LSD at 5% probability level.

Findings: The results showed that reduced irrigation caused a significant decline in grain yield; under 75% field capacity irrigation, grain yield decreased by 25%, and under 50% field capacity irrigation, it decreased by 44% compared to full irrigation. The combination of Nitroxin with iron exhibited the highest yield in both years, reaching 2859 kg ha^{-1} under full irrigation (an increase of 22% compared to the control) and 1583 kg ha^{-1} under severe water deficit (an increase of 30% compared to the control). Harvest index also decreased under water limitation, but the BioPhosphor+ iron treatment showed the greatest stability, maintaining 13.35% under 50% field capacity compared to 18.27% in the control. Proline accumulation increased under drought stress; however, Nitroxine + iron application reduced it by up to 41% compared to the control. Additionally, BioPhosphor enhanced total carbohydrates by 37%, and Nitroxine increased leaf soluble protein by 41% under severe drought. Catalase activity increased due to reduced soil moisture, but biofertilizer inoculation, particularly with Nitroxine, moderated this increase by approximately 39%. These findings collectively highlight the synergistic role of microbial inoculants and micronutrient application in maintaining plant metabolic efficiency and reducing oxidative damage during water scarcity.

Conclusions: Overall, the findings suggest that integrated bio–mineral nutrition management, especially the combination of Nitroxine and iron, improves the nutritional and physiological status of quinoa, mitigates oxidative stress, and preserves drought-adaptive compounds, thereby significantly enhances yield and stability under water-limited condition. This strategy can be recommended as a sustainable and environmentally compatible approach to improve water-use efficiency and maintain quinoa productivity in arid and semi-arid regions. Moreover, such integrative management practices contribute to long-term soil health improvement, reduced dependence on chemical fertilizers, and enhanced resilience of cropping systems to climate variability.

Cite this article: Pourbeirak, R., Mohajeri, F., Madandoust, M., & Moradi, A. (2026). Effect of Bio-Mineral Nutrition Management on Physiological Efficiency and Performance Stability of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under Deficit Irrigation Conditions. *Journal of Crops Improvement*, 28 (1), 131-150. DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2026.406163.2962

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2026.406163.2962

دوره بیست و هشتم، شماره اول، بهار ۱۴۰۵

انتشارات دانشگاه تهران

به زراعی کشاورزی

شاپا الکترونیکی: ۶۹۵۷-۲۳۴۵

Homepage: https://jci.ut.ac.ir/

تأثیر مدیریت تغذیه زیستی– معدنی بر کارایی فیزیولوژیکی و پایداری عملکرد کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) تحت شرایط کم‌آبی

راضیه پوربیرک[۱] | فرهاد مهاجری[۲]✉ | مهدی مدن دوست[۳] | ابوالفتح مرادی[۴]

۱. گروه زراعت، واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، فسا، ایران. رایانامه: razieh.pourbeirak@iau.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت، واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، فسا، ایران. رایانامه: Farhad.mohajeri@iau.ac.ir

۳. گروه زراعت، واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، فسا، ایران. رایانامه: mehdi.madandoust@iau.ac.ir

۴. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران. رایانامه: ab.moradi@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۹
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۲۴

کلیدواژه‌ها:
بیوفسفر
پرولین
رژیم‌های آبیار
ریزمغذی‌ها
نیتروکسین

چکیده

هدف: این پژوهش با هدف ارزیابی نقش مدیریت تغذیه زیستی– معدنی در بهبود تحمل به کم‌آبی، حفظ عملکرد دانه و پایداری شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه کینوا تحت سطوح مختلف آبیاری انجام شد.

روش پژوهش: آزمایش طی دو سال زراعی متوالی (۱۴۰۱–۱۴۰۰ و ۱۴۰۲–۱۴۰۱) به‌صورت اسپلیت‌پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. سطوح آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) به‌عنوان عامل اصلی و ترکیب فاکتوریلی کودهای زیستی در سه سطح (عدم تلقیح، نیتروکسین و بیوفسفر) و محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها در سه سطح (شاهد، آهن و روی) به‌عنوان عوامل فرعی در نظر گرفته شدند. ویژگی‌های عملکرد دانه، شاخص برداشت، میزان پرولین، کربوهیدرات کل، پروتئین محلول و فعالیت آنزیم کاتالاز اندازه‌گیری شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد کاهش آبیاری موجب افت معنی‌دار عملکرد دانه گردید؛ به‌گونه‌ای که در تیمار آبیاری معادل ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، عملکرد دانه ۲۵ درصد و در تیمار آبیاری معادل ۵۰ درصد ظرفیت زراعی ۴۴ درصد نسبت به آبیاری کامل کاهش یافت. تلفیق نیتروکسین با آهن در هر دو سال بالاترین عملکرد را نشان داد، به‌طوری‌که در سال دوم تحت شرایط آبیاری متداول عملکرد را تا ۲۸۵۹ کیلوگرم در هکتار (افزایش ۲۲ درصد نسبت به شاهد) و در شرایط کم‌آبی شدید تا ۱۵۸۳ کیلوگرم در هکتار (افزایش ۳۰ درصد نسبت به شاهد) ارتقا داد. شاخص برداشت نیز با محدودیت آب کاهش یافت، اما تیمار بیوفسفر+ آهن بیش‌ترین پایداری را نشان داد و در شرایط آبیاری پس از ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مقدار ۳۵/۱۳ درصد را حفظ کرد (در مقابل ۲۷/۱۸ درصد در شاهد). تجمع پرولین در شرایط کم‌آبی افزایش یافت، اما کاربرد نیتروکسین+ آهن موجب کاهش آن تا ۴۱ درصد نسبت به شاهد شد. هم‌چنین، کاربرد بیوفسفر موجب افزایش ۳۷ درصد در کربوهیدرات کل و نیتروکسین سبب افزایش ۴۱ درصد در پروتئین محلول برگ در شرایط کم‌آبی شدید گردید. فعالیت آنزیم کاتالاز در اثر کاهش رطوبت افزایش یافت، اما تلقیح زیستی به‌ویژه با نیتروکسین، این افزایش را تا حدود ۳۹ درصد تعدیل کرد.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی، نتایج بیانگر آن است که مدیریت تلفیقی تغذیه زیستی– معدنی، به‌ویژه تلفیق نیتروکسین با آهن، با بهبود وضعیت تغذیه‌ای و فیزیولوژیکی گیاه، کاهش اثرات اکسیداتیو و حفظ ترکیبات سازگار با کم‌آبی، موجب افزایش معنی‌دار عملکرد و پایداری کینوا در شرایط محدودیت آبی می‌شود. این راهبرد می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای پایدار و زیست‌سازگار برای بهبود کارایی مصرف آب و حفظ عملکرد کینوا در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور مناسب خواهد بود.

استناد: پوربیرک، راضیه؛ مهاجری، فرهاد؛ مدن‌دوست، مهدی و مرادی، ابوالفتح (۱۴۰۵). تأثیر مدیریت تغذیه زیستی– معدنی بر کارایی فیزیولوژیکی و پایداری عملکرد کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) تحت شرایط کم‌آبی. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۸ (۱)، ۱۳۱–۱۵۰.

DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2026.406163.2962

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران. © نویسندگان.

CC BY NC

۱. مقدمه

افزایش فشارهای اقلیمی ناشی از تغییرات جهانی آب‌وهوا، به‌ویژه افزایش فراوانی و شدت خشک‌سالی، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌رود. در چنین شرایطی، کاهش وابستگی به منابع آبی و بهره‌گیری از راهبردهای مدیریتی مبتنی بر استفاده بهینه از نهاده‌ها، به‌ویژه نهاده‌های زیستی، در اولویت کشاورزی پایدار قرار گرفته است (توبالی[۱] و همکاران، ۲۰۲۲). یکی از رویکردهای مؤثر، مدیریت تنش خشکی از طریق کم‌آبیاری کنترل‌شده همراه با تحریک طبیعی توان زیستی گیاه با استفاده از عوامل محرک رشد و عناصر تغذیه‌ای ضروری است (غدیرنژاد شیده[۲] و همکاران، ۲۰۲۳). کم‌آبیاری در صورت مدیریت صحیح تغذیه‌ای می‌تواند با کاهش مصرف آب، عملکرد را حفظ کند، در غیر این صورت موجب افزایش تنش اکسیداتیو، افت رشد و کاهش عملکرد می‌شود (حدج منصور[۳] و همکاران، ۲۰۲۴). شاخص‌های بیوشیمیایی مانند پرولین، قندهای محلول، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و مالون‌دی‌آلدهید ابزارهای دقیقی برای ارزیابی پاسخ گیاه به خشکی هستند (سید[۴] و میرصافی،[۵] ۲۰۲۴). کینوا[۶] متعلق به خانواده *Chnopodiaceae*، گیاهی شبه‌غله و بومی آند است که به‌دلیل ترکیب متعادل اسیدهای آمینه و سازگاری بالا با تنش‌های محیطی از جمله خشکی، شوری و فقر خاک، به‌عنوان گزینه‌ای استراتژیک در کشاورزی مقاوم به تغییرات اقلیمی مطرح شده است (چادهاری[۷] و همکاران). با وجود این، عملکرد آن تحت تنش آبی ممکن است کاهش یابد، زیرا خشکی سبب افت فتوسنتز، اختلال در متابولیسم نیتروژن و کاهش جذب عناصر می‌شود (اکرم[۸] و همکاران، ۲۰۲۳). ازاین‌رو، به‌کارگیری ترکیب‌های زیستی و تغذیه‌ای برای ارتقای تحمل تنش و کارایی مصرف منابع ضروری است.

کودهای زیستی نیتروکسین و بیوفسفر به‌ترتیب حاوی باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن[۹] و حل‌کننده فسفر[۱۰] هستند که با افزایش دسترسی عناصر غذایی، بهبود رشد ریشه، ترشح فیتوهورمون‌ها و تحریک سیستم دفاعی گیاه، سازگاری با تنش‌های محیطی را تقویت می‌کنند (نگویان[۱۱] و همکاران، ۲۰۲۴). نیتروکسین از طریق بهبود جذب نیتروژن و کاهش گونه‌های فعال اکسیژن، تحمل به خشکی را افزایش می‌دهد، درحالی‌که بیوفسفر با ترشح اسیدهای آلی و آزادسازی فسفر تثبیت‌شده، متابولیسم انرژی را بهبود می‌بخشد. اهمیت این میکروارگانیسم‌ها در شرایط کم‌آبی، که جذب عناصر کاهش می‌یابد، دوچندان است و موجب افزایش کارایی کودهای شیمیایی و پایداری سیستم زراعی می‌شود (وال رمئو[۱۲] و همکاران، ۲۰۲۳). عناصر غذایی آهن و روی نیز با وجود نیاز کم، در فرایندهایی همانند سنتز کلروفیل، انتقال الکترون، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، تنظیم اسمزی و متابولیسم کربوهیدرات و پروتئین نقش اساسی دارند. کمبود آن‌ها در خاک‌های آهکی و قلیایی می‌تواند استرس اکسیداتیو ناشی از خشکی را تشدید کند (کشاورز[۱۳] و همکاران، ۲۰۲۴). عنصر آهن به‌عنوان کوفاکتور کلیدی در سنتز کلروفیل و انتقال الکترون، کارایی فتوسنتز را حفظ می‌کند (فاتانت‌وش[۱۴] و همکاران، ۲۰۲۴) و عنصر روی با تثبیت غشاها و

1. Toubali
2. Ghadirnezhad Shiade
3. Hadj Mansour
4. Sayyed
5. Mirsafi
6. *Chenopodium quinoa* Willd
7. Chaudhary
8. Akram
9. *Azotobacter*, *Azospirillum*
10. *Pseudomonas*, *Bacillus*
11. Youssef
12. Valle-Romero
13. Keshavarz
14. Fatanatvash

تنظیم فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی تحمل خشکی را افزایش می‌دهد. بنابراین، محلول‌پاشی این عناصر در مراحل بحرانی نمو می‌تواند ضمن بهبود تغذیه، مسیرهای دفاعی گیاه را فعال کند (باقری و همکاران، ۱۴۰۱). ازآنجایی‌که، مطالعات درباره اثرات تعاملی میان محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها، سطوح آبیاری و کاربرد کودهای زیستی محدود است، پژوهش حاضر با هدف بررسی نقش مدیریت تغذیه زیستی– معدنی در بهبود تحمل به خشکی و عملکرد دانه کینوا تحت شرایط کم‌آبیاری انجام شد.

۲. پیشینهٔ پژوهش

۲. ۱. پیشینهٔ نظری

در نظام‌های کشاورزی نوین، تغییرات اقلیمی، محدودیت منابع آب و افت حاصلخیزی خاک از مهم‌ترین چالش‌های پایداری تولید به‌شمار می‌روند. در چنین شرایطی، رویکردهای کلاسیک تغذیه و آبیاری پاسخگوی نیازهای فزاینده تولید نیستند و بهره‌گیری از راه‌کارهای تلفیقی مبتنی بر مدیریت زیستی و تغذیه‌ای ضرورتی انکارناپذیر است. مدیریت تلفیقی نهاده‌های زیستی و تغذیه‌ای به‌عنوان رهیافتی نوین در کشاورزی پایدار، با هدف افزایش کارایی مصرف منابع، بهبود رشد و تقویت مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی از جمله خشکی موردتوجه قرار گرفته است (ایمران[1]، ۲۰۲۴). در این رهیافت، استفاده هم‌زمان از میکروارگانیسم‌های مفید خاک‌زی و عناصر تغذیه‌ای ضروری، مسیرهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه را به‌گونه‌ای فعال می‌کند که ضمن حفظ عملکرد، مصرف آب و کودهای شیمیایی کاهش یابد. از دیدگاه فیزیولوژیکی، اساس این رویکرد بر توانایی گیاه در بازآرایی مسیرهای متابولیکی و دفاعی در برابر تنش است. تحریک این مسیرها از طریق نهاده‌های زیستی و تغذیه‌ای موجب حفظ تعادل اسمزی، پایداری غشاها، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تنظیم متابولیسم عناصر غذایی می‌شود (فاروک[2] و همکاران، ۲۰۲۴).

در این میان، کینوا به‌عنوان شبه‌غله‌ای با ارزش تغذیه‌ای بالا و مقاومت نسبی در برابر خشکی، شوری و فقر غذایی، نمونه‌ای شاخص برای مطالعه سازوکارهای تحمل به تنش است. این گیاه توانایی بالایی در تعدیل فشار اسمزی، تجمع پرولین و ترکیبات فنولی دارد، اما حتی کینوا نیز در کم‌آبی دچار افت رشد، کاهش فتوسنتز و اختلال در تعادل یونی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی می‌شود (اکرم و همکاران، ۲۰۲۳). ازاین‌رو، استفاده از ترکیبات زیستی و تغذیه‌ای برای تقویت فیزیولوژی دفاعی آن اهمیت ویژه‌ای دارد. در این چارچوب، کودهای زیستی حاوی باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن (*Azotobacter* و *Azospirillum*) یا حل‌کننده فسفر (مانند *Bacillus* و *Pseudomonas*) با ترشح فیتوهورمون‌ها و اسیدهای آلی، باعث توسعه ریشه، بهبود جذب عناصر و فعال‌سازی سامانه‌های دفاعی گیاه می‌شوند (نگویان و همکاران، ۲۰۲۴). هم‌افزایی بین کودهای زیستی و ریزمغذی‌ها حاصل تعاملات پیچیده در ریزوسفر و اندام‌های هوایی است که می‌تواند جذب عناصر، تثبیت نیتروژن، تعادل یونی و مقاومت اکسیداتیو را بهبود بخشد. با وجود شواهد پراکنده درباره هر یک از این مؤلفه‌ها، مطالعات جامع در زمینه اثرات هم‌زمان مدیریت زیستی و تغذیه‌ای تحت تنش خشکی محدود است، ازاین‌رو، بررسی مکانیزم‌های تلفیقی مقاومت به خشکی در گیاهان استراتژیک مانند کینوا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۲. ۲. پیشینهٔ تجربی

پژوهش‌های اخیر به بررسی اثرات مدیریت زیستی و تغذیه‌ای بر تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی، به‌ویژه خشکی، پرداخته‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب عوامل زیستی، عناصر تغذیه‌ای و الگوهای آبیاری نقش مهمی در بهبود رشد،

1. Imran
2. Farouk

عملکرد و شاخص‌های بیوشیمیایی دارد. در مطالعه‌ای روی کینوا تحت سطوح مختلف کم‌آبی، افزایش شدت تنش موجب کاهش وزن خشک، طول ریشه و ساقه و عملکرد دانه شد، درحالی‌که غلظت پرولین، فنول و کاروتنوئید افزایش و کلروفیل کاهش یافت. هم‌چنین، کاهش پایداری غشا و غلظت پتاسیم با شدت تنش همراه بود و همبستگی بالایی میان ویژگی‌های فیزیولوژیکی و شاخص تحمل خشکی مشاهده گردید (صدیق[1] و همکاران، ۲۰۲۱). این نتایج نشان می‌دهد ویژگی‌های فیزیولوژیکی می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های مؤثر در شناسایی ژرم‌پلاسم‌های متحمل به خشکی استفاده شوند. در پژوهشی دیگر، اثر کودهای زیستی قارچی و باکتریایی بر ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک کینوا تحت تنش شوری بررسی شد. کاربرد قارچ *Trichoderma* توأم با کود زیستی نیتروژن موجب افزایش طول ریشه و ساقه و وزن خشک گیاه گردید. با وجود افزایش یون‌های سدیم و پتاسیم در شرایط تنش، نسبت K/Na کاهش یافت، اما حضور قارچ اثرات منفی را تعدیل کرد. ترکیب قارچ و کود فسفر در سطوح بالای شوری نیز موجب افزایش محتوای فنول و فلاونوئید برگ‌ها و بهبود مکانیسم‌های آنتی‌اکسیدانی شد (کریمی[2] و همکاران، ۲۰۲۲). در مطالعه‌ای دیگر، استفاده از جلبک سبز تک‌سلولی به‌عنوان پرایمر بذر و کود زیستی بررسی گردید. این جلبک با تأمین طبیعی عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم موجب افزایش طول ریشه، شاخه و وزن تر گیاهچه در شرایط شوری–قلیایی شد. پرایمینگ با دوزهای ۲۵ و ۵۰ درصد کود زیستی به‌ترتیب موجب افزایش جوانه‌زنی تا ۳/۲۹ و ۶/۱۲ درصد گردید، درحالی‌که دوزهای بالاتر اثر بازدارنده داشتند. هم‌چنین، غلظت عناصر قابل‌جذب خاک و بنیه گیاهچه افزایش یافت (ما[3] و همکاران، ۲۰۲۲).

مطالعه میرطیبی[4] (۲۰۲۴) اثرات هم‌زمان تنش خشکی، کود زیستی و نانوپتاسیم را بر رشد و عملکرد کینوا بررسی کردند. استفاده از سه درصد کود زیستی در آبیاری متداول، بیش‌ترین عملکرد بیولوژیک و دانه (۸۹۲۶ و ۲۸۰۹ کیلوگرم در هکتار) را تولید نمود. بیش‌ترین پرولین در تنش شدید خشکی و بدون کود زیستی (۵۲/۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و کم‌ترین در آبیاری متداول با سه درصد کود زیستی (۲۵/۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد. هم‌چنین، بالاترین میزان پروتئین و روغن دانه در تیمارهای دارای کود زیستی و نانوپتاسیم ثبت گردید که نشان‌دهنده نقش تقویت‌کننده این نهاده‌ها در حفظ کارایی فیزیولوژیک گیاه تحت خشکی است.

از سوی دیگر، مطالعات متعدد نقش ریزمغذی‌های فلزی در تعدیل اثرات خشکی را تأیید کرده‌اند. در پژوهشی روی گندم زمستانه، محلول‌پاشی یا مصرف خاکی سولفات‌آهن و روی موجب افزایش معنی‌دار محتوای آب نسبی و کلروفیل برگ در تنش خشکی (۴۰ درصد ظرفیت زراعی) شد، درحالی‌که پرولین و آسیب غشایی کاهش یافت و عملکرد دانه افزایش پیدا کرد. بیش‌ترین اثر زمانی حاصل شد که هر دو عنصر به‌صورت ترکیبی محلول‌پاشی شدند (مانان[5] و همکاران، ۲۰۲۲). در بررسی دیگری روی کینوا، محلول‌پاشی ترکیبی ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر پتاسیم و ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر روی، بیش‌ترین عملکرد دانه را به‌همراه افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز و تجمع گلیسین‌بتائین و پرولین نشان داد (زحمتکش[6] و همکاران، ۲۰۲۴). این نتایج بیانگر آن است که ترکیب عناصر غذایی پتاسیم و روی مکانیسم‌های دفاعی و آنتی‌اکسیدانی گیاه را در کم‌آبی فعال می‌کند. در مجموع، مرور پژوهش‌ها نشان می‌دهد هر یک از نهاده‌های مدیریتی، اعم از کودهای زیستی، محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها یا بهینه‌سازی آبیاری، می‌تواند اثرات مثبتی بر کاهش خسارت‌های ناشی از خشکی داشته باشد. با این‌حال، مطالعات اندکی به بررسی برهم‌کنش هم‌زمان این عوامل در

1. Saddiq
2. Karimi
3. Ma
4. Mirtayebi
5. Mannan
6. Zahmatkesh

قالب مدل‌های آزمایشی یکپارچه پرداخته‌اند. ازاین‌رو، نیاز به پژوهش‌های جامع برای تحلیل اثرات تلفیقی مدیریت زیستی و تغذیه‌ای در شرایط کم‌آبی به‌منظور توسعه نظام‌های کشاورزی پایدار بیش از پیش احساس می‌شود.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳. ۱. زمان اجرا و طرح آزمایش

این پژوهش طی دو فصل زراعی متوالی ۱۴۰۱–۱۴۰۰ و ۱۴۰۲–۱۴۰۱ در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و منابع طبیعی زرقان (استان فارس) انجام شد. در سال زراعی ۱۴۰۱–۱۴۰۰، کاشت کینوا در تاریخ ۲۲ اسفندماه ۱۴۰۰ انجام گرفت و برداشت محصول در تاریخ ۱۲ تیرماه ۱۴۰۱ صورت پذیرفت. در سال زراعی ۱۴۰۲–۱۴۰۱ نیز کاشت در تاریخ ۲۰ اسفندماه ۱۴۰۱ و برداشت در تاریخ ۱۰ تیرماه ۱۴۰۲ انجام شد. محل آزمایش در در عرض ۴۶ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و طول ۴۴ درجه و ۵۲ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۶۰۰ متر از سطح دریا واقع است. براساس شاخص خشکی دمارتن، منطقه در رده نیمه‌خشک قرار دارد. میانگین بارندگی سالانه ۳۴۶ میلی‌متر، میانگین بیشینه دما در تیرماه ۳۸/۱ و میانگین کمینه دما در دی‌ماه ۰/۷ درجه سانتی‌گراد است. چنین شرایطی با محدودیت آبی، تبخیر بالا و نوسانات حرارتی، محیطی مناسب برای ارزیابی گیاهان مقاوم به خشکی مانند کینوا فراهم می‌کند. آزمایش به‌صورت فاکتوریل اسپلیت‌پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی شامل سه سطح آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) و عامل فرعی ترکیبی از سه سطح کود زیستی (بدون تلقیح، نیتروکسین و بیوفسفر) و سه سطح محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها (بدون محلول‌پاشی، سولفات‌آهن و سولفات‌روی) بودند. پیش از آغاز آزمایش، از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر خاک نمونه‌برداری و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن تعیین شد (جدول ۱). نتایج آزمون خاک نشان داد که خاک منطقه از نظر نیتروژن کل، فسفر قابل‌جذب و روی در محدوده پایین تا متوسط قرار دارد، درحالی‌که آهن در محدوده کافی بود. با توجه به هدف پژوهش که بررسی نقش مدیریت تغذیه زیستی– معدنی در شرایط کم‌آبی بود، از مصرف کودهای شیمیایی پرمصرف در طول دوره آزمایش خودداری شد تا اثر کودهای زیستی و محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها بدون تداخل کودهای شیمیایی ارزیابی شود. در این چارچوب، تلقیح زیستی به‌منظور بهبود دسترسی گیاه به نیتروژن و فسفر و محلول‌پاشی عناصر آهن و روی به‌عنوان تغذیه تکمیلی و هدفمند در مراحل حساس رشد انجام گرفت.

جدول ۱. مشخصات خاک محل آزمایش

عمق نمونه (سانتی‌متر)	اسیدیته	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	پتاسیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	فسفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	آهن (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	نیتروژن (درصد)	کربن آلی (درصد)	بافت خاک
۰–۳۰	۷/۳	۲/۱	۲۳۰	۹/۵	۳/۸	۰/۶	۰/۰۹	۱/۳۲	سیلتی لوم

در این پژوهش از رقم «صدوق» استفاده شد که دومین رقم رسمی معرفی‌شده کینوا در ایران و جایگزین رقم «تیتیکاکا» است. این رقم به‌دلیل عملکرد بالاتر، تحمل بیش‌تر به شوری، رسیدگی زودرس، درصد پایین بذرهای ریز، یکنواختی مطلوب و میزان کم‌تر ساپونین، برتری دارد. عملکرد آن حدود ۸۰۰ کیلوگرم در هکتار بیش از تیتیکاکا گزارش شده است. ارتفاع بوته در شرایط غیرشور و در شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب ۱۳۷ و ۸۴ سانتی‌متر بوده که بیانگر سازگاری بالا با شوری و پایداری عملکرد در مناطق مختلف است. نیاز آبی برای بیشینه عملکرد دانه ۳۴۸ تا ۵۴۴ میلی‌متر تعیین شد. با توجه به حساسیت مرحله زایشی به کم‌آبی، برنامه آبیاری براساس مراحل فنولوژیکی گیاه تنظیم گردید. ظرفیت زراعی خاک ۲۹ درصد

در نظر گرفته شد و در تیمارهای ۷۵ و ۵۰ درصد، آبیاری زمانی انجام شد که رطوبت خاک به‌ترتیب به ۲۱/۷ و ۱۴/۵ درصد کاهش یافته بود. حجم آب هر نوبت آبیاری با استفاده از اختلاف رطوبت خاک فعلی و ظرفیت زراعی، عمق مؤثر ریشه، چگالی ظاهری خاک، سطح زیرکشت و راندمان ۹۰ درصد محاسبه شد. آب آبیاری به‌صورت یکنواخت و تدریجی بر سطح مزرعه اعمال شد تا رطوبت موردنظر در تمام لایه‌های ریشه تأمین شود و گیاه در هر مرحله فنولوژیکی به میزان کافی آب دریافت نماید. در تیمار کود زیستی، بذرهای کینوا پیش از کاشت با کودهای زیستی نیتروکسین و بیوفسفر تلقیح شدند. کود زیستی نیتروکسین (کود زیستی مایع حاوی باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن *Azotobacter* spp. و *Azospirillum* spp.) با حداقل جمعیت (10^8) واحد تشکیل‌دهنده کلنی در میلی‌لیتر؛ تولید شرکت بهاران، ایران) و کود زیستی بیوفسفر (کود زیستی مایع حاوی باکتری‌های حل‌کننده فسفات از جنس *Bacillus* و *Pseudomonas* با حداقل جمعیت (10^8) واحد تشکیل‌دهنده کلنی در میلی‌لیتر؛ تولید شرکت بهاران، ایران) در این پژوهش مورداستفاده قرار گرفتند.

محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها در مراحل شش تا هشت‌برگی و آغاز گلدهی با محلول سولفات‌آهن و روی (۲ گرم در لیتر، حجم ۳۰۰ لیتر در هکتار) در ساعات اولیه صبح انجام شد تا تبخیر و سوختگی برگ‌ها به حداقل برسد. کرت‌های آزمایشی شامل شش ردیف کاشت با فاصله ردیف ۳۰ و فاصله بوته ۱۰ سانتی‌متر (تراکم حدود ۳۳ بوته در مترمربع) بودند. کاشت به‌صورت دستی و به‌روش خشک‌کاری انجام گرفت. ردیف‌های کناری و نیم‌متر ابتدا و انتهای هر کرت به‌عنوان حاشیه حذف شد. نمونه‌برداری فیزیولوژیک از دو ردیف میانی و برداشت عملکرد از دو ردیف مجاور از سطح ۵ مترمربع انجام شد. برای تعیین پروتئین محلول، پس از عصاره‌گیری پروتئین‌ها از بافت گیاهی، محلول برادفورد به نمونه‌ها اضافه گردید که موجب تغییر رنگ و تشکیل کمپلکسی رنگی با پروتئین‌ها می‌شود. سپس جذب نور در طول موج ۵۹۵ نانومتر اندازه‌گیری و از روی منحنی استاندارد پروتئین، غلظت پروتئین‌ها محاسبه شد (بردفورد[1]، ۱۹۷۶). میزان کربوهیدرات کل با استفاده از روش فنول-سولفوریک اسید اندازه‌گیری شد. در این روش، پس از عصاره‌گیری کربوهیدرات‌ها از بافت گیاهی، محلول فنول-سولفوریک اسید به نمونه‌ها اضافه شد که منجر به تغییر رنگ محلول می‌شود. شدت رنگ ایجادشده در طول موج ۴۹۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری و میزان کربوهیدرات کل در نمونه‌ها محاسبه شد (دوبیاس[2] و همکاران، ۱۹۵۶). برای تعیین محتوای پرولین، از واکنش پرولین با نین‌هیدرین در محیط اسیدی استفاده شد. در این روش، عصاره‌های گیاهی تحت واکنش با نین‌هیدرین قرار گرفتند و پس از گرما، محصول نهایی به رنگ قرمز متمایل به نارنجی در آمد. شدت رنگ حاصل در طول موج ۵۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد و میزان پرولین براساس منحنی استاندارد محاسبه شد (باتیس[3] و همکاران، ۱۹۷۳). داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۱) مورد تجزیه واریانس قرار گرفته و میانگین‌ها به‌وسیله آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD)[4] در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند. برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار اکسل[5] (نسخه ۲۰۱۳) استفاده گردید.

۴. یافته‌های پژوهش

نتایج تحلیل واریانس مرکب نشان داد که اثرات اصلی رژیم آبیاری، کاربرد زیست‌کود و محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها در سطح احتمال یک درصد بر عملکرد دانه، شاخص برداشت و پرولین کینوا معنی‌دار بودند. افزون بر این، هر سه ویژگی

1. Bradford
2. Dubois
3. Bates
4. Least Significant Difference
5. Excel

ذکرشده در سطح احتمال ۵ درصد تحت تأثیر اثر برهم‌کنش سال، رژیم آبیاری، زیست‌کود و محلول‌پاشی قرار گرفتند. میزان کربوهیدرات کل، پروتئین محلول و فعالیت آنزیم کاتالاز کینوا نیز در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر اثرات تیمارها و هم‌چنین اثر برهم‌کنش آبیاری در کود زیستی و اثر برهم‌کنش آبیاری در محلول‌پاشی قرر گرفتند (جدول ۲). بر این اساس، در ادامه به تفسیر تفصیلی اثرات برهم‌کنش این تیمارها بر ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده پرداخته می‌شود.

۴. ۱. عملکرد دانه

در سال نخست آزمایش، تحت آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی)، ترکیب نیتروکسین با آهن و نیتروکسین با روی به‌ترتیب عملکرد دانه را حدود ۱۸ درصد افزایش داد و به ۲۸۰۶ کیلوگرم در هکتار رسید، درحالی‌که ترکیب بیوفسفر با آهن و بیوفسفر با روی به‌ترتیب افزایش ۱۲ و ۱۰ درصد داشتند. در سطح آبیاری ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، عملکرد شاهد ۱۷۸۴ کیلوگرم در هکتار بود و تیمار نیتروکسین+ آهن با ۲۱۴۱ کیلوگرم در هکتار بیش‌ترین عملکرد را نشان داد و از سایر تیمارها آماری برتر بود. تحت تنش شدید آب (۵۰ درصد ظرفیت زراعی)، عملکرد شاهد ۱۳۰۸ کیلوگرم در هکتار کاهش یافت و نیتروکسین+ آهن با ۱۷۴۱ کیلوگرم در هکتار (افزایش ۳۳ درصد) بالاترین عملکرد را داشت و از نیتروکسین+ روی و ترکیبات بیوفسفر برتر بود (جدول ۳). در سال دوم، تحت آبیاری کامل، بیش‌ترین عملکرد مربوط به نیتروکسین+ آهن و بیوفسفر+ آهن با ۲۸۵۹ و ۲۸۰۲ کیلوگرم در هکتار بود که به‌ترتیب ۲۲ و ۲۰ درصد نسبت به شاهد افزایش داشتند. تیمارهای نیتروکسین+ روی و بیوفسفر+ روی بهبود کم‌تری نشان دادند. در سطح ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، تیمار نیتروکسین+ آهن بیش‌ترین عملکرد (۲۲۱۷ کیلوگرم در هکتار، افزایش ۱۸ درصد) را داشت و از سایر تیمارها برتر بود. در شرایط کمبود شدید آب (۵۰ درصد ظرفیت زراعی)، عملکرد شاهد ۱۲۱۸ کیلوگرم در هکتار بود و نیتروکسین+ آهن با ۱۵۸۳ کیلوگرم در هکتار (افزایش ۳۰ درصد) بالاترین عملکرد را داشت و از سایر تیمارها به‌طور معنی‌داری برتر بود (جدول ۳). به‌طورکلی، کاهش آبیاری عملکرد دانه را ۳۰–۲۰ درصد در سطح ۷۵ درصد و ۵۲–۳۵ درصد در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی کاهش داد، اما تیمارهای حاوی آهن به‌ویژه در ترکیب با نیتروکسین در حفظ عملکرد دانه کینوا تحت تنش خشکی مؤثرتر بودند.

جدول ۲. تجزیه واریانس صفات عملکردی و بیوشیمیایی کینوا در سطوح مختلف آبیاری، کودهای زیستی و ریزمغذی‌ها

منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد دانه	شاخص برداشت	پرولین	کربوهیدرات کل	پروتئین محلول	فعالیت آنزیم کاتالاز
سال (Y)	۱	۳۵۰۱۷/۴۱**	۶۶/۱۱**	۵۱۲۳/۴۴**	۷۷/۴۱**	۳۵/۹۲**	۴۸/۲۳**
تکرار در سال (R × Y)	۴	۴۰۱۱/۰۶	۱/۰۴	۴/۷۸	۱/۸۷	۲/۴۷	۲/۷۴
آبیاری (I)	۲	۲۰۵۲۸/۱۶**	۷/۳۹**	۴۸۱۲/۹۷**	۳۷/۸۰**	۱۷/۴۵**	۲۱/۹۲**
Y ×I	۲	۸۱۴۷/۴۹*	۲/۰۹ ns	۱۸۹۰/۲۲**	۱/۴۷ ns	۱/۱۱ ns	۳/۵۴ ns
خطای اصلی	۱۲	۲۸۷۴/۰۳	۱/۰۹	۴/۵۵	۱/۹۴	۱/۷۳	۲/۶۸
کود زیستی (B)	۲	۱۵۴۷۱/۲۷**	۳/۸۸*	۸۶۵/۷۸**	۲۹/۲۴**	۱۴/۴۷**	۱۸/۲۷**
ریزمغذی (M)	۲	۱۶۲۳۴/۷۱**	۴/۰۷*	۶۲۳/۴۶**	۹/۴۱**	۶/۲۴**	۱۲/۶۲**
B ×M	۴	۴۸۲۳/۶۱ns	۲/۲۸*	۷۱۵/۳۴**	۱/۸۴ ns	۱/۱۱ ns	۲/۸۲ ns
I ×B	۴	۵۱۳۵/۲۱ns	۲/۳۷*	۱۸۸/۶۲**	۱۴/۳۶**	۷/۷۲**	۱۱/۷۳**
I ×M	۴	۴۹۶۱/۴۴ns	۲/۴۱*	۱۶۵/۰۸**	۱۲/۷۰**	۶/۹۷**	۱۸/۱۲**
I× B ×M	۸	۳۲۷۶/۵۲ns	۲/۳۴*	۹۷/۵۴*	۱/۲۱ ns	۱/۱۹ ns	۲/۱۴ ns
Y ×B	۲	۱۱۲۳۷/۸۴*	۲/۹۷*	۱۸۵/۲۷**	۱/۴۷ ns	۱/۲۳ ns	۲/۷۹ ns
Y ×M	۲	۹۱۲۷/۱۸*	۳/۲۶*	۱۵۲/۱۱*	۱/۵۳ ns	۱/۴۱ ns	۲/۱۱ ns
Y× B ×M	۴	۴۸۵۲/۳۵ns	۲/۲۹*	۸۱/۴۴*	۱/۱۱ ns	۱/۲۴ ns	۲/۳۹ ns
Y× I ×B	۴	۱۱۸۹۷/۲۳*	۲/۴۳*	۷۴/۲۴*	۱/۲۷ ns	۱/۰۵ ns	۱/۹۴ ns
Y× I ×M	۴	۹۷۴۵/۴۹*	۱/۷۳ ns	۵۰/۸۹ ns	۱/۳۴ ns	۱/۱۲ ns	۱/۷۲ ns
Y× I ×B ×M	۸	۶۱۲۵/۲۴*	۲/۳۶*	۹۳/۱۸*	۱/۰۸ ns	۰/۹۸ ns	۱/۳۴ ns
خطای فرعی	۹۲	۳۶۵۴/۲۸	۱/۷۹	۸/۳۶	۲/۲۸	۲/۱۱	۳/۳۹
ضریب تغییرات (درصد)	–	۸/۷۴	۴/۵۶	۷/۹۱	۶/۸۳	۷/۲۳	۷/۷۴

ns، * و **: به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد.

جدول ۳. مقایسه میانگین برهم‌کنش سطوح آبیاری، کود زیستی و ریزمغذی‌ها بر عملکرد، شاخص برداشت و میزان پرولین در گیاه کینوا

سطوح آبیاری	کود زیستی	محلول‌پاشی	میانگین مربعات					
			عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)		شاخص برداشت (درصد)		پرولین (میکرومول بر گرم وزن تر)	
			سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم
آبیاری براساس ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه	عدم تلقیح	عدم محلول‌پاشی	۲۳۷۹/۷۱fg	۲۳۳۵/۲۵g	۳۶/۱۱d	۳۶/۶۲d	۳۵/۱۲y	۴۰/۰۴x
	عدم تلقیح	آهن	۲۴۵۱/۸۲ef	۲۵۶۱/۳۹cd	۳۶/۴۶d	۳۶/۵۱d	۳۴/۵۶z	۳۹/۱۱x
	عدم تلقیح	روی	۲۳۹۸/۱۱fg	۲۴۱۰/۲۰f	۳۶/۱۱d	۳۵/۹۸d	۳۴/۹۵y	۳۹/۹۳x
	نیتروکسین	عدم محلول‌پاشی	۲۴۸۰/۲۶de	۲۴۴۵/۲۴ef	۳۷/۲۴d	۳۸/۲۱cd	۳۴/۷۹y	۳۹/۵۲x
	نیتروکسین	آهن	۲۸۰۵/۸۲a	۲۸۵۹/۷۷a	۴۲/۵۰ab	۴۴/۵۵a	۳۱/۵۴z	۳۲/۴۰z
	نیتروکسین	روی	۲۸۱۰/۱۱a	۲۶۸۵/۵۱b	۴۲/۱۰bc	۴۲/۳۱b	۳۵/۴۳y	۳۹/۰۲x
	بیوفسفر	عدم محلول‌پاشی	۲۵۲۱/۷۴de	۲۳۹۸/۱۱fg	۳۷/۱۱d	۳۹/۴۲c	۳۶/۲۲y	۳۹/۷۱x
	بیوفسفر	آهن	۲۶۶۴/۷۴b	۲۸۰۲/۳۶a	۴۰/۰۸c	۴۴/۰۸a	۳۵/۵۱y	۳۵/۶۶y
	بیوفسفر	روی	۲۶۱۷/۲۱bc	۲۵۴۵/۸۵cd	۳۹/۵۲c	۳۹/۸۴c	۳۵/۸۳y	۳۸/۵۲x
آبیاری براساس ۷۵ درصد ظرفیت زراعی مزرعه	عدم تلقیح	عدم محلول‌پاشی	۱۷۸۴/۷۱l	۱۸۷۹/۵۱jk	۳۲/۰۴fg	۳۲/۶۱fg	۵۵/۱۳qr	۶۵/۱۱i
	عدم تلقیح	آهن	۱۹۱۱/۱۴j	۱۹۰۷/۳۹j	۳۲/۶۶fg	۳۴/۱۹e	۵۳/۰۹rst	۶۱/۲۱lm
	عدم تلقیح	روی	۱۸۴۶/۸۲kl	۱۸۹۵/۲۶jk	۳۲/۲۵fg	۳۴/۳۹e	۵۴/۴۱qr	۶۱/۹۳kl
	نیتروکسین	عدم محلول‌پاشی	۱۹۵۲/۲۶j	۱۸۶۰/۲۴k	۳۳/۰۷ef	۳۲/۲۱fg	۵۴/۰۹qr	۵۴/۳۳qr
	نیتروکسین	آهن	۲۱۴۱/۳۰h	۲۲۱۷/۸۲h	۳۸/۰۵cd	۳۹/۵۵c	۴۶/۵۱v	۴۲/۹۷w
	نیتروکسین	روی	۲۰۵۲/۷۹i	۱۹۲۶/۵۱j	۳۶/۵۲d	۳۵/۵۴de	۵۳/۸۳rs	۵۲/۰۴st
	بیوفسفر	عدم محلول‌پاشی	۱۸۲۱/۷۴kl	۱۸۰۰/۱۱kl	۳۴/۲۰e	۳۴/۳۲e	۵۵/۱۳qr	۵۹/۵۱mn
	بیوفسفر	آهن	۱۹۰۸/۷۱j	۱۸۵۶/۳۷k	۴۲/۹۸a	۳۹/۵۱c	۵۱/۵۱t	۴۷/۵۳u
	بیوفسفر	روی	۱۸۷۳/۲۱jk	۱۸۱۱/۲۸kl	۳۵/۵۹de	۳۹/۳۲c	۵۴/۳۳qr	۵۵/۸۱pq
آبیاری براساس ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه	عدم تلقیح	عدم محلول‌پاشی	۱۳۰۸/۷۱p	۱۲۱۸/۷۹q	۲۸/۴۷hi	۲۷/۱۸i	۸۵/۲۲b	۹۰/۰۴a
	عدم تلقیح	آهن	۱۳۹۶/۱۴no	۱۳۱۴/۳۹op	۲۹/۴۶h	۲۸/۱۹hi	۸۳/۰۹c	۸۶/۱۱b
	عدم تلقیح	روی	۱۳۴۲/۸۲op	۱۲۷۴/۲۶pq	۲۸/۹۱hi	۲۸/۳۹hi	۸۵/۴۱b	۸۵/۹۳b
	نیتروکسین	عدم محلول‌پاشی	۱۴۵۱/۲۶n	۱۲۲۶/۲۴q	۲۸/۴۸hi	۲۹/۴۸h	۷۴/۰۱de	۷۱/۰۲gh
	نیتروکسین	آهن	۱۷۴۱/۳۰l	۱۵۸۳/۸۲m	۳۱/۵۱fg	۳۲/۵۳fg	۵۷/۸۲no	۵۳/۱۰rst
	نیتروکسین	روی	۱۵۴۴/۷۹m	۱۳۷۷/۵۱op	۳۰/۰۹gh	۳۰/۸۹gh	۷۲/۰۲fg	۷۰/۱۷h
	بیوفسفر	عدم محلول‌پاشی	۱۴۲۲/۷۴no	۱۲۸۷/۱۱pq	۲۹/۱۵hi	۳۰/۰۳h	۷۸/۴۸d	۷۸/۵۲d
	بیوفسفر	آهن	۱۵۰۴/۷۴m	۱۳۵۰/۳۶op	۳۳/۲۲ef	۳۵/۱۳de	۵۷/۵۳op	۶۳/۹۱j
	بیوفسفر	روی	۱۴۲۶/۲۱no	۱۳۰۳/۲۸p	۲۹/۰۹hi	۳۲/۹۹fg	۷۵/۵۱d	۷۳/۵۷ef

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

۴. ۲. شاخص برداشت

در سال نخست مطالعه، تحت آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه)، شاخص برداشت تیمار شاهد ۳۶/۱۱ درصد بود، درحالی‌که تیمارهای نیتروکسین+ آهن و نیتروکسین+ روی به‌ترتیب ۴۲/۵۰ و ۴۲/۱۰ درصد، بیش‌ترین شاخص برداشت را نشان دادند. ترکیب‌های بیوفسفر+ آهن و بیوفسفر+ روی نیز شاخص برداشت بالایی داشتند (۴۰/۰۸ و ۳۹/۵۲ درصد). در سطح آبیاری ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه، تیمار بیوفسفر+ آهن بیش‌ترین شاخص برداشت (۴۲/۹۸ درصد) را نشان داد که نسبت به شاهد در همان سطح آبیاری ۴/۳۳ درصد و نسبت به شاهد در آبیاری کامل ۵/۷ درصد افزایش داشت، سایر تیمارها بین ۳۵/۵ تا ۳۸ درصد بودند. در شرایط ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه، شاخص برداشت شاهد به ۲۸/۴۷ درصد کاهش یافت و تیمار بیوفسفر+ آهن بالاترین شاخص (۳۳/۲۲ درصد) را داشت، درحالی‌که شاخص برداشت در سایر تیمارها بین

۲۹ تا ۳۱/۵ درصد بودند (جدول ۳). در سال دوم، تحت آبیاری کامل، بیش‌ترین شاخص برداشت مربوط به تیمار نیتروکسین+ آهن (۴۴/۵۵ درصد) بود و تیمارهای بیوفسفر+ آهن، نیتروکسین+ روی و بیوفسفر+ روی به‌ترتیب ۴۴/۰۳، ۴۲/۲۱ و ۳۹/۸۴ درصد شاخص برداشت داشتند. در سطح آبیاری ۷۵ درصد، شاخص برداشت شاهد به ۳۲/۶۱ درصد کاهش یافت، اما تیمارهای بیوفسفر+ آهن و بیوفسفر+ روی حدود ۳۹/۵ درصد را حفظ کردند که تنها ۱۱ درصد کم‌تر از بالاترین مقدار سال دوم بود. در شرایط ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه، شاخص برداشت شاهد به ۲۷/۱۸ درصد کاهش یافت، درحالی‌که بیوفسفر+ آهن بالاترین شاخص برداشت (۳۵/۱۳ درصد) و نیتروکسین+ آهن شاخص مطلوب ۳۲/۵۳ درصد را داشت، سایر تیمارها بین ۲۹/۵ تا ۳۱ درصد بودند (جدول ۳). بنابراین به‌طورکلی، نتایج نشان داد که ترکیب بیوفسفر با آهن نقش مهمی در حفظ شاخص برداشت تحت محدودیت آبی ایفا می‌کند.

۴. ۳. پرولین

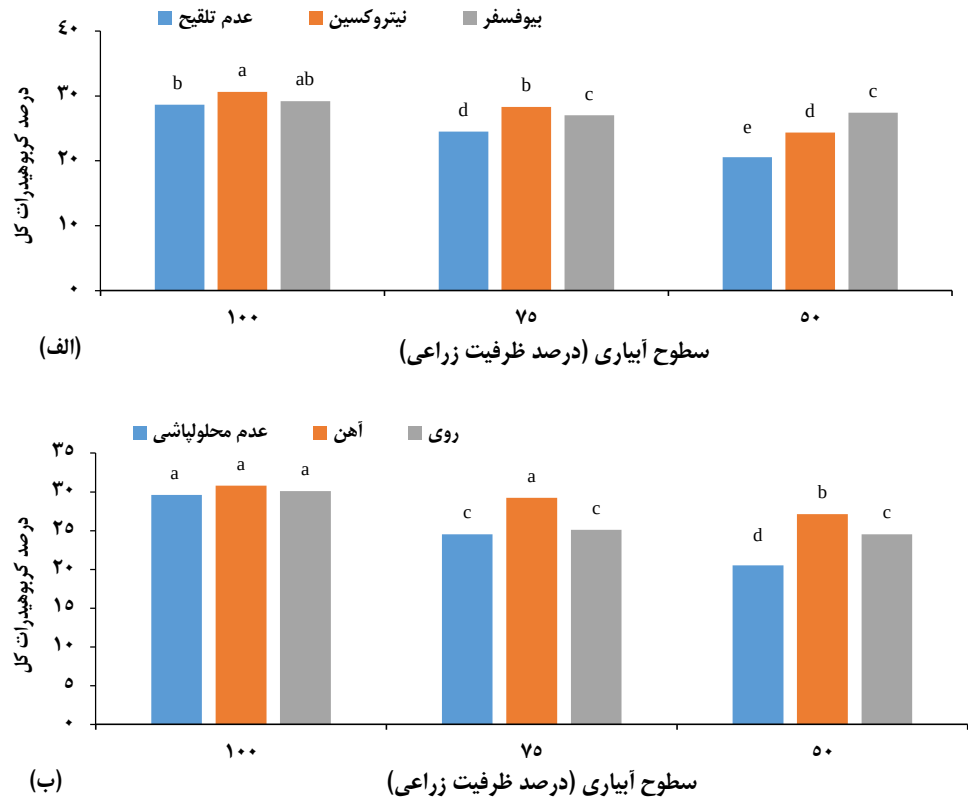
در سال اول، تحت آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه)، میزان پرولین در گیاهان شاهد ۳۵/۱۲ میکرومول بر گرم وزن تر بود و تنها تیمار نیتروکسین+ آهن کاهش معنی‌دار ۳۱/۵۴ درصدی (حدود ۷/۵ درصد) را نشان داد، سایر تیمارها تفاوت آماری با شاهد نداشتند. در شرایط آبیاری ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه، تجمع پرولین در شاهد به ۵۵/۱۳ میکرومول بر گرم افزایش یافت و تیمار نیتروکسین+ آهن بیش‌ترین کاهش (۴۶/۵۱ میکرومول بر گرم، کاهش ۱۵ درصد) را ایجاد کرد؛ تیمار بیوفسفر+ آهن کاهش متوسط ۵۱/۵۱ درصد داشت و سایر تیمارها کم‌تر از ۳ درصد کاهش نشان دادند. در سطح آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه، پرولین شاهد به ۸۵/۲۲ میکرومول بر گرم رسید و تیمارهای نیتروکسین+ آهن و بیوفسفر+ آهن بیش‌ترین کاهش را ایجاد کردند (۵۷/۸۱ و ۵۷/۵۳ میکرومول بر گرم، کاهش حدود ۳۲ درصد)، سایر تیمارها کاهش هفت تا ۱۵ درصد داشتند. این نتایج نشان‌دهنده نقش کلیدی آهن در کاهش تنش اسمزی و تنظیم بیوسنتز پرولین نسبت به روی و بیوفسفر است (جدول ۳). در سال دوم، غلظت پرولین در تمامی تیمارها و سطوح آبیاری افزایش یافت. تحت آبیاری کامل، شاهد ۴۰/۰۴ میکرومول بر گرم داشت و تیمارهای نیتروکسین+ آهن و بیوفسفر+ آهن به‌ترتیب کاهش ۱۹ و ۱۱ درصدی ایجاد کردند؛ سایر تیمارها تغییرات اندکی (<۴ درصد) داشتند. در سطح آبیاری ۷۵ درصد، شاهد ۶۵/۱۱ میکرومول بر گرم بود و تیمار نیتروکسین+ آهن بیش‌ترین کاهش (۴۲/۹۷ میکرومول بر گرم، ۳۴ درصد کاهش) و تیمار بیوفسفر+ آهن کاهش ۲۷ درصد را نشان داد، سایر تیمارها کاهش ۵/۵ تا ۱۹ درصد داشتند. در شرایط کمبود شدید آب (۵۰ درصد ظرفیت مزرعه)، شاهد ۹۰/۰۴ میکرومول بر گرم داشت و تیمارهای نیتروکسین+ آهن و بیوفسفر+ آهن به‌ترتیب ۵۳/۱۰ و ۶۳/۹۱ میکرومول بر گرم، کاهش ۴۱ و ۲۹ درصد را ایجاد کردند، سایر تیمارها کاهش ۱۲/۸ تا ۲۲ درصد داشتند (جدول ۳).

۴. ۴. کربوهیدرات کل

برهم‌کنش سطوح آبیاری و کود زیستی نشان داد که در آبیاری متداول (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی)، مقادیر کربوهیدرات کل برگ بین ۲۸/۵۶ تا ۳۰/۶۲ درصد وزن خشک بود بیش‌ترین مقدار مربوط به تیمار نیتروکسین بود که حدود ۶/۵ درصد بیش‌تر از شاهد ثبت شد، درحالی‌که تیمار بیوفسفر در این سطح آبیاری تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت و تنها حدود ۲ درصد افزایش نشان داد. در شرایط آبیاری ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، تیمار نیتروکسین ۲۸/۳۲ درصد، بیوفسفر ۲۷ درصد و شاهد ۲۴/۵۲ درصد کربوهیدرات کل داشتند. به‌عبارت دیگر، در این سطح آبیاری در این وضعیت، افزایش مقدار کربوهیدرات نسبت به شاهد در تیمار نیتروکسین حدود ۱۵ درصد و در تیمار بیوفسفر حدود ۱۰ درصد

برآورد شد. در کم‌آبی شدید (۵۰ درصد ظرفیت زراعی)، بیش‌ترین مقدار کربوهیدرات کل در تیمار بیوفسفر مشاهده شد که حدود ۲۷ درصد بود و نسبت به شاهد نزدیک به ۳۷ درصد افزایش داشت. تیمار نیتروکسین نیز با حدود ۲۴ درصد کربوهیدرات، نسبت به شاهد حدود ۱۸ درصد افزایش نشان داد. این نتایج بیانگر عملکرد برتر بیوفسفر در شرایط خشکی شدید است. (شکل ۱–الف). اثر برهم‌کنش آبیاری و محلول‌پاشی نیز نشان داد که در آبیاری متداول، میانگین کربوهیدرات کل برگ در تیمارهای آهن و روی حدود ۳۰ درصد بود و تفاوت معنی‌داری با شاهد نداشتند. در شرایط آبیاری معادل ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، تیمار آهن با حدود ۲۹ درصد کربوهیدرات نسبت به شاهد حدود ۱۹ درصد افزایش داشت و عملکرد برتری نسبت به سایر تیمارها نشان داد.

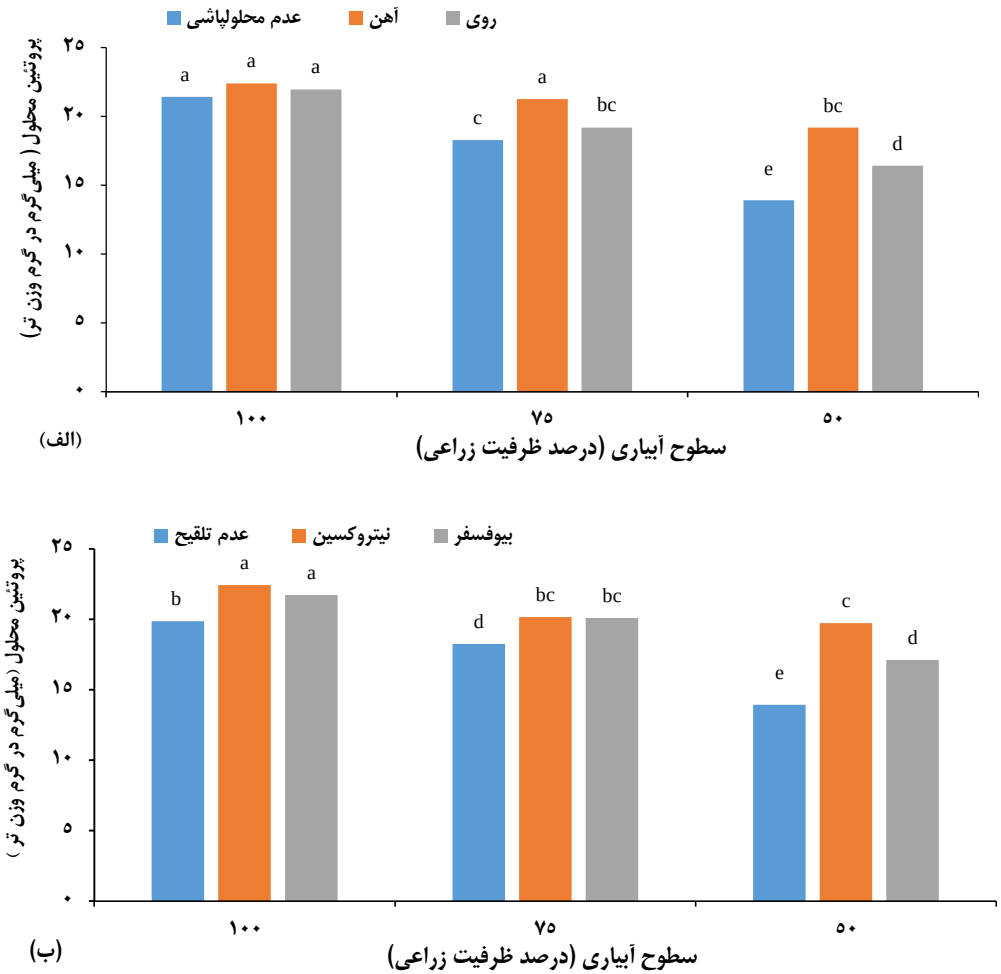
در شرایط کمبود شدید آب (۵۰ درصد ظرفیت زراعی)، محلول‌پاشی آهن بیش‌ترین مقدار کربوهیدرات کل، یعنی حدود ۲۷ درصد را ایجاد کرد که نسبت به شاهد نزدیک به ۳۲ افزایش داشت، درحالی‌که محلول‌پاشی عنصر روی در مقایسه با شاهد این سطح آبیاری حدود ۱۹ درصد افزایش نشان داد (شکل ۱–ب). این نتایج نشان‌دهنده نقش حفاظتی بیش‌تر محلول‌پاشی آهن در شرایط خشکی شدید است. به طورکلی، کاهش رطوبت خاک موجب افت شدید کربوهیدرات کل در تیمار شاهد شد، اما استفاده از کودهای زیستی و محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها توانست کاهش این ترکیبات را مهار کند. با افزایش شدت کم‌آبی، اختلاف بین تیمارها بیش‌تر شد و در تنش شدید، بیوفسفر و آهن عملکرد برتری نسبت به سایر تیمارها داشتند، که بیانگر اثر متفاوت کودهای زیستی و محلول‌پاشی در واکنش گیاه به خشکی و سازوکارهای فیزیولوژیکی متفاوت آن‌ها در حفظ ذخایر کربوهیدراتی برگ‌هاست.



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش سطوح آبیاری در کود زیستی (الف) و اثر برهم‌کنش سطوح آبیاری در محلول‌پاشی (ب) بر درصد کربوهیدرات کل کینوا. (میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند، براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.)

۴. ۵. پروتئین محلول

برهم‌کنش سطوح آبیاری و کود زیستی اثر معنی‌داری بر میزان پروتئین محلول برگ کینوا داشت. در شرایط آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی)، مقدار پروتئین محلول در کینوا بین حدود ۱۹ تا ۲۲ میلی‌گرم در گرم وزن تازه متغیر بود. بیش‌ترین مقدار مربوط به تیمار نیتروکسین و کم‌ترین مقدار در تیمار شاهد مشاهده شد، درحالی‌که تیمار بیوفسفر در حد میانی قرار گرفت. به‌طوری‌که مقدار پروتئین محلول در تیمار نیتروکسین حدود ۱۳ درصد و در تیمار بیوفسفر حدود ۹ درصد بیش‌تر از شاهد بود. در سطح کم‌آبی متوسط (۷۵ درصد ظرفیت زراعی)، مقادیر مربوط به نیتروکسین، بیوفسفر و شاهد به‌ترتیب ۲۰/۱۵، ۲۰/۰۸ و ۱۸/۲۴ میلی‌گرم بودند. تفاوت بین دو تیمار زیستی در این سطح از نظر آماری معنی‌دار نبود، اما هر دو نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری نشان دادند. در کم‌آبی شدید (۵۰ درصد ظرفیت زراعی)، اختلاف بین تیمارها افزایش یافت. تیمار نیتروکسین با میانگین ۱۹/۷۲ میلی‌گرم در گرم وزن تازه بیش‌ترین مقدار را داشت، درحالی‌که بیوفسفر و شاهد به‌ترتیب ۱۷/۱۱ و ۱۳/۹۲ میلی‌گرم بودند. در این شرایط، مقدار پروتئین محلول در تیمار نیتروکسین نسبت به بیوفسفر حدود ۱۵ درصد و نسبت به شاهد حدود ۴۱ درصد بیش‌تر بود (شکل ۲-الف).

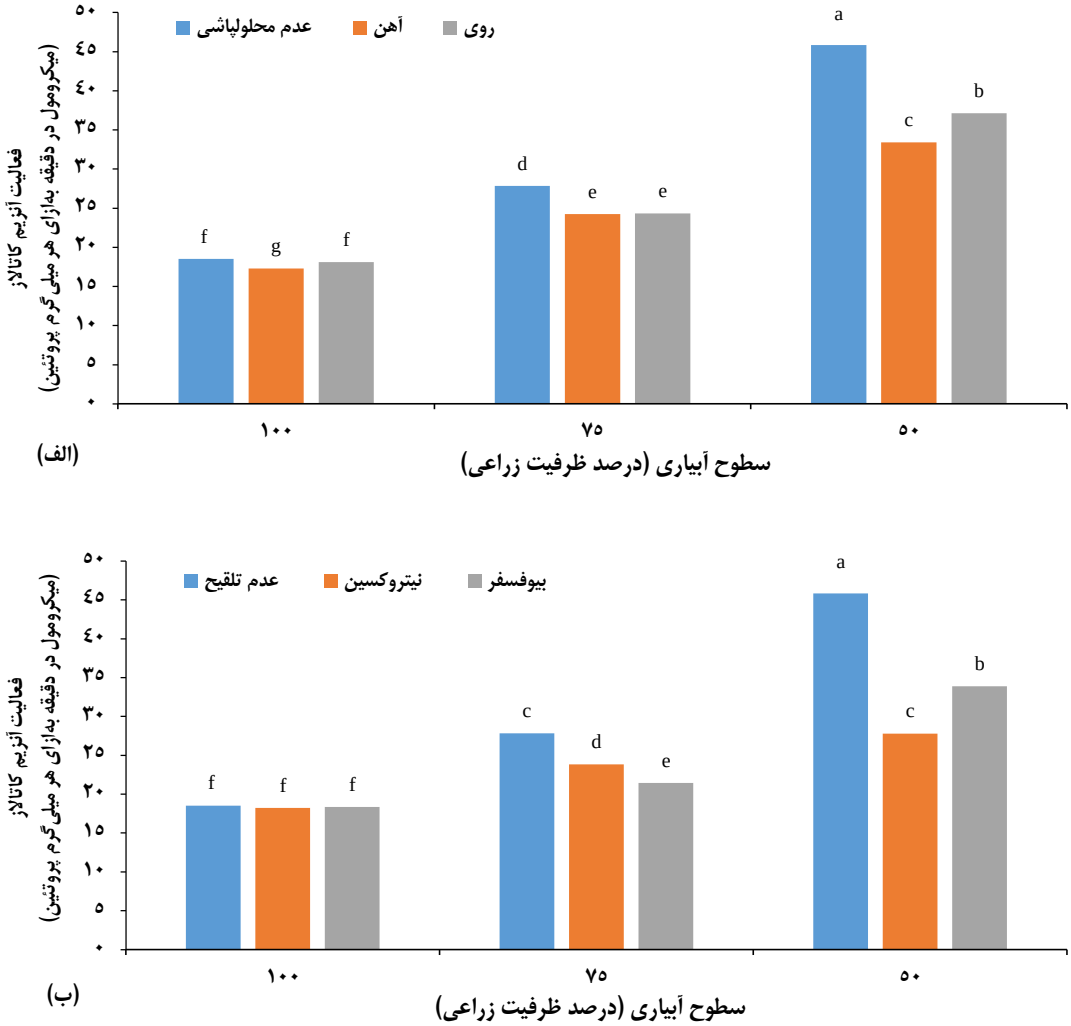


شکل ۲. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش سطوح آبیاری در کود زیستی (الف) و اثر برهم‌کنش سطوح آبیاری در محلول‌پاشی (ب) بر پروتئین محلول کینوا (میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند،براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.)

اثر برهم‌کنش آبیاری و محلول‌پاشی نیز نشان داد که در شرایط آبیاری متداول، مقادیر پروتئین محلول در تیمارهای آهن و روی کمی بیش‌تر از شاهد بودند، اما تفاوت‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبودند. در سطح آبیاری معادل ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، محلول‌پاشی آهن باعث افزایش حدود ۱۶ درصدی پروتئین محلول نسبت به شاهد شد، درحالی‌که تیمار روی حدود ۵ درصد افزایش داشت. در شرایط کم‌آبی شدید (۵۰ درصد ظرفیت زراعی)، محلول‌پاشی آهن موجب افزایش حدود ۳۸ درصدی نسبت به شاهد و حدود ۱۷ درصدی نسبت به عنصر روی گردید، که هر دو اختلاف از نظر آماری معنی‌دار بودند. (شکل ۲-ب). به‌طورکلی، کاهش رطوبت خاک موجب افت پیوسته پروتئین محلول در برگ‌ها شد، اما کاربرد کودهای زیستی و محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها تا حد قابل‌توجهی این کاهش را تعدیل کردند. در میان کودهای زیستی، نیتروکسین و در میان ریزمغذی‌ها، عنصر آهن بیش‌ترین نقش را در حفظ غلظت پروتئین محلول در شرایط کم‌آبی شدید داشتند، درحالی‌که در کم‌آبی متوسط تفاوت تیمارها محدود بود.

۴. ۵. فعالیت آنزیم کاتالاز

در شرایط آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی)، فعالیت آنزیم در تیمار شاهد برابر با ۱۸/۵۳ واحد میکرومول در دقیقه به‌ازای هر میلی‌گرم پروتئین بود و تیمارهای نیتروکسین (۱۸/۲۳ واحد) و بیوفسفر (۱۸/۳۷ واحد) اختلاف معنی‌داری با شاهد نداشتند. این پایداری نشان‌دهنده ثبات سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه در شرایط مطلوب رطوبتی بود. با کاهش رطوبت خاک به سطح ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، فعالیت کاتالاز در تیمار شاهد به ۲۷/۸۲ دهم میکرومول در دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین افزایش یافت که حدود ۵۰ درصد بیش‌تر از تیمار شاهد در شرایط آبیاری کامل بود. در این سطح، کاربرد کودهای زیستی اثر کاهنده نشان داد، به‌طوری‌که ۲۱/۴۳ (حدود ۲۳ درصد کم‌تر از شاهد) و نیتروکسین ۲۳/۸۵ (حدود ۱۴ درصد کم‌تر از شاهد) فعالیت داشتند. این کاهش‌ها بیانگر نقش کودهای زیستی در تعدیل پاسخ آنتی‌اکسیدانی گیاه هستند. در شرایط کم‌آبی شدید (۵۰ درصد ظرفیت زراعی)، فعالیت کاتالاز در تیمار شاهد به ۴۵/۸۳ میکرومول در دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین رسید که بیش‌ترین مقدار در میان سطوح آبیاری بود. در همین شرایط، تیمار نیتروکسین با ۲۷/۸ (کاهش حدود ۳۹ درصدی) و بیوفسفر با ۳۳/۹ (کاهش ۲۶ درصدی) فعالیتی پایین‌تر از شاهد داشتند. این نتایج نشان می‌دهد که تلقیح زیستی با بهبود وضعیت تغذیه‌ای و کاهش تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن، شدت استرس خشکی را تعدیل کرده و نیاز گیاه به فعالیت بیش‌ازحد کاتالاز را کاهش داده است (شکل ۳- الف). برهم‌کنش آبیاری در محلول‌پاشی نشان داد در آبیاری کامل، محلول‌پاشی آهن مقدار فعالیت آنزیم را به‌طور معنی‌داری کاهش داد و از ۱۸/۵۳در شاهد به ۱۷/۳ (کاهش ۶/۵ درصدی) رساند، اما اختلاف محلول‌پاشی روی با تیمار شاهد از لحاظ آماری معنی‌داری نبود و تنها با کاهش حدود ۲ درصد نسبت به شاهد، به ۱۸/۱۱ واحد رسید. در شرایط آبیاری معادل ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، فعالیت آنزیم کاتالاز در شاهد ۲۷/۸۳ بود و هر دو تیمار محلول‌پاشی آهن و روی فعالیت این آنزیم در کینوا را به نسبت مشابهی (حدود ۱۳ درصد) کاهش دادند. در شرایط کم‌آبی شدید فعالیت آنزیم در تیمار شاهد به ۴۵/۸۶ واحد افزایش یافت بود، درحالی‌که محلول‌پاشی آهن موجب کاهش آن به ۳۳/۴۲ (۲۷ درصد کاهش) و محلول‌پاشی روی به ۳۷/۱۵ (۱۹ درصد کاهش) شدند (شکل ۳- ب). نتایج در مجموع نشان داد، کاهش رطوبت خاک موجب افزایش چشم‌گیر فعالیت آنزیم کاتالاز گردید، اما کاربرد کودهای زیستی و محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها، به‌ویژه نیتروکسین و آهن با کاهش شدت تنش اکسیداتیو و بهبود تعادل فیزیولوژیکی سلول‌ها، توانستند پاسخ آنزیمی گیاه را متعادل‌تر کرده و نقش مؤثری در بهبود تحمل به خشکی ایفا کنند.



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش سطوح آبیاری در کود زیستی (الف) و اثر برهم‌کنش سطوح آبیاری در محلول‌پاشی (ب) بر فعالیت آنزیم کاتالاز کینوا (میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند، براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.)

۵. بحث

آهن با مشارکت در ساختار مولکول‌های کلروفیل و انتقال الکترون، به حفظ ظرفیت فتوسنتزی و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو کمک می‌کند (مانان و همکاران، ۲۰۲۲). این سازوکار احتمالاً عامل اصلی عملکرد برتر مشاهده‌شده در این تیمار است. نیتروکسین با تقویت تثبیت زیستی نیتروژن و بهبود جذب عناصر غذایی، در دسترس‌بودن ترکیبات آلی و معدنی را افزایش می‌دهد. ترکیب نیتروکسین با آهن اثر هم‌افزای قابل‌توجهی در حفظ عملکرد گیاه نشان داد. در شرایط تنش شدید، این ترکیب‌ها به‌دلیل اثرات هم‌زمان بر تثبیت نیتروژن، بهبود وضعیت تغذیه‌ای و حفاظت از فرایند فتوسنتز، عملکرد بالاتری نسبت به تیمارهای عدم آهن یا نیتروکسین ایجاد کردند (کامان[1] و همکاران، ۲۰۲۴). در شرایط بدون تنش، تفاوت عملکرد میان تیمارهای نیتروکسین+ آهن و نیتروکسین+ روی کاهش یافت و مقادیر مشابهی گزارش شد.

1. Kammann

این امر احتمالاً به‌دلیل نبود محدودیت‌های محیطی و توانایی گیاه در بهره‌گیری هم‌زمان از نقش‌های فیزیولوژیکی هر دو عنصر روی و آهن است. روی به‌ویژه در فعال‌سازی آنزیم‌ها، تقسیم سلولی و تعادل هورمونی نقش حیاتی دارد و در شرایط آبیاری کافی می‌تواند تأثیری مشابه آهن بر رشد گیاه داشته باشد (ریجی و همکاران، ۲۰۲۳).

تیمارهای بیوفسفر، چه در ترکیب با آهن و چه با روی، در هر دو سال و در تمامی سطوح آبیاری موجب بهبود عملکرد شدند. با این‌حال، اثر آن‌ها در شرایط تنش شدید کم‌تر از تیمارهای حاوی نیتروکسین بود. این موضوع را می‌توان به نقش اصلی بیوفسفر در افزایش جذب فسفر نسبت داد، نقشی که بیش‌تر در مراحل اولیه رشد و توسعه سیستم ریشه‌ای اهمیت دارد، اما در شرایط خشکی شدید به‌دلیل محدودیت فتوسنتز و افزایش استرس اکسیداتیو اهمیت نسبی خود را از دست می‌دهد (الوطیبی[1] و همکاران، ۲۰۲۲). الگوی مشاهده‌شده در سال دوم، که با عملکرد برتر تیمارهای حاوی آهن نسبت به سایر تیمارها مشخص می‌شود، احتمالاً بازتاب‌دهنده شدت بیش‌تر تنش یا تفاوت‌های اقلیمی در فصل رشد دوم است، عواملی که نیاز گیاه به حفظ فعالیت فتوسنتزی و تقویت سامانه‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش داده‌اند (اندو[2] و همکاران، ۲۰۲۳).

این روند نشان می‌دهد که ترکیب منابع تغذیه‌ای مکمل مانند نیتروکسین برای تأمین نیتروژن و آهن برای حفظ فرایندهای کلیدی فتوسنتزی در شرایط تنش خشکی اثربخش‌تر از کاربرد جداگانه کودهای زیستی یا ریزمغذی‌ها است. به‌طورکلی، تفاوت‌های مشاهده‌شده میان تیمارها را می‌توان ناشی از نقش‌های فیزیولوژیکی متمایز عناصر غذایی و کودهای زیستی در سازگاری گیاه با تنش‌های محیطی دانست (زاهدیان[3] و همکاران، ۲۰۲۲). حضور هم‌زمان نیتروژن تثبیت‌شده زیستی و عناصر کلیدی مؤثر در فتوسنتز محیطی مساعدتر برای رشد پایدار و افزایش عملکرد گیاه فراهم می‌کند.

در سال نخست آزمایش، تیمار بیوفسفر+ آهن تحت شرایط آبیاری معادل ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه، شاخص برداشتی را نشان داد که از مقدار ثبت‌شده در آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه) فراتر بود. در سال دوم نیز این تیمار، همراه با بیوفسفر+ روی، توانست شاخص برداشت مشابه با شرایط آبیاری کامل را حفظ کند که نشان‌دهنده پایداری و مقاومت آن‌ها در برابر تنش کم‌آبی است. بیوفسفر با افزایش فعالیت میکروبی خاک، تحریک ترشح اسیدهای آلی و تسهیل جذب فسفر و ریزمغذی‌ها، به‌ویژه آهن، نقش مهمی در بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه ایفا می‌کند. این عملکرد در شرایط خشکی که تحرک مواد غذایی در خاک محدود می‌شود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آهن نیز در سنتز کلروفیل و حفظ کارایی فتوسنتزی نقشی حیاتی دارد و از این طریق موجب بهبود انتقال مواد فتوسنتزی و انرژی به دانه‌های در حال رشد می‌شود (وال رمئو و همکاران، ۲۰۲۳). تحت آبیاری معادل ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه، ترکیب بیوفسفر+ آهن نه‌تنها کاهش شاخص برداشت را جبران کرد، بلکه افزایش آن را نسبت به شرایط آبیاری کامل نیز موجب شد. این موضوع بیانگر تخصیص ترجیحی ماده خشک به اندام‌های زایشی و کارایی بالای این تیمار در تعدیل رشد تولیدمثلی است. حتی در شرایط محدودیت شدید آب (۵۰ درصد ظرفیت مزرعه)، کاهش شاخص برداشت در این تیمار نسبت به سایر تیمارها کم‌تر بود که این امر نشان‌دهنده اثرات حفاظتی آن از طریق حفظ معماری ریشه، تحریک فعالیت میکروبی و کاهش استرس اکسیداتیو است (جرمو[4] و همکاران، ۲۰۲۱).به‌طورکلی، تیمار بیوفسفر+ آهن با بهبود جذب عناصر غذایی، تحریک فرایندهای فیزیولوژیکی و حفظ شاخص برداشت بالاتر در شرایط محدودیت آبی، به‌طور معنی‌داری موجب افزایش تحمل به خشکی در کینوا شد. در نتیجه، این تیمار می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد زراعی امیدبخش برای بهینه‌سازی تولید کینوا در محیط‌های دارای تنش آبی مطرح شود.

1. Alotaibi
2. Ndou
3. Zahedyan
4. Geremew

به‌طورکلی، نتایج نشان داد که تیمارهای حاوی آهن، به‌ویژه ترکیب نیتروکسین+ آهن، بیش‌ترین اثربخشی را در کاهش غلظت پرولین داشتند، به‌ویژه در شرایط آبیاری معادل ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه. این کاهش را می‌توان به کاهش استرس اکسیداتیو، بهبود کارایی مصرف آب و حفظ پایداری غشاهای سلولی نسبت داد. اگرچه تیمارهای حاوی روی و بیوفسفر نیز در کاهش سطح پرولین مؤثر بودند، اثر آن‌ها به‌مراتب کم‌تر از تیمارهای مبتنی بر آهن بود. این یافته‌ها نقش حیاتی آهن، در ترکیب با سایر محرک‌های زیستی، در افزایش تحمل به خشکی در کینوا را برجسته می‌سازد.

تجمع پرولین به‌طور گسترده به‌عنوان پاسخ کلاسیک گیاهان به تنش‌های محیطی، به‌ویژه خشکی، شناخته می‌شود، جایی‌که در تنظیم اسمزی، تثبیت ساختار پروتئین‌ها و کاهش آسیب ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن نقش دارد (اکرم و همکاران، ۲۰۲۳). با این‌حال، افزایش غلظت پرولین عمدتاً نشان‌دهنده درک تنش و تعدیل متابولیکی است و لزوماً بیانگر بهبود تحمل نیست. در مقابل، کاهش قابل‌توجه پرولین در تیمارهای حاوی آهن، وضعیت فیزیولوژیکی بهبود یافته گیاه را منعکس می‌کند و نیاز گیاه به استفاده از مکانیزم‌های جبرانی مانند تجمع پرولین را کاهش می‌دهد. نقش آهن در کاهش سطح پرولین ممکن است با تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه، حفظ یکپارچگی ساختاری آنزیم‌های کلیدی مانند کاتالاز و پراکسیداز و حمایت از پایداری دستگاه فتوسنتزی در شرایط تنش مرتبط باشد (حسینی[1] و همکاران، ۲۰۲۴). وقتی آهن همراه با نیتروکسین به‌کار گرفته می‌شود، تعامل هم‌افزای آن با اثرات زیست‌فعال این تلقیح شامل تقویت تثبیت نیتروژن، ترشح هورمونی و بهبود توسعه ریشه، تحمل پایه گیاه به تنش را تقویت می‌کند. در نتیجه، گیاه کم‌تر به تجمع پرولین به‌عنوان مکانیزم جبرانی متکی می‌شود (کشاورز و همکاران، ۲۰۲۴). کاهش مشاهده‌شده در غلظت پرولین در سال دوم نسبت به سال نخست، با وجود کاهش آبیاری، ممکن است ناشی از سازگاری فیزیولوژیکی بهبود یافته گیاهان تیمارشده یا اثرات تجمعی کاربرد مستمر کودهای زیستی و ریزمغذی‌ها باشد. علاوه بر این، تأثیر محدود تیمارهای فاقد آهن بر کاهش پرولین نشان می‌دهد که بهبود رشد ریشه یا جذب عناصر غذایی به‌تنهایی برای کاهش وابستگی گیاه به تجمع اسمولیت‌ها کافی نیست، مگر آن‌که مسیرهای متابولیکی مرتبط با کاهش استرس اکسیداتیو نیز تحت تأثیر قرار گیرند (مانان و همکاران، ۲۰۲۲).

بنابراین، کاهش قابل‌توجه پرولین در تیمارهای حاوی آهن، به‌ویژه آن‌هایی که با نیتروکسین ترکیب شده‌اند، به‌عنوان نشانه ضعف فیزیولوژیکی تعبیر نمی‌شود، بلکه نشان‌دهنده اثربخشی این تیمارها در کاهش تنش خشکی و حفظ هموستازی متابولیکی است. در مقابل، سطوح بالای پرولین در سایر تیمارها ممکن است بیانگر بار فیزیولوژیکی بیش‌تر بر گیاه برای مقابله با آسیب ناشی از کم‌آبی باشد.

کاهش شدید رطوبت خاک سبب محدودشدن جذب آب و مواد مغذی، کاهش فتوسنتز و کاهش ذخایر انرژی گیاه می‌شود که به افت معنی‌دار کربوهیدرات کل منجر می‌گردد. در چنین شرایطی، تیمار بیوفسفر توانست عملکرد بهتری نسبت به نیتروکسین و شاهد نشان دهد. این امر می‌تواند با نقش بیوفسفر در بهبود متابولیسم انرژی، افزایش فعالیت آنزیم‌های شرکت‌کننده در مسیرهای تولید و ذخیره قندها و بهبود بازده فتوسنتزی مرتبط باشد (الشیب[2] و همکاران، ۲۰۲۳). احتمالاً بیوفسفر با افزایش در دسترس‌بودن فسفر و تقویت مسیرهای فسفریاسیون، توانسته است سنتز و انتقال کربوهیدرات‌ها را حتی در شرایط کم‌آبی شدید حفظ کند، به گونه‌ای‌که تیمار بیوفسفر افزایش حدود ۳۳ درصدی کربوهیدرات کل نسبت به شاهد و ۱۲/۸۲ درصد نسبت به نیتروکسین نشان داد. تیمار نیتروکسین نیز تحت شرایط کم‌آبی متوسط (۷۵ درصد ظرفیت زراعی) عملکرد برتری داشت و کربوهیدرات کل برگ‌ها را نسبت به شاهد حدود ۱۵/۵ درصد افزایش داد که احتمالاً ناشی از فعالیت میکروارگانیسم‌های تثبیت‌کننده نیتروژن و تولید هورمون‌های محرک رشد

1. Hosseini
2. Elshayb

است که توان گیاه برای حفظ فعالیت متابولیک و سنتز کربوهیدرات را تقویت می‌کند (ریجی و همکاران، ۲۰۲۳). با افزایش شدت خشکی، اثر نیتروکسین کاهش یافت و بیوفسفر جایگزین آن در حفظ ذخایر کربوهیدراتی شد که نشان‌دهنده تفاوت مکانیسم عملکرد این کودهای زیستی در مواجهه با تنش است.

از طرفی محلول‌پاشی آهن در شرایط کم‌آبی شدید توانست مقدار کربوهیدرات کل را نسبت به شاهد حدود ۳۱ درصد افزایش دهد و در مقایسه با روی، افزایش ۱۰ درصدی نشان دهد. این امر با نقش آهن در فعال‌سازی آنزیم‌های مسیرهای فتوسنتزی و نیتروژنی، حفظ ظرفیت انتقال الکترون و تولید انرژی لازم برای سنتز قندها و ذخیره آن در برگ‌ها قابل توجیه است (کشاورز و همکاران، ۲۰۲۴). در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که اختلاف عملکرد تیمارها با افزایش شدت کم‌آبی به‌طور چشم‌گیر افزایش می‌یابد و نوع کود زیستی و عنصر محلول‌پاشی تعیین‌کننده توان گیاه در حفظ ذخایر کربوهیدراتی است. در شرایط محدودیت آبی، گیاه با کاهش جذب مواد مغذی و اختلال در متابولیسم نیتروژنی مواجه می‌شود که منجر به کاهش سنتز پروتئین‌های محلول برگ و افزایش تجزیه پروتئین‌های عملکردی می‌گردد. تلقیح با نیتروکسین با افزایش دسترسی به نیتروژن معدنی، تثبیت زیستی نیتروژن و تولید هورمون‌های محرک رشد مانند اکسین و سیتوکینین، ظرفیت گیاه برای حفظ و سنتز پروتئین‌های محلول را در شرایط تنش ارتقا می‌دهد (غدیرنژاد شیده و همکاران، ۲۰۲۳). این مکانیسم احتمالاً موجب شده که حتی در شرایط کم‌آبی شدید، میزان پروتئین محلول در برگ‌های تیمار نیتروکسین نسبت به شاهد افزایش قابل‌ملاحظه‌ای داشته باشد. محلول‌پاشی آهن نیز به حفظ مقدار پروتئین محلول در برگ کمک کرده است که این امر احتمالاً با نقش آهن در فعال‌سازی آنزیم‌های مسیرهای نیتروژنی مانند نیترات ردوکتاز و گلوتامات سنتتاز مرتبط است (فاتانت‌وش و همکاران، ۲۰۲۴). این آنزیم‌ها امکان تبدیل نیترات به آمونیاک و سپس سنتز اسیدهای آمینه و پروتئین را در شرایط محدود فراهم می‌کنند. علاوه بر این، آهن با حفظ ظرفیت فتوسنتزی و فعال نگه‌داشتن انتقال الکترون، انرژی و کربن لازم برای سنتز ترکیبات نیتروژنی را تأمین می‌نماید (کریمی و همکاران، ۲۰۲۴). بنابراین، افزایش پروتئین محلول در تیمارهای آهن در شرایط رطوبتی محدود، بازتابی از توانایی گیاه در حفظ عملکرد متابولیکی و جلوگیری از افت شدید ترکیبات نیتروژنی است.

اثر برجسته نیتروکسین و آهن در شرایط کم‌آبی هم‌چنین نشان‌دهنده تعامل مثبت بین تقویت ریزوسفر و تأمین ریزمغذی‌های ضروری برای آنزیم‌های متابولیک است. در سطوح بالاتر رطوبت، ظرفیت طبیعی گیاه برای سنتز پروتئین کافی است و تفاوت بین تیمارها اندک است، اما با کاهش آب، محدودیت‌های جذب و متابولیکی اثر تیمارهای تغذیه‌ای را آشکار می‌سازد. این یافته‌ها همسو با مطالعات پیشین در گونه‌های مشابه نشان می‌دهد که مدیریت تلفیقی تغذیه زیستی و معدنی می‌تواند نقش مهمی در حفظ تعادل نیتروژنی و کاهش تخریب پروتئین‌ها در شرایط تنش خشکی ایفا کند. به‌عبارت دیگر، این رویکرد باعث می‌شود گیاه ضمن حفظ ظرفیت سنتز و بازسازی پروتئین، اثرات منفی کم‌آبی را بر تعادل متابولیک برگ به حداقل برساند و عملکرد فیزیولوژیکی خود را در مواجهه با تنش حفظ نماید.

کاهش سطح آبیاری در گیاه کینوا موجب افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز شده است که بیانگر یکی از اصلی‌ترین پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه به تنش خشکی است. کمبود آب باعث اختلال در تعادل اکسید و احیا و افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (سوپراکسید، هیدروکسیل و پراکسید هیدروژن) می‌شود که در صورت تجمع بیش از حد، به غشاهای سلولی، پروتئین‌ها و DNA آسیب می‌رسانند. فعال‌شدن کاتالاز به گیاه کمک می‌کند تا پراکسید هیدروژن را سم‌زدایی کند و آسیب‌های ناشی از تنش اکسیداتیو را کنترل نماید (اندو و همکاران، ۲۰۲۳)، به‌ویژه در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی که فعالیت آن به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. با وجود افزایش فعالیت کاتالاز تحت شرایط کم‌آبی، کاهش این فعالیت در تیمارهای زیستی نشان می‌دهد که کودهای زیستی نیتروکسین و بیوفسفر می‌توانند شدت استرس اکسیداتیو را کاهش دهند. این اثر از طریق چند مسیر فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی اتفاق می‌افتد؛ باکتری‌های موجود در این کودها، از جمله ازتوباکترها و حل‌کننده‌های فسفات،

با تولید فیتوهورمون‌ها (به‌ویژه ایندول‌استیک‌اسید)، افزایش دسترسی عناصر غذایی و بهبود جذب آب، وضعیت متابولیکی گیاه را متعادل می‌کنند و تولید گونه‌های فعال اکسیژن را کاهش می‌دهند (میرطیبی، ۲۰۲۴). تفاوت کم‌تر فعالیت کاتالاز بین تیمارهای زیستی و شاهد در آبیاری کامل نشان می‌دهد که نقش محافظتی کودهای زیستی در شرایط بدون تنش کم است و اثر آن‌ها بیش‌تر در شرایط تنش مشاهده می‌شود. نیتروکسین به‌دلیل ترکیب میکروبی خاص خود (ازتوباکتر و آزوسپیریلوم) اثر قوی‌تری نسبت به بیوفسفر در حفظ تعادل اکسیداتیو دارد. محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها نیز نقش مهمی در تنظیم پاسخ آنتی‌اکسیدانی گیاه دارد (فاروک و همکاران، ۲۰۲۴). آهن، به‌عنوان جزو گروه هم در آنزیم‌های پراکسیداز و کاتالاز، با تأمین کافی خود فعالیت سایر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (مانند آسکوربات پراکسیداز و گلوتاتیون ردوکتاز) را افزایش می‌دهد و فعالیت کاتالاز را کاهش می‌دهد (مانان و همکاران، ۲۰۲۲). عنصر روی نیز احتمالاً با تثبیت غشاهای سلولی، کاهش نشت یونی، بهبود تعادل اسمزی و فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کشاورز و همکاران، ۲۰۲۴)، اثر مشابه، اما خفیف‌تری نسبت به آهن داشته است و در شرایط خشکی شدید فعالیت کاتالاز را به میزان کم‌تری کاهش داده است. در مجموع، نیتروکسین در میان کودهای زیستی و آهن در میان ریزمغذی‌ها بیش‌ترین نقش را در بهبود تعادل اکسیداتیو و افزایش تحمل خشکی کینوا داشتند و می‌توانند مبنای توصیه‌های مدیریتی در تولید این گیاه در مناطق کم‌آب باشند.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج دو ساله این پژوهش نشان داد که کاهش سطح آبیاری موجب افت معنی‌دار عملکرد دانه و تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی کینوا می‌شود، اما کاربرد هم‌زمان کودهای زیستی و محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها تا حد زیادی توانست اثرات نامطلوب کم‌آبی را تعدیل کند. در میان تیمارهای موردبررسی، ترکیب نیتروکسین با آهن در هر دو سال بالاترین عملکرد دانه را در سطوح آبیاری به‌ویژه در شرایط کم‌آبی شدید (۵۰ درصد ظرفیت زراعی) نشان داد و میانگین عملکرد را نسبت به شاهد حدود ۳۰ تا ۳۳ درصد افزایش داد. هم‌چنین تیمار بیوفسفر+ آهن بیش‌ترین نقش را در حفظ شاخص برداشت داشت و در سطح آبیاری پایین‌تر نیز توانست کاهش عملکرد را تا حد قابل‌توجهی جبران کند. این نتایج بیانگر اثر هم‌افزایی بین باکتری‌های محرک رشد و عنصر آهن در بهبود وضعیت تغذیه‌ای و حفظ کارایی فتوسنتزی گیاه است. تغییرات غلظت پرولین، کربوهیدرات کل، پروتئین محلول و فعالیت آنزیم کاتالاز نیز به‌روشنی نشان دادند که پاسخ گیاه به کم‌آبی تحت تأثیر مستقیم تیمارهای تغذیه‌ای قرار دارد. کاهش معنی‌دار تجمع پرولین در تیمارهای نیتروکسین+ آهن و بیوفسفر+ آهن نسبت به شاهد (به‌ترتیب حدود ۴۱ و ۲۹ درصد در کم‌آبی شدید) نشان‌دهنده تعدیل تنش اسمزی و کاهش نیاز گیاه به سنتز ترکیبات سازگارکننده است. از سوی دیگر، افزایش ۳۷ درصدی کربوهیدرات کل در تیمار بیوفسفر و افزایش ۴۱ درصدی پروتئین محلول در تیمار نیتروکسین نسبت به شاهد در کم‌آبی شدید، نشان داد که این کودها با بهبود کارایی مصرف آب و پایداری متابولیسم سلولی، نقش حفاظتی مؤثری ایفا می‌کنند. فعالیت آنزیم کاتالاز که در گیاه شاهد با شدت کم‌آبی افزایش شدیدی داشت، در تیمارهای زیستی و محلول‌پاشی آهن ۲۶ تا ۳۹ درصد کم‌تر بود که بیانگر کاهش تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن و تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه است. به‌طورکلی، یافته‌ها نشان می‌دهد که مدیریت تغذیه زیستی–معدنی، به‌ویژه ترکیب نیتروکسین با آهن، با افزایش جذب عناصر غذایی، حفظ تعادل آبی و بهبود شاخص‌های فیزیولوژیکی، می‌تواند پایداری عملکرد کینوا را در شرایط کم‌آبی به‌طور معنی‌داری افزایش دهد. ازاین‌رو، استفاده از این ترکیب به‌عنوان راه‌کاری کارآمد و زیست‌سازگار برای مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور توصیه می‌شود. هم‌چنین، بررسی‌های آینده می‌تواند بر بهینه‌سازی غلظت‌های مصرف آهن و بررسی ترکیب هم‌زمان چند ریزمغذی با تلقیح زیستی در شرایط میدانی متمرکز شود تا الگوی دقیق‌تری از تعاملات فیزیولوژیکی و عملکردی گیاه در کم‌آبی به‌دست آید.

۷. تشکر و قدردانی

از جناب آقای مهندس نهاوندی معاون حفاظت محیط زیست فارس به‌دلیل حمایت‌های اجرایی و تسهیل هماهنگی‌های لازم برای انجام این پژوهش و از سرکار خانم مهندس قادرنژاد به‌خاطر همکاری صمیمانه در انجام آزمایش‌ها، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

باقری، حمیدرضا؛ مقدم، علیرضا؛ دانائی، الهام و عبدوسی، وحید (۱۴۰۱). اثر محلول‌پاشی نانوکلات‌های آهن، پتاسیم، کلسیم و منگنز بر برخی خصوصیات مورفوفیزولوژیکی و عناصر غذایی گیاه نعناع فلفلی (*Mentha piperita*). *فیزیولوژی محیطی گیاهی*، ۲۹(۵)، ۱-۱۳.

References

Akram, M. Z., Libutti, A., & Rivelli, A. R. (2023). Evaluation of vegetative development of quinoa under water stress by applying different organic amendments. *Agronomy*, *13*(5), 1412

Alotaibi, M. M., Aljuaid, A., Alharbi, M. M., Qumsani, A. T., Alzuaibr, F. M., Alsubeie, M. S., & Awad-Allah, M. M. (2024). The effects of bio-fertilizer by arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate solubilizing bacteria on the growth and productivity of barley under deficit of water irrigation conditions. *Agronomy*, *14*(9), 1973.

Bagheri, H., Moghadam, A., Danaei, E., & Abdousi, V (2022). The effect of foliar application of nanochelates of iron, potassium, calcium and manganese on some morphophysiological characteristics and nutrients of peppermint (*Mentha piperita*). Plant En.vironmental Physiology *29*(5), 1-13. (In Persian).

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

Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, *72* (1-2), 248-254

Chaudhary, N., Walia, S., & Kumar, R. (2023). Functional composition, physiological effect and agronomy of future food quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): A review. *Journal of Food Composition and Analysis*, *118*, 105192.

Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, *28* (3), 350–356

Elshayb, O. M., Nada, A. M., Sadek, A. H., Ismail, S. H., Shami, A., Alharbi, B. M., & Seleiman, M. F. (2022). The integrative effects of biochar and ZnO nanoparticles for enhancing rice productivity and water use efficiency under irrigation deficit conditions. *Plants*, *11*(11), 1416.

Farouk, A. S., Abdelghany, A. M., Shehab, A. A., Alwakel, S. E., Makled, K. M., Naif, E., ..., & Lamlom, S. F. (2024). Optimizing wheat productivity through integrated management of irrigation, nutrition, and organic amendments. *BMC Plant Biology*, *24*(1), 548.

Fatanatvash, S., Bernousi, I., Rezaie, M., Sonmez, O., Razzaghi, S., & Abdi, H. (2024). Selection of superior bread wheat genotypes based on grain yield, protein, iron and zinc contents under normal irrigation and terminal drought stress conditions. *Ecological Genetics and Genomics*, *31*, 100230.

Geremew, A., Carson, L., Woldesenbet, S., Carpenter, C., Peace, E., & Weerasooriya, A. (2021). Interactive effects of organic fertilizers and drought stress on growth and nutrient content of *Brassica juncea* at vegetative stage. *Sustainability*, *13*(24), 13948.

Ghadirnezhad Shiade, S. R., Fathi, A., Taghavi Ghasemkheili, F., Amiri, E., & Pessarakli, M. (2023). Plants' responses under drought stress conditions: Effects of strategic management approaches—a review. *Journal of Plant Nutrition*, *46*(9), 2198-2230.

Hadj Mansour, Y., Othmani, B., Ben Rebah, F., Mnif, W., Khadhraoui, M., & Saoudi, M. (2024). Plant-based flocculants as sustainable conditioners for enhanced sewage sludge dewatering. *Water*, *16*(20), 2949

Hosseini, S. H., Qumsani, A. T., & Bostani, A. (2024). Quantitative and qualitative responses of quinoa to soil application of growth-promoting microorganisms under water stress. *Journal of Crop Health*, *76*(3), 713-724.

Imran. (2024). Integration of organic, inorganic and bio fertilizer, improve maize-wheat system productivity and soil nutrients. *Journal of Plant Nutrition*, 47(15), 2494-2510.

Kammann, C., Ratering, S., Eckhard, C., & Müller, C. (2024). Mitigation of drought stress for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) varieties using woodchip biochar-amended soil. *Plants*, *13*(16), 2279

Karimi, N., Mojaddam, M., Lak, S., Payandeh, K., & Shokuhfar, A. (2024). Effect of spraying iron, zinc and using superabsorbent on grain yield and some biochemical properties of maize under drought stress. *Journal of Plant Nutrition*, *47*(5), 681-689.

Keshavarz, H., Seify, S. M., & Sabourifard, H. (2024). Manganese and zinc effect on yield, fatty acid ratio, and maternal seeds germination of canola cultivars upon late-season drought stress. *Journal of Plant Nutrition*, *47*(14), 2216-2231.

Ma, C., Cui, H., Ren, C., Yang, J., Liu, Z., Tang, T., & Li, R. (2022). The seed primer and biofertilizer performances of living *Chlorella pyrenoidosa* on *Chenopodium quinoa* under saline-alkali condition. *Journal of Applied Phycology*, *34*(3), 1621-1634.

Mannan, M. A., Tithi, M. A., Islam, M. R., Al Mamun, M. A., Mia, S., Rahman, M. Z., & Hossain, M. S. (2022). Soil and foliar applications of zinc sulfate and iron sulfate alleviate the destructive impacts of drought stress in wheat. *Cereal Research Communications*, *50*(4), 1279-1289.

Mirtayebi, M. (2024). Effects of application of biofertilizer and potassium nanofertilizer on yield and some physiological traits of quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) under drought stress. *Applied Field Crops Research*, *36*(1), 65-42.

Mahmoud, R. S., & El-Din, K. M. G. (2014). Response of red kidney bean to foliar application of seaweed and amino acid under sandy soil conditions. *Journal of Horticultural Science & Ornamental Plants*, *6*(3), 100-106

Ndou, N., Rakgotho, T., Nkuna, M., Doumbia, I. Z., Mulaudzi, T., & Ajayi, R. F. (2023). Green synthesis of iron oxide (hematite) nanoparticles and their influence on Sorghum bicolor growth under drought stress. *Plants*, *12*(7), 1425.

Saddiq, M. S., Wang, X., Iqbal, S., Hafeez, M. B., Khan, S., Raza, A., & Gulshan, A. B. (2021). Effect of water stress on grain yield and physiological characters of quinoa genotypes. *Agronomy*, *11*(10), 1934.

Sayyed, M. M., & Mirsafi, H. (2024). Physiological traits, crop growth, and grain quality of quinoa in response to deficit irrigation and planting methods. *BMC Plant Biology*, *24*, 809.

Toubali, A., Ait-El-Mokhtar, M., Boutasknit, A., Anli, M., Ait-Rahou, Y., Benaffari, M., & Meddich, A. (2022). Root reinforcement improved performance, productivity, and grain bioactive quality of field-droughted quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Frontiers in Plant Science*, *13*, 860484.

Valle-Romero, P., García-López, J. V., Redondo-Gómez, S., Flores-Duarte, N. J., Rodríguez-Llorente, I. D., Idaszkin, Y. L., & Mateos-Naranjo, E. (2023). Biofertilization with PGP bacteria improve strawberry plant performance under sub-optimum phosphorus fertilization. *Agronomy*, *13*(2), 335.

Youssef, S. M., Shaaban, A., Abdelkhalik, A., Abd El Tawwab, A. R., Abd Al Halim, L. R., Alwutayd, K. M., & Hemida, K. A. (2023). Compost and phosphorus/potassium-solubilizing fungus effectively boosted quinoa's physio-biochemical traits, nutrient acquisition, soil microbial community, and yield and quality in normal and calcareous soils. *Plants*, *12*(17), 3071.

Zahedyan, A., Jahromi, A. A., Zakerin, A., Abdossi, V., & Torkashvand, A. M. (2022). Nitroxin bio-fertilizer improves growth parameters, physiological and biochemical attributes of cantaloupe (*Cucumis melo* L.) under water stress conditions. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *21*(1), 8-20.

Zahmatkesh, Y., Souhani, A., & Pessarakli, M. (2024). Physiological, biochemical, and functional changes in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) under potassium and zinc applications in drought stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, *47*(19), 3622-3645.