Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Effects of application of Azospirillum bacteria and sulfur spraying on yield and photosynthetic pigments of wheat cultivars

Zohreh Karimi[1]✉ | Mohammad Javad Zarea[2] | Arash Fazeli [3] | Batool Zarei[4]

1. Corresponding Author, Department of Agronomy and Crop Breeding, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran. E-mail: karimi_z98@yahoo.com
2. Department of Agronomy and Crop Breeding, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran. E-mail: mj.zarea@ilam.ac.ir
3. Department of Agronomy and Crop Breeding, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran. E-mail: a.fazeli@ilam.ac.ir
4. Department of Agronomy and Crop Breeding, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran. E-mail: batoolzarei90@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 11, 2024

Revised: Aug. 9, 2024

Accepted: Aug. 18, 2024

Published online: Nov. 2024

Keywords:
Photosynthesis rate,
Transpiration rate,
Sustainable agriculture,
Carotenoid,
Chlorophyll

ABSTRACT

Wheat is one of the primary cereals in most countries, and in recent decades, its cultivation has been significantly impacted by environmental conditions due to climate change. Therefore, an experiment was conducted during the 2020-2021 agricultural year to examine the response of photosynthetic pigments and the yield of different wheat cultivars to the combined application of bacteria and sulfur under rainfed conditions. This factorial experiment was conducted in a randomized complete block design with three replications. The experimental factors included four wheat cultivars: Eivan, Sardari, Homa, and Azar 2, sulfur treatment at two levels: foliar spray with distilled water as a control and foliar spray with sulfur and bacterial treatment at two levels: without inoculation (control) and inoculation with Azospirillum bacteria. The results showed that the highest grain yield (3030 kg/ha) was observed in the Eivan cultivar with the application of Azospirillum bacteria. Inoculation with Azospirillum bacteria increased the grain yield of the Eivan and Sardari cultivars by 17.9% and 42%, respectively, while no statistically significant effect was observed on the grain yield of the Homa and Azar 2 cultivars. The results indicated that sulfur spraying and bacterial application improved photosynthesis. Under rainfed conditions, the Eivan cultivar had significantly higher grain yield compared to the Sardari, Homa, and Azar 2 cultivars and produced a higher yield with bacterial application. Azospirillum bacteria increased leaf photosynthesis. Plant nutrition management and the use of growth-promoting bacteria, with their physiological effects, can be considered strategies for improving yield under rainfed conditions.

Cite this article: Karimi, Z., Zarea, M. J., Fazeli, A., Zarei, B., (2024) Effects of application of Azospirillum bacteria and sulfur spraying on yield and photosynthetic pigments of wheat cultivars, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (9),1505-1520. https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.379146.669753

© The Author(s).
Publisher: The University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.379146.669753

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Wheat is a crucial agricultural crop, and increasing its production by leveraging its genetic potential and environmental responsiveness plays a significant role in reducing hunger and boosting global food production. Utilizing the potential of beneficial soil organisms can be an economically viable strategy to mitigate the effects of drought stress in crops, aligning with the principles of sustainable agriculture. Rhizosphere bacteria that stimulate plant growth are among the biological resources that enhance plant growth through both direct and indirect methods. Azospirillum bacteria are an example of such growth-promoting bacteria. These bacteria can produce and secrete active biological substances in the root environment, creating conditions that foster root system development, enhance nutrient uptake, and facilitate the biological stabilization of nitrogen and phosphorus, ultimately increasing yield. Among the nutrients, sulfur is particularly used to reduce the pH of alkaline soils. As a widely used fertilizer, sulfur not only contributes to about 15% of the dry weight of wheat plant biomass but also lowers soil pH and improves the absorption of micronutrients. Additionally, it enhances water retention in the soil. Given the abundance of sulfur and its beneficial effects on plants, as well as the physical and chemical characteristics of soils in arid and semi-arid regions, and considering the positive impacts of using growth-promoting bacteria under stress conditions to stimulate plant growth and development, this research aims to investigate the role of sulfur and Azospirillum bacteria in different wheat cultivars by improving photosynthesis and yield.

Materials and Methods

The experiment aimed to investigate the response of photosynthetic pigments and the yield of wheat cultivars to the combined application of bacteria and sulfur under rainfed conditions during the 2020-2021 crop year. It was conducted using a factorial design within a randomized complete block design, with three replications. The experimental factors included four wheat cultivars: Eivan, Sardari, Homa, and Azar 2. The sulfur treatment had two levels: foliar spraying with distilled water as a control and foliar spraying with sulfur. The bacterial treatment also had two levels: non-inoculation (control) and inoculation with Azospirillum bacteria.

Results and Discussion

The results showed that the highest seed yield (3030 kg/ha) was observed in the Eivan variety with the use of Azospirillum bacteria. Inoculation with Azospirillum bacteria increased the grain yield of the Eivan and Sardari cultivars by 17.9% and 42%, respectively, while the increase in grain yield for the Homa and Azar 2 cultivars was not statistically significant. Based on the comparison of average treatments, the highest amount of chlorophyll a following bacterial inoculation was observed in the Eivan cultivar (4.298 mg g^{-1} FW), while the lowest amount was observed in the Azar 2 cultivar (2.531 mg g^{-1} FW). Among the cultivars studied under rainfed conditions, the Eivan cultivar showed a significant advantage in grain yield compared to the Sardari, Homa, and Azar 2 cultivars, producing a higher yield with the use of bacteria. Additionally, Azospirillum bacteria increased the rate of leaf photosynthesis.

Conclusion

Sulfur increases photosynthetic pigments (chlorophyll a, chlorophyll b, and total chlorophyll) and enhances photosynthesis. Based on the results, it can be concluded that new wheat cultivars, such as the Eivan variety, showed significant superiority compared to older cultivars like Sardari. The Eivan variety had a high grain yield and produced even more yield with the use of bacteria. Bacterial inoculation increased the concentration of chlorophyll a in the leaves of the wheat cultivars. Plant nutrition management and the use of growth-promoting bacteria, through their effects at the physiological level, can be recommended as strategies to improve performance under rainfed conditions.

Author Contributions

Methodology, software, formal analysis, writing—original draft preparation, Z.K; conceptualization, visualization, investigation, validation, resources, data curation, supervision, M.J.Z.; writing—review and editing, A.F.; writing—review and editing, B.Z

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript. All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

"Not applicable"

Acknowledgements

Hereby, we extend our thanks and appreciation to Ilam University for providing the necessary facilities for conducting this research.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۵، شماره ۹ شاپا: ۲۴۲۳-۷۸۳۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

اثرات کاربرد باکتری آزوسپیریلوم و محلول‌پاشی گوگرد بر عملکرد و رنگیزه‌های فتوسنتزی ارقام گندم

زهره کریمی ✉[۱] | محمدجواد زارع[۲] | آرش فاضلی [۳] | بتول زارعی[۴]

۱. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: karimi_z98@yahoo.com

۲. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: mj.zarea@ilam.ac.ir

۳. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام، ایلام، ایران ، ایران. رایانامه: arashfazeli57@gmail.com

۴. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: batoolzarei90@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۵/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۲۸

تاریخ انتشار: آذر ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:
سرعت فتوسنتز،
سرعت تعرق،
کشاورزی پایدار،
کاروتنئوید،
کلروفیل.

چکیده

گندم جزو غلات اصلی اکثر کشورها است که در دهه‌های اخیر و به علت تغییرات اقلیمی زراعت آن به شدت تحت تاثیر شرایط محیطی قرار گرفته است. به همین منظور، آزمایشی با هدف بررسی پاسخ رنگیزه‌های فتوسنتزی و عملکرد ارقام گندم به کاربرد توأمان باکتری و گوگرد تحت شرایط دیم در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ انجام گرفت. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل چهار رقم گندم ایوان، سرداری، هما و آذر۲ ، عامل گوگرد در دو سطح محلول‌پاشی با آب مقطر به عنوان شاهد و محلول‌پاشی با گوگرد و باکتری در دو سطح عدم تلقیح (شاهد) و تلقیح با باکتری آزوسپیریلوم بود. نتایج نشان داد بیشترین عملکرد دانه (۳۰۳۰ کیلوگرم در هکتار) در رقم ایوان با کاربرد باکتری آزوسپیریلوم مشاهده شد. تلقیح با باکتری آزوسپیریلوم باعث افزایش عملکرد دانه ارقام ایوان و سرداری به‌ترتیب به‌میزان ۱۷/۹ و ۴۲ درصد گردید در حالی‌که بر عملکرد دانه ارقام هما و آذر ۲ از لحاظ آماری تاثیر معنی‌داری مشاهده نگردید. نتایج نشان داد محلول‌پاشی با گوگرد و کاربرد باکتری موجب بهبود فتوسنتز گردید. تحت شرایط دیم، رقم ایوان در مقایسه با ارقام سرداری، هما و آذر۲ از برتری قابل‌توجه عملکرد دانه برخوردار بود و با کاربرد باکتری عملکرد بیشتری تولید کرد. باکتری آزوسپیریلوم میزان فتوسنتز برگ را افزایش داد. مدیریت تغذیه گیاه و استفاده از باکتری‌های القاکننده رشد با تاثیراتی که در سطح فیزیولوژیکی می‌گذارند می‌توانند به عنوان راهکارهایی جهت بهبود عملکرد در شرایط دیم مطرح گردند.

استناد: کریمی؛ زهره، زارع؛ محمدجواد، فاضلی؛ آرش، زارعی؛ بتول، (۱۴۰۳) اثرات کاربرد باکتری آزوسپیریلوم و محلول‌پاشی گوگرد بر عملکرد و رنگیزه‌های فتوسنتزی ارقام گندم، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵ (۹)، ۱۵۲۰-۱۵۰۵. https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.379146.669753

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.379146.669753

مقدمه

بر اساس سناریو تغییرات آب و هوایی فعلی، افزایش دما و تغییر در شدت و نحوه پراکنش بارش منجر به افزایش تنش‌های مرتبط با خشکی و تغییرات دمایی گردیده که سبب کاهش رشد و توسعه گیاهان می‌شود (Fracasso *et al*., 2020). بیش از ۴۵ درصد از زمین‌های کشاورزی در مناطق خشک قرار گرفته است (Ashraf and Foolad, 2007)؛ به‌طوری‌که با توجه به تغییراقلیم و گرم شدن کره زمین در طی دهه‌های آینده، در مناطق خشک و نیمه‌خشک کاهش عملکرد محصولات کشاورزی در اثر خشکسالی بیش از ۵۰ درصد برآورد شده است (Jha *et al*., 2014). بیش از ۶۵ درصد اراضی زراعی ایران به‌صورت دیم مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد؛ میزان بارندگی در این اراضی بسیار اندک است به‌طوری‌که مقدار آن در اغلب دوره‌ی رشد گیاه نیازهای تبخیر و تعرق آن را کفایت نمی‌کند. به‌علاوه، تولید بخش قابل‌توجهی از محصولات اساسی کشور از جمله گندم که فقط به بارندگی در طول فصل رشد و یا آب ذخیره‌شده سال آیش متکی هستند به این نقاط اختصاص دارند (Alizadeh-Dehkordi et al., 2024).

گندم به‌عنوان بخشی ضروری از رژیم غذایی روزانه انسان در مناطق مختلف جغرافیایی جهان محسوب می‌شود. نزدیک به ۳۵ درصد از جمعیت جهان، گندم را به‌عنوان غذای اصلی مصرف می‌کنند. بیش از دو سوم تولید جهانی گندم به‌عنوان غذای انسان مصرف می‌شود؛ در حالی که یک پنجم به‌عنوان تغذیه دام استفاده می‌شود (Padhy *et al*., 2024; Grote *et al*., 2021). گندم یک گیاه زراعی بسیار مهم است و افزایش تولید آن با توجه به پتانسیل ژنتیکی این گیاه و واکنش آن به محیط نقش بسیار عمده‌ای در کاهش گرسنگی و افزایش تولید غذا در سطح جهان دارد (Saddiq *et al*., 2019). تولید محصولات در سرتاسر جهان با چالش‌های متعددی مانند تغییرات آب و هوایی، شهرنشینی و تنش‌های محیطی به ویژه تنش خشکی مواجه است که از طرفی افزایش بی‌سابقه تقاضای غذا این مشکلات را بزرگ‌تر می‌کند (Ghadirnezhad Shiade et al., 2023). یکی از موانع تولید عملکرد بالقوه کم‌آبی است که بر صفات فیزیولوژیکی گیاه زراعی اثر منفی می‌گذارد (نصیری محلاتی و همکاران، ۱۴۰۱). محققان اظهار داشتند کم‌آبی باعث کاهش ۲۲/۸ درصدی عملکرد دانه و ۱۵ درصدی وزن صد دانه ذرت گردید (نصراله زاده اصل و همکاران، ۱۳۹۶).

استفاده از پتانسیل موجودات مفید خاک‌زی می‌تواند یک استراتژی کاربردی از نظر اقتصادی برای کاهش اثرات تنش خشکی در محصولات در راستای کشاورزی پایدار باشد (Ansari *et al*., 2023). باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه از جمله منابع زیستی می‌باشند که از طریق روش‌های مستقیم و غیرمستقیم باعث افزایش رشد گیاه می‌گردند (Khalid *et al*., 2006). از جمله باکتری‌های محرک رشد می‌توان به باکتری آزوسپیریلوم اشاره کرد. این باکتری‌ها از طریق تغییرات در سیستم ریشه‌ای میزبان، تنظیم اسمزی، مدیریت تنش اکسیداتیو از طریق بیوسنتز و متابولیسم فیتوهورمون‌ها، تولید پلی‌ساکارید بزرگ و ترکیبات فعال زیستی باعث کاهش پیامد منفی تنش بر روی گیاه میزبان می‌گردند (Bhattacharyya & Jha, 2012). این کودها می‌توانند در محیط ریشه مواد زیستی فعال تولید و ترشح نماید که شرایط را برای توسعه سیستم ریشه و افزایش جذب مواد غذایی و تثبیت بیولوژیکی نیتروژن و فسفر فراهم نموده و در نهایت باعث افزایش عملکرد می‌شود (طایفه افشاری و همکاران، ۱۴۰۲).

در میان عناصر غذایی، از گوگرد بیشتر به‌منظور کاهش pH خاک‌های قلیایی استفاده می‌شود. گوگرد به‌عنوان یک کود پرمصرف علاوه بر تأمین حدود ۱۵ درصد وزن خشک زیست‌توده گیاه گندم باعث کاهش pH خاک شده و جذب عناصر غذایی میکرو را افزایش می‌دهد. همچنین باعث نگهداری بیشتر آب توسط خاک می‌گردد (Taiz *et al*., 2015). با توجه به اینکه دلیل اصلی استفاده از گوگرد در زمین‌های زراعی ایران، کاهش pH و کم کردن مشکلات تغذیه‌ای در گیاهان می‌باشد، در این راستا زمینه‌سازی برای مصرف گوگرد، در ابتدا نیازمند وجود دلایل علمی کافی است که نتایج مثبت پیش‌بینی شده از استفاده کود گوگرد را در آزمایش‌های مزرعه‌ای تأیید کند (بشارتی و همکاران، ۱۳۹۵). یکی از اثرات کم‌آبی، برهم زدن تعادل تغذیه‌ای در گیاه است (Shiade *et al*.,2024). با تکمیل مصرف عناصر غذایی از طریق محلول‌پاشی می‌توان وضعیت رشد گیاه را در شرایط تنش بهبود بخشید. کوددهی روش دیگری است که می‌توان از آن برای کاهش اثرات تنش خشکی در خاک استفاده کرد (Xie *et al*., 2017). کاربرد گوگرد می‌تواند پتانسیل تحمل گیاه در برابر تنش کم‌آبی را بهبود دهد (Ma *et al*., 2021). از جمله مزایای گوگرد در مقاومت گیاه، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت مانند سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز و ترکیبات اسمزی مانند پرولین گزارش شده است (Siddiqui *et al*., 2019). بنابراین، گوگرد می‌تواند به محافظت از گیاهان در برابر اثرات نامطلوب تنش اکسیداتیو ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن که معمولاً در گیاهان تولید می‌شود کمک کند (Lu *et al*., 2019).

گندم به‌عنوان مهمترین محصول کشور دارای بیشترین سطح زیر کشت در ایران است؛ این در حالی است که عملکرد گندم در واحد

سطح در کشور ایران، به دلیل آهکی بودن خاک و همچنین تنش کم‌آبی، از متوسط تولید جهانی پایین‌تر است. با توجه به فراوانی گوگرد و اثرات مفید آن بر گیاه و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک و همچنین توجه به پیامدهای مثبت استفاده از باکتری‌های محرک رشد در شرایط تنش در تحریک رشد و نمو گیاه، هدف از اجرای این پژوهش بررسی تأثیر نقش گوگرد و باکتری آزوسپیریلوم در ارقام مختلف گندم از طریق بهبود فتوسنتز و عملکرد است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه ایلام با مختصات عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۲۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی، با ارتفاع ۱۱۷۴ متر از سطح دریا، انجام شد. جهت تعیین خصوصیات خاک و در هر دو سال آزمایش قبل از اجرا نمونه‌گیری از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری انجام و نتایج آن در جدول یک گزارش شده است.

جدول ۱: نتایج ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

بافت خاک (سانتی‌متر ۰-۳۰)	pH	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	کربن آلی (درصد)	گوگرد	نیتروژن کل (درصد)	فسفر قابل‌جذب (قسمت در میلیون)	پتاسیم قابل‌جذب (قسمت در میلیون)
لومی رسی	۷	۰/۳	۱/۲	۱۲	۰/۱۲	۸/۵	۴۲۰

آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل چهار رقم گندم ایوان، سرداری، هما و آذر۲ ، عامل گوگرد در دو سطح محلول‌پاشی با آب مقطر به عنوان شاهد و محلول‌پاشی با گوگرد و باکتری در دو سطح عدم تلقیح با باکتری آزوسپیریلوم (شاهد) و تیمار شده با باکتری آزوسپیریلوم بود. جهت ضدعفونی کردن بذور، دانه‌های گندم ابتدا با غوطه‌وری در اتانول ۷۰ درصد به‌مدت ۳۰ ثانیه و سپس محلول هیپوکلریت سدیم دو درصد به‌مدت چهار دقیقه استریل شدند. سپس بذرها با آب مقطر کاملاً شسته شدند تا اثر هیپوکلریت سدیم از بین برود. بذور به دو گروه تقسیم شدند؛ بذرهای مربوط به تیمار باکتری، قبل از کاشت و بعد از ضدعفونی به‌مدت چهار ساعت در محلول حاوی باکتری (۲۰ میلی‌لیتر) قرار گرفتند تا خوب به باکتری آغشته شدند، گروه دوم (تیمار شاهد) در محیط کشت بدون باکتری (که اتوکلاو گردیده بود) قرار داده شد و سپس برای آسان نمودن کشت، بذرها در سایه هوادهی و بعد از خشک شدن به مزرعه منتقل و اقدام به کشت شد. باکتری مورد استفاده باکتری Azospirillum brasilense و دارای جمعیت 10^7 سلول باکتری در هر میلی‌لیتر مایه تلقیح بود.

کشت به‌صورت دیم در آبان ماه سال ۱۳۹۹ به روش دستی پس از عملیات آماده‌سازی و تسطیح زمین صورت گرفت. بذور گندم بر روی خطوطی با فاصله ۲۰ سانتی‌متر در عمق پنج سانتی‌متری خاک کشت شدند. هر کرت آزمایشی شامل شش ردیف کاشت با طول سه متر بود. در طول دوره رشد هیچ‌گونه آبیاری صورت نگرفت و در طول فصل رشد به‌صورت مستمر نیز علف‌های هرز با دست وجین گردیدند. کود موردنیاز بر اساس آزمون خاک و توصیه متداول کودی برای مزرعه آزمایشی استفاده شد. به این ترتیب که کود فسفر (سوپرفسفات تریپل) در زمان کاشت و کود نیتروژنه به‌صورت اوره به‌میزان ۲۲۰ کیلوگرم در هکتار طی دو مرحله (مرحله پنجه‌زنی، ساقه‌دهی) به مصرف رسید.

محلول‌پاشی گوگرد از منبع گوگرد مایع ۸۰ درصد سوسپانسیون به‌مقدار چهار لیتر در هکتار با غلظت یک درصد (طبق دستور شرکت سازنده)، توسط سم‌پاش پشتی استاندارد (با ظرفیت چهار لیتر) به‌صورت دستی در طی سه مرحله پنجه‌زنی، ساقه‌دهی و اواخر گلدهی انجام شد. تیمارهای شاهد با آب مقطر محلول‌پاشی شدند تا آن اندازه که آب از روی برگ‌ها سرازیر شد. هر سه مرحله محلول‌پاشی جهت جلوگیری از سوختگی برگ‌ها در ساعات خنک عصر انجام گردید.

نمونه‌برداری نمونه‌های برگ ۴۸ ساعت پس از محلول‌پاشی سوم (در اواخر مرحله گلدهی) به‌طور تصادفی از ۱۰ عدد برگ پرچم (از ۱۰ بوته) جهت اندازه‌گیری رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ انجام و نمونه‌ها در فویل قرار داده شدند و توسط فلاسک یخ به فریزر ۸۰- منتقل گردیدند. برای اندازه‌گیری عملکرد نهایی در مرحله رسیدگی کامل (پس از۲۲۰ روز)، برداشت انجام شد. نمونه‌برداری برای عملکرد دانه پس از حذف اثرات حاشیه‌ای از چهار ردیف میانی هر کرت به طول ۱/۲۵ متر انجام شد (برداشت با رطوبت ۱۶ درصد) که پس از برداشت نمونه‌ها با ترازوی دیجیتال توزین شدند.

جهت سنجش اندازه‌گیری تبادلات گازی (میزان فتوسنتز در واحد سطح برگ (میکرومول CO_2 در مترمربع در ثانیه)، سرعت تعرق (میلی‌مول آب بر مترمربع در ثانیه)، غلظت دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای (میلی‌مول بر مترمربع در ثانیه) و دمای برگ (درجه سانتی‌گراد) از دستگاه فتوسنتزمتر Plant Photosynthesis meter. Korea tech ساخت کره، موجود در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه ایلام استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها در مرحله دانه‌بندی تحت شرایط هوای آفتابی در ساعت ۱۰ تا ۱۲ صبح و در شدت نور ۱۲۰۰ تا ۱۴۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه انجام گرفت. به این صورت که صفات موردنظر با قرار دادن قسمت میانی برگ پرچم در پنج بوته در داخل محفظه شیشه‌ای دستگاه به‌مدت ۴۵ ثانیه ثبت شد (Reynolds *et al*., 1998).

نمونه‌گیری از برگ‌های جوان که به‌طور کامل گسترش پیدا کردند ۴۸ ساعت پس از محلول‌پاشی سوم (در اواخر مرحله گلدهی) جهت اندازه‌گیری کلروفیل بر طبق روش Arnon (۱۹۴۹) انجام گرفت. در این روش ابتدا مقدار ۰/۵گرم برگ تازه (نگهداری شده در نیتروژن مایع) را با استفاده از ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد در هاون چینی کاملاً ساییده تا عصاره برگ خارج و بافت بی‌رنگ گردد. عصاره‌ی به‌دست آمده به فالکون منتقل و بعد به‌مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. یک میلی‌لیتر از مایع رویی را برداشته و با استون ۸۰ درصد به حجم نهایی ۱۰ میلی‌لیتر رسید. با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر SPEECORD 50 n (آلمان) طول موج جذبی در طول موج‌های ۶۴۵، ۶۶۳ و ۴۷۰ نانومتر قرائت شد. از استون ۸۰ درصد به‌عنوان بلانک استفاده گردید.

رابطه ۱) $$\text{Chlorophyll a}= [12.7\times (A663)-2.69\times (A645)]\times V/(100\times W)$$

رابطه ۲) $$\text{Chlorophyll b}= [22.9\times (A645)-4.68\times (A663)]\times V/(100\times W)$$

رابطه ۳) $$\text{Carotenoid}= [1000\times (A470)-1.8\text{chl a}-85.02\text{chl b}]/198$$

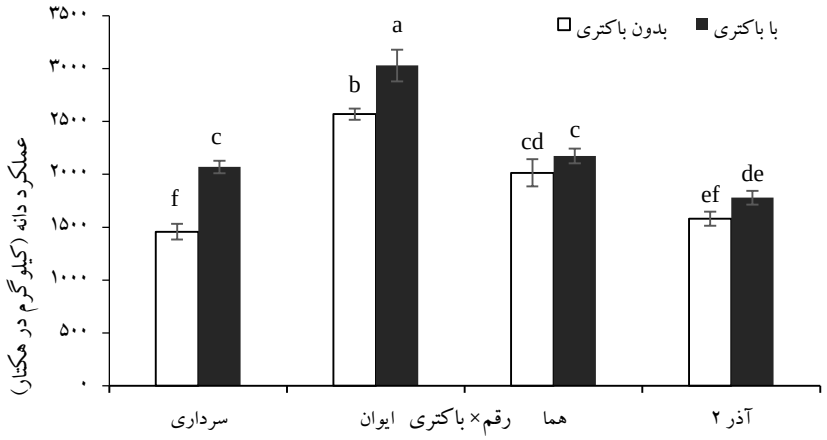
در این معادلات A470، A645 و A663 به‌ترتیب طول موج‌های ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر، V حجم نهایی نمونه ۱۰ میلی‌لیتر و W وزن تر برگ ۰/۵ گرم است. در نهایت داده‌ها بر اساس میلی‌گرم بر گرم بافت تازه برگ ثبت شدند.

تجزیه آماری داده‌ها، پس از بررسی آزمون نرمال بودن داده‌ها با آزمون‌های کلموگرف اسمیرنوف و آزمون اندرسون دارلینگ، با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS var 9.2 انجام گردید. برای مقایسه میانگین از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد و برای رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel استفاده گردید.

نتایج و بحث

عملکرد دانه

نتایج تجزیه آماری داده‌ها نشان داد اثرات ساده رقم، باکتری و محلول‌پاشی گوگرد بر عملکرد دانه معنی‌دار بود. همچنین اثرات متقابل (رقم× باکتری) در سطح پنج درصد بر عملکرد دانه معنی‌داری بود (جدول ۲). بیشترین عملکرد دانه (۳۰۳۰ کیلوگرم در هکتار) در رقم ایوان با کاربرد باکتری آزوسپیریلوم مشاهده شد. تلقیح با باکتری آزوسپیریلوم باعث افزایش عملکرد دانه ارقام ایوان و سرداری به‌ترتیب به‌میزان ۱۷/۹ و ۴۲ درصد گردید در حالی‌که بر افزایش عملکرد دانه ارقام هما و آذر ۲ از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (شکل ۱). در بین ارقام موردبررسی رقم گندم ایوان و سرداری از نظر عملکرد پاسخ مناسبی به تلقیح با باکتری آزوسپیریلوم نشان داد. به‌نظر می‌رسد ارقام گندم توانایی مختلفی در جذب آب و عناصر غذایی داشته و در نتیجه واکنش‌های متفاوتی به کاربرد باکتری آزوسپیریلوم نشان داده‌اند. احتمالاً باکتری آزوسپیریلوم با تثبیت نیتروژن، تولید مواد افزاینده رشد باعث بهبود رشد ریشه و در نتیجه بهبود سرعت جذب عناصر غذایی و آب شده و در نتیجه باعث افزایش عملکرد دانه ارقام گندم شده است. همچنین باکتری آزوسپیریلوم از طریق اثراتی که بر اجزای عملکرد دانه گندم داشته باعث بهبود عملکرد دانه گندم شده است. گزارش شده است تلقیح باکتری آزوسپیریلوم منجر به افزایش میزان ماده خشک گندم و میزان عملکرد دانه و وزن دانه گردیده است (Karimi *et al*., 2021; Zarea, 2017). علت بهبود در رشد و عملکرد دانه را نمی‌توان به توانایی این باکتری در تثبیت نیتروژن محدود نمود بلکه سایر اثرات این باکتری مانند افزایش جذب آب و عناصر غذایی ماکرو و ریزمغذی‌ها توسط گیاه که ناشی از گسترش سیستم ریشه گیاه توسط این باکتری است را می‌توان نام برد (Karimi *et al*., 2018; Zarea, 2017). محققان (Canigia and Zorita, 2009) گزارش کردند تلقیح گیاهان گندم با *A. brasilense* INTA Az-39 تحت شرایط کشت دیم باعث بهبود رشد رویشی، تجمع ماده خشک در اندام هوایی و ریشه، تعداد دانه و عملکرد دانه شد. در تحقیق دیگر نیز کاربرد باکتری‌های محرک رشد میزان عملکرد و اجزای عملکرد گیاه گندم را افزایش داد (Devi *et al*., 2023).



شکل ۱: اثرات باکتری آزوسپیریلوم بر عملکرد دانه ارقام گندم (LSD: 237.14)

جدول ۲: تجزیه واریانس شاخص‌های فتوسنتزی گندم تحت تأثیر رقم، باکتری آزوسپریلیوم و محلول‌پاشی گوگرد در شرایط دیم

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات							
		عملکرد دانه	سرعت فتوسنتز	سرعت تعرق	غلظت دی‌اکسید کربن زیر روزنه	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاروتنوئیدها
بلوک	۲	۹۲۳۱^{ns}	۰/۱۰۵۶^{ns}	۰/۱۸۵^{ns}	۳۱۵۷^{ns}	۰/۰۹۲۶^{ns}	۰/۰۹۱۱^{ns}	۰/۰۷۳۷^{ns}	۰/۰۶۲۱^{ns}
رقم (V)	۳	۳۱۱۶۴۸۱**	۷/۸۷۱۸**	۱/۳۶۱*	۱۳۳۹۳**	۵/۲۲۳۶**	۰/۶۷۳۵**	۸/۵۷۴۶**	۸/۵۱۴۰**
باکتری (B)	۱	۱۵۳۹۹۸۴**	۳/۳۶۰۲*	۹/۵۴۱**	۱۹۱۶^{ns}	۱/۲۲۰۲**	۰/۸۲۰۳**	۲/۷۲۵۵**	۱/۰۲۳۷**
V× B	۳	۱۳۹۸۹۸*	۱/۲۴۹۶^{ns}	۰/۵۵۲^{ns}	۴۸۶^{ns}	۱/۰۱۱۸**	۰/۲۵۲۶**	۱/۹۱۵۴**	۰/۳۲۰۲*
محلول‌پاشی(S)	۱	۲۴۴۹۱۵*	۴/۳۸۰۲**	۰/۰۳۰^{ns}	۳۷۲۹^{ns}	۰/۱۵۶۵^{ns}	۱/۷۹۳۷**	۴/۳۸۶۲**	۳/۶۹۹۶**
V× S	۳	۲۷۱۲۹^{ns}	۰/۴۶۷۴^{ns}	۰/۶۲۵^{ns}	۴۸۳۲*	۰/۰۰۹۰^{ns}	۰/۴۲۰۹**	۱/۰۱۰۵**	۲/۶۸۱۸**
B× S	۱	۱۱۴۰۱^{ns}	۲/۹۵۰۲*	۰/۰۲۱^{ns}	۵۸۵۸*	۰/۰۳۳۵^{ns}	۰/۱۵۰۱^{ns}	۰/۰۰۲۹^{ns}	۰/۰۱۶۸^{ns}
V× B× S	۳	۱۱۸۱۶۵^{ns}	۰/۶۳۶۳^{ns}	۰/۱۸۰^{ns}	۲۰۵۰^{ns}	۰/۰۱۳۳^{ns}	۰/۰۹۴۹^{ns}	۰/۰۱۳۵^{ns}	۰/۲۰۷۹^{ns}
خطای آزمایشی	۳۰	۴۰۴۴۷	۰/۵۱۲۵	۰/۳۶۵	۱۳۳۷	۰/۰۸۴۵	۰/۰۴۶۶	۰/۱۵۱۷	۰/۱۰۹۵
ضریب تغییرات (درصد)		۹/۶۴	۱۱/۲۲	۱۴/۴۵	۶/۳۳	۹/۲۲	۱۷/۴۹	۸/۷۷	۷/۵۲

ns، * و: به‌ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد**

سرعت فتوسنتز

اثرات ساده رقم و محلول‌پاشی در سطح احتمال یک درصد بر روی سرعت فتوسنتز برگ گندم معنی‌دار بود (جدول ۲). اثر تلقیح با باکتری و اثر دوگانه (محلول‌پاشی گوگرد× تلقیح باکتری) بر سرعت فتوسنتز در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). کمترین میزان سرعت فتوسنتز در شرایط عدم تلقیح باکتری و عدم محلول‌پاشی گوگرد به میزان ۵/۶ میکرومول CO_2 برمترمربع در ثانیه مشاهده گردید و سایر تیمارها در یک سطح آماری دارای بیشترین میزان سرعت فتوسنتز بودند (شکل ۲). رشد گیاهی نتیجه تلفیق و تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیکی می‌باشد. محدودیت در رشد نمی‌تواند به یک فرایند فیزیولوژیکی نسبت داده شود، فتوسنتز مهم‌ترین فرایند فیزیولوژیکی می‌باشد. در شرایط تنش‌های محیطی نشان داده شده است که کاهش فتوسنتز در درجه اول به‌دلیل کمبود دی‌اکسیدکربن است (Ghadirnezhad Shiade *et al*., 2023). اگرچه روزنه‌ها معمولاً تنها بخش کوچکی از سطح برگ را در بر گرفته (۰/۳ تا ۵ درصد) آن‌ها تقریباً ۹۵ درصد از کل تبادل گاز بین برگ و محیط را کنترل می‌کنند و برآوردها نشان می‌دهد که ۹۸ درصد از کل آب جذب‌شده از طریق ریشه‌ها ممکن است از طریق منافذ روزنه منتقل شوند (Morison, 2003). گزارش شده است که سرعت فتوسنتز یک عامل تعیین‌کننده رشد گیاه و تولید زیست‌توده است (Lu *et al*., 2015).

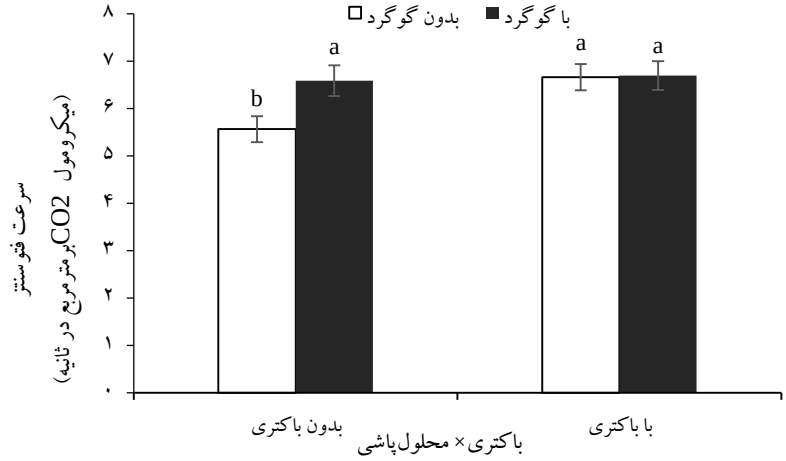
رقم ایوان بیشترین سرعت فتوسنتز (۷/۴۲ میکرومول CO_2 بر مترمربع در ثانیه) را به خود اختصاص داد. تلقیح با باکتری باعث افزایش ۸/۵۰ درصدی سرعت فتوسنتز گردید (جدول ۳). به‌نظر می‌رسد افزایش سرعت فتوسنتز تحت تیمار محلول‌پاشی با گوگرد ناشی از نقش گوگرد در بیوسنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی، سیستم فتوسنتزی و فعالیت آنزیم روبیسکو است. افزایش این متابولیت‌ها و فعالیت آنزیم‌ها باعث بهبود پارامترهای فتوسنتزی و از این‌رو مقادیر بالاتر آن‌ها می‌شود. نقش باکتری در افزایش سرعت فتوسنتز به‌دلیل نقش مستقیمی

است که باکتری‌های محرک رشد از جمله آزوسپیریلوم در افزایش دسترسی و تأمین عنصر نیتروژن و در نتیجه نقشی که نیتروژن در تشکیل کلروفیل دارد این عامل می‌تواند موجب افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی و در نهایت افزایش سرعت فتوسنتز گردد. مطالعات نشان می‌دهد که از سرعت فتوسنتز می‌توان برای تخمین عملکرد دانه استفاده کرد. در این مطالعه، افزایش مقدار سرعت فتوسنتز پس از تیمارهای محلول‌پاشی ممکن است به افزایش هدایت روزنه‌ای و سرعت تعرق نسبت داده شود، در نتیجه باعث تسریع دوره جذب کربن مؤثر برگ‌های گیاه و در نتیجه تسریع تجمع محصولات فتوسنتزی می‌شود (Liu *et al*., 2020). کاربرد گوگرد باعث افزایش سرعت فتوسنتز و در نتیجه باعث تولید بیشتر ماده خشک می‌شود (Ma *et al*., 2021; Liu *et al*., 2020). Shafiq و همکاران (۲۰۲۱) اظهار داشتند کاربرد کودهای گوگردی می‌تواند در شرایط خشکی میزان فتوسنتز برگ (۲۹ درصد) ، سرعت تعرق (۶۷ درصد) و هدایت روزنه‌ای (۱۱۸ درصد) را افزایش دهد.

جدول ۳: اثرات رقم و باکتری آزوسپیریلوم بر خصوصیات فتوسنتزی گندم تحت شرایط دیم

ارقام گندم	سرعت فتوسنتز (میکرومول CO_2 بر مترمربع در ثانیه)	سرعت تعرق (میلی‌مول آب بر مترمربع در ثانیه)
سرداری	۵/۷۹^{c}	۴/۱۳۳^{ab}
ایوان	۷/۴۲^{a}	۴/۵۳۳^{a}
هما	۶/۶۲^{b}	۴/۳۲^{a}
آذر ۲	۵/۶۹^{c}	۳/۷۴^{b}
LSD (0.05)	۰/۵۹۶۹	۰/۵۰۴۲
کاربرد باکتری		
با باکتری	۶/۶۴^{a}	۴/۶۳^{a}
بدون باکتری	۶/۱۲^{b}	۳/۷۴^{b}
LSD (0.05)	۰/۴۲۲۱	۰/۳۵۶۵

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.



شکل ۲: اثرات باکتری آزوسپیریلوم و محلول‌پاشی با گوگرد بر سرعت فتوسنتز گندم (LSD: 0.5969)

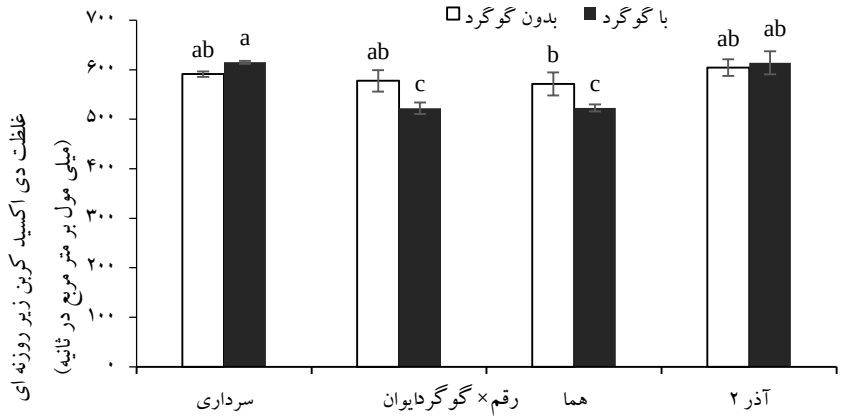
سرعت تعرق

نتایج نشان داد اثرات ساده رقم ($P<0.05$) و باکتری($P<0.01$) بر سرعت تعرق معنی‌دار شد ولی دیگر اثرات متقابل بر این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۲). بیشترین سرعت تعرق در رقم ایوان و رقم هما به ترتیب به میزان ۴/۵۳۳ و ۴/۳۲ میلی‌مول آب بر مترمربع در ثانیه مشاهده گردید و تلقیح با باکتری سرعت تعرق را به‌میزان ۲۳/۸۰ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (جدول ۳). محققان (Ansari *et al*., 2023) گزارش کردند تنش خشکی باعث کاهش سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، کارآیی مصرف آب و سرعت تعرق در گیاه گندم شد. با کاهش هدایت روزنه‌ای در شرایط تنش غلظت دی‌اکسید کربن افزایش یافته و از فرآیندهای بیوشیمیایی جلوگیری می‌شود، استفاده از کود گوگردی با تنظیم فعالیت روزنه به بازیابی کارایی فتوسنتزی کمک کرد، که منجر به افزایش سرعت فتوسنتز و تعرق شد. این اثرات مثبت عرضه کود گوگردی ممکن است به‌دلیل افزایش در دسترس بودن گوگرد برای ایجاد ترکیبات حاوی گوگرد که با اسید آبسزیک برای افزایش

ورود پتاسیم به سلول‌های نگهبان تعامل دارند و در نتیجه فعالیت فتوسنتزی را تحت تنش خشکی بهبود می‌بخشند (Han *et al*., 2019).

غلظت دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده رقم در سطح احتمال یک درصد و اثرات دوگانه (رقم× گوگرد) و (گوگرد× باکتری) در سطح احتمال پنج درصد بر غلظت دی‌اکسیدکربن زیر روزنه‌ای برگ گندم معنی‌دار بودند (جدول ۲). بیشترین غلظت دی‌اکسیدکربن زیر روزنه‌ای برای رقم سرداری بود که در شرایط محلول‌پاشی با گوگرد و عدم محلول‌پاشی اختلاف معنی‌داری نداشت. در ارقام هما و ایوان محلول‌پاشی با گوگرد باعث کاهش غلظت CO_2 زیر روزنه به‌ترتیب به‌میزان ۸/۴۹ و ۹/۵۹ درصد شد (شکل ۳). پایین بودن مقدار دی‌اکسیدکربن زیر روزنه، بیانگر آسیمیلات سریع‌تر کربن و کارایی بیشتر سیستم فتوسنتزی است. تیمارهای کاربرد گوگرد و تلقیح باکتری باعث کاهش مقدار دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای شد. کاهش مقدار دی‌اکسید کربن زیر روزنه نشان‌دهنده تعدیل تأثیر اثرات نامطلوب تنش بر سیستم فتوسنتزی و افزایش کارایی سیستم فتوسنتزی است و اما تجمع دی‌اکسید کربن در برگ و در شرایط تنش بیانگر عدم توانایی گیاه در فرآوری دی‌اکسید کربن علی‌رغم عبور آن از مقاومت روزنه‌ای است. بنابراین بالا بودن تجمع دی‌اکسید کربن زیر روزنه در ارقام سرداری و آذر ۲ به معنای پایین بودن هدایت مزوفیلی و کارایی سیستم فتوسنتزی است. به نظر می‌رسد هر عاملی که شرایط را برای گیاه ایده‌آل‌تر کند، غلظت CO_2 زیر روزنه را کم می‌کند زیرا به‌دلیل افزایش متابولیسم، جذب CO_2 بیشتر (استفاده از CO_2 در چرخه فتوسنتز) و غلظت آن در زیر روزنه کم می‌شود. نتایج این پژوهش مطابق با نتایج Waraich و همکاران (۲۰۲۱) است. در شرایط بدون تلقیح باکتری و بدون محلول‌پاشی گوگرد دارای بیشترین غلظت CO_2 زیر روزنه به میزان ۶۰۳/۵ میلی‌مول بر مترمربع در ثانیه بدست آمد (شکل ۴). در رابطه با اثرات محلول‌پاشی گوگرد بررسی Farman و همکاران (۲۰۲۲) در ذرت نشان داد که در مقایسه با تیمار شاهد، بیشترین افزایش میزان فتوسنتز (۶۴ درصد)، هدایت روزنه‌ای (۵۶ درصد) و غلظت CO_2 بین سلولی (۵۶ درصد) محلول‌پاشی گوگرد در شرایط تنش کم‌آبی مشاهده شد. همچنین، عرضه اضافی گوگرد باعث افزایش بیوسنتز پروتئین و کلروفیل و تحریک روبیسکو برای بهبود فتوسنتز در شرایط نامطلوب می‌شود (Fatma *et al*., 2014).



شکل ۳: اثرات محلول‌پاشی با گوگرد بر غلظت دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای در ارقام گندم (LSD: 43.12)

شکل ٤: اثرات باکتری آزوسپیریلوم و محلول‌پاشی با گوگرد بر غلظت دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای گندم (LSD: 30.49)

غلظت کلروفیل a

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد تأثیر تیمار رقم و باکتری و همچنین اثر دوگانه (رقم× باکتری) بر کلروفیل a با سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). تلقیح با باکتری باعث افزایش غلظت کلروفیل a در برگ ارقام گندم شد. بر اساس مقایسه میانگین تیمارها، بیشترین میزان کلروفیل a از تلقیح با باکتری در رقم ایوان (۴/۲۹۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) مشاهده شد و کمترین میزان کلروفیل a در رقم آذر و با تلقیح باکتری به میزان ۲/۵۳۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ بدست آمد (جدول ۴). به نظر می‌رسد رقم آذر پاسخ مناسبی به تلقیح با باکتری از خود نشان نداده است که می‌تواند به دلیل خصوصیات ژنتیکی این رقم برگردد. با این حال، رنگیزه‌های گیاهی مهمترین عامل برای کسب نور و تولید محصول هستند (Ghadirnezhad Shiade *et al*., 2023). در تأیید نتایج به‌دست آمده، گزارش شده است که باکتری‌های ازتوباکتر و آزوسپیریلوم، غلظت کلروفیل‌ها را در گندم (Ali *et al*., 2020; El-Sorady *et al*., 2022) به‌طور چشمگیری افزایش دادند. در این زمینه، شایان ذکر است که محتوای کلروفیل در برگ‌ها به‌طور مستقیم با وضعیت تغذیه‌ای نیتروژن گیاهان در ارتباط است (Pelloso *et al*., 2023). که یکی از اثرات مفید باکتری این است که نیتروژن را تثبیت و در اختیار گیاه قرار می‌دهد.

جدول ٤: اثرات باکتری آزوسپیریلوم بر مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ چهار رقم گندم تحت شرایط دیم

ارقام گندم	کاربرد باکتری	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاروتنوئیدها
		---- (میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) ----			
سرداری	با باکتری	۲/۵۳۳^{d}	۰/۸۹۵^{c}	۳/۴۲۸^{e}	۳/۸۷۷^{c}
	بدون باکتری	۲/۶۱۹^{cd}	۰/۹۶۱^{c}	۳/۵۸۰^{de}	۳/۸۱۱^{c}
ایوان	با باکتری	۴/۲۹۸^{a}	۱/۵۳۱^{ab}	۵/۸۲۹^{a}	۵/۵۸۶^{a}
	بدون باکتری	۳/۶۳۳^{b}	۱/۴۰۰^{b}	۴/۹۶۵^{b}	۵/۳۷۵^{a}
هما	با باکتری	۳/۸۸۸^{b}	۱/۶۶۷^{a}	۵/۵۵۴^{a}	۴/۷۰۵^{b}
	بدون باکتری	۲/۹۳۷^{c}	۱/۰۶۸^{c}	۴/۱۳۸^{c}	۴/۵۸۷^{b}
آذر ۲	با باکتری	۲/۵۳۱^{d}	۱/۳۶۶^{b}	۳/۸۹۷^{cd}	۴/۰۱۸^{c}
	بدون باکتری	۲/۷۸۵^{cd}	۰/۹۸۴^{c}	۴/۱۱۹^{c}	۳/۲۴۴^{d}
LSD (0.05)		۰/۳۴۲۸	۰/۲۵۴۶	۰/۴۵۹۳	۰/۳۹۰۲

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

غلظت کلروفیل b

تأثیر تیمار رقم و باکتری و همچنین اثر دوگانه (رقم× باکتری) بر کلروفیل b در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر محلول‌پاشی و اثر متقابل (رقم× محلول‌پاشی) تأثیر معنی‌داری بر کلروفیل b در سطح احتمال یک درصد داشتند. سایر منابع تغییر تأثیر معنی‌دار آماری بر این صفت نداشتند (جدول ۲). بر اساس مقایسه میانگین تیمارها، بیشترین میزان کلروفیل b از تلقیح با باکتری در رقم هما (۱/۶۶۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) مشاهده شد و کمترین میزان کلروفیل b در رقم سرداری و با تلقیح باکتری به میزان ۰/۸۹۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ بدست آمد (جدول ۴). کاربرد باکتری در مناطق خشک رشد ریشه، جذب نیتروژن و فسفر را بهبود می‌بخشد و سرعت فتوسنتز و مقدار رنگیزه‌ها فتوسنتزی را افزایش می‌دهد (Emami *et al*., 2019). کاربرد گوگرد باعث افزایش مقدار کلروفیل، فتوسنتز برگ و در نتیجه بهبود عملکرد ذرت تحت شرایط تنش کم‌آبی شده است (Usmani *et al*., 2020). مقدار کلروفیل برگ ذرت با کاربرد ۴۵ و ۹۰ کیلوگرم در هکتار گوگرد افزایش یافت (Li *et al*., 2019). در مطالعه Kumar و همکاران (۲۰۱۷)، کاربرد گوگرد منجر به افزایش سنتز انواع کلروفیل‌ها نظیر کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل شد.

در ارقام ایوان و هما و آذر۲ محلول‌پاشی گوگرد باعث حصول غلظت کلروفیل b بالاتری نسبت به رقم سرداری شد (جدول ۵). در ارقام سرداری و ایوان تفاوت آماری معنی‌داری بین محلول‌پاشی و عدم محلول‌پاشی گوگرد بر غلظت کلروفیل b مشاهده نشد؛ در حالی‌که اعمال تیمار محلول‌پاشی باعث افزایش کلروفیل b در ارقام هما و آذر۲ به‌میزان ۵۹/۴۹ درصد و ۱۰۰/۲۵ درصد شد. (جدول ۵). این امر ممکن است به‌دلیل نقش گوگرد در ساختار آنزیم، جذب و متابولیسم نیتروژن و افزایش نیتروژن جذب شده توسط گره‌های ریشه باشد. بر اساس مطالعات، کمبود گوگرد در گیاه سبب کاهش میزان گوگرد موجود در برگ و در نهایت منجر به کاهش سرعت فتوسنتز در واحد کلروفیل می‌گردد. در این راستا استفاده از تیمارهای مختلف گوگرد، می‌تواند سبب افزایش سرعت فتوسنتز و به دنبال آن عملکرد دانه، روغن از طریق سنتز کلروفیل و پروتئین گردد (Skudra & Ruza, 2017). سایر محققان اظهار داشتند به‌خوبی ثابت شده است که متابولیت‌های مشتق شده از گوگرد جزء مهم اسیدهای آمینه، متیونین و پروتئین‌های موردنیاز برای بیوسنتز کلروفیل هستند (& Abadie

Tcherkez, 2019). در دسترس بودن گوگرد باعث ترویج بیوسنتز پروتئین‌ها و کلروفیل می‌شود (Fatma *et al*., 2014)، گوگرد یک عنصر ضروری موردنیاز برای تشکیل کلروفیل است و فعالیت فتوسنتزی را برای افزایش رشد و تجمع زیست‌توده در گیاهان ترویج می‌کند (Lee *et al*., 2014).

جدول ۵: اثرات محلول‌پاشی گوگرد بر مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ چهار رقم گندم تحت شرایط دیم

ارقام گندم	محلول‌پاشی گوگرد	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاروتنوئیدها
		---- (میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) ----		
سرداری	با گوگرد	۰/۹۶۱^{bc}	۳/۵۵۹^{c}	۳/۹۱۳^{d}
	بدون گوگرد	۰/۸۹۶^{bc}	۳/۴۴۹^{c}	۳/۷۷۵^{d}
ایوان	با گوگرد	۱/۵۰۰^{a}	۵/۴۵۶^{a}	۶/۰۰۱^{a}
	بدون گوگرد	۱/۴۳۱^{a}	۵/۳۳۸^{a}	۴/۹۶۰^{c}
هما	با گوگرد	۱/۶۸۱^{a}	۵/۳۱۷^{a}	۵/۴۳۹^{b}
	بدون گوگرد	۱/۰۵۴^{b}	۴/۳۷۶^{b}	۳/۸۵۳^{d}
آذر ۲	با گوگرد	۱/۵۶۸^{a}	۴/۶۳۳^{b}	۳/۳۵۹^{e}
	بدون گوگرد	۰/۷۸۳^{c}	۳/۳۸۳^{c}	۳/۹۰۳^{d}
LSD (0.05)		۰/۲۵۴۶	۰/۴۵۹۳	۰/۳۹۰۲

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

غلظت کلروفیل کل

نتایج نشان داد اثر رقم و باکتری و همچنین اثر دوگانه (رقم× باکتری) بر کلروفیل کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر محلول‌پاشی و اثر متقابل (رقم× محلول‌پاشی) تأثیر معنی‌داری بر کلروفیل کل در سطح احتمال یک درصد داشت. سایر منابع تغییر تأثیر معنی‌دار آماری بر رنگیزه‌های فتوسنتزی نداشتند (جدول ۲). بیشترین میزان کلروفیل کل در ارقام ایوان و هما تحت تلقیح باکتری حاصل گردید. صفت مذکور در ارقام سرداری و آذر ۲ در شرایط تلقیح باکتری اختلاف معنی‌داری با عدم تلقیح نداشت؛ اما در ارقام ایوان و هما تلقیح باکتری باعث افزایش کلروفیل کل به‌ترتیب به‌میزان ۱۷/۴۰ درصد و ۳۴/۲۲ درصد شد (جدول ۴). به نظر می‌رسد تلقیح با باکتری آزوسپیریلوم سبب افزایش در میزان کلروفیل و در نهایت بهبود فتوسنتز شده است. بهبود محتوای کلروفیل گندم به واسطه آزوسپیریلوم نیز توسط محققان (Alhammad et al., 2023; Zaheer et al., 2022) بررسی شده است و با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. تحت اعمال محلول‌پاشی با گوگرد ارقام ایوان و هما بیشترین میزان کلروفیل کل را به خود اختصاص دادند. میزان کلروفیل کل در تیمار محلول‌پاشی با گوگرد اختلاف معنی‌داری با عدم محلول‌پاشی در ارقام سرداری و ایوان نداشت در حالی‌که در ارقام هما و آذر ۲ به‌میزان ۲۱/۵۰ درصد و ۳۶/۹۵ درصد افزایش یافت (جدول ۵). احتمالاً محلول‌پاشی گوگرد باعث افزایش محتوای گوگرد در بافت‌های برگ می‌شود که منجر به کاهش pH شیره سلولی می‌شود. کاهش pH شیره سلولی با واسطه گوگرد باعث می‌شود که آهن برای بیوسنتز پورفیرین در دسترس سلول‌های گیاهی باشد. پورفیرین یک واسطه در بیوسنتز کلروفیل است. علاوه بر این، گوگرد جذب مواد مغذی مانند نیتروژن و منیزیم را افزایش می‌دهد که با پایداری ساختار کلروفیل مرتبط هستند. در واقع گوگرد به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و کلروفیل را بهبود می‌بخشد (Ur Rehman *et al*., 2013; Skudra & Ruza, 2017). کاربرد کود گوگردی به حفظ کلروفیل کمک کرد و از تخریب رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی در شرایط شدید جلوگیری کرد (Al-Huqail *et al*., 2017). این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از کود گوگرد مناسب مانند گچ می‌تواند اثرات منفی کمبود گوگرد را بر کلروپلاست‌های عملکردی، که عموماً غنی از گوگرد هستند و نقش کلیدی در فتوسنتز دارند، کاهش دهد (Chowdhury *et al*., 2020). بهبود پارامترهای مرتبط با عملکرد ممکن است به‌دلیل تولید محتوای کلروفیل بیشتر، افزایش سرعت فتوسنتز و تقسیم سلولی، انتقال بیشتر مواد جذب‌شده به سمت قسمت‌های زایشی نسبت به بخش‌های رویشی به‌دلیل تقسیم‌بندی بیشتر مواد جذب‌شده به سمت سینک با افزایش کاربرد گوگرد باشد (Raza *et al*., 2018). استفاده از گوگرد باعث متعادل شدن کوددهی می‌شود که ممکن است رشد را افزایش داده و در نهایت به عملکرد بیشتر کمک کند. پیش از این، در کلزا، سنتز کلروفیل با افزایش کاربرد گوگرد افزایش یافت که منجر به سرعت فتوسنتزی و عملکرد محصول بالاتر شد (Ur Rehman *et al*., 2013). گوگرد در برخی از اسیدهای آمینه و ویتامین‌ها وجود دارد و برای تولید کلروپلاست مورد نیاز است به همین دلیل گوگرد برای فتوسنتز در گیاهان سبز بسیار مهم است زیرا وجود آن در کمپلکس‌های گوگرد–آهن است (Rashid *et al*., 2016).

غلظت کاروتنوئیدها

نتایج نشان داد میزان کاروتنوئید در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر تیمارهای رقم، باکتری، محلول‌پاشی و اثر متقابل (رقم× محلول-پاشی) و در سطح احتمال پنج درصد اثر دوگانه (رقم× باکتری) قرار گرفت. سایر اثرات دو و سه گانه تأثیری بر کاروتنوئید نداشتند (جدول ۲). رقم ایوان در حالی بیشترین میزان کاروتنوئید را به خود اختصاص داد که تلقیح و عدم تلقیح باکتری اختلاف معنی‌داری بر میزان کاروتنوئید نشان نداد و کمترین میزان این صفت در رقم آذر ۲ تحت عدم تلقیح مشاهده گردید (جدول ۴). به‌جز در رقم آذر ۲ که تلقیح باکتری باعث افزایش ۲۳/۸۶ درصدی میزان کاروتنوئید شد که با نتایج Mousavi و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد در بقیه ارقام تلقیح باکتری اختلاف معنی‌داری بر صفت مذکور نداشت (جدول ۴). در محلول‌پاشی گوگرد رقم ایوان بیشترین میزان کاروتنوئید (۶/۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) را به خود اختصاص داد. اعمال محلول‌پاشی سبب افزایش کاروتنوئید در ارقام ایوان، هما به‌ترتیب به‌میزان ۲۰/۹۹ و ۴۱/۱۶ درصد گردید و اثری بر کاروتنوئید رقم سرداری نداشت (جدول ۵). گزارش شده است که باکتری آزوسپیریلوم باعث افزایش میزان کاروتنوئید برگ و توزیع کربوهیدرات‌ها به دانه‌های گندم می‌شود (Ilyas et al., 2020; Camaille et al., 2021).

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که کاربرد گوگرد باعث افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی(کلروفیل a، b و کل) و بهبود فرآیند فتوسنتز در گیاهان گندم می‌شود. این امر به‌ویژه در ارقام جدید گندم مانند رقم ایوان که دارای برتری قابل‌توجهی نسبت به ارقام قدیمی مانند رقم سرداری است، بیشتر مشهود بود. رقم ایوان با بهره‌گیری از باکتری آزوسپیریلوم، عملکرد دانه بالاتری را به دست آورد. همچنین، رقم سرداری نیز با استفاده از این باکتری رشد و عملکرد بهتری داشت. بر اساس این نتایج، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ارقام جدید و قدیم گندم به باکتری آزوسپیریلوم وابستگی زیادی دارند و به کاربرد این کود واکنش‌های متفاوتی نشان می‌دهند. از این رو، توصیه می‌گردد که کودهای زیستی و گوگردی با توجه به آزمون خاک و شرایط خاص هر رقم، در برنامه‌های کوددهی گنجانده شوند تا از حداکثر پتانسیل تولیدی این ارقام بهره‌برداری شود. جنبه‌های کاربردی این تحقیق نشان می‌دهد که انتخاب صحیح نوع و میزان کودهای زیستی و شیمیایی بر اساس شرایط محیطی و ویژگی‌های ژنتیکی هر رقم گندم، می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد و پایداری تولید داشته باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد".

منابع

بشارتی، حسین.، خسروی، هوشنگ.، مستشاری، مهرزاد.، میرزاشاهی، کامران.، قادری، جلال. و ذبیحی، حمیدرضا. (۱۳۹۵). بررسی اثر تیوباسیلوس، گوگرد و فسفر بر شاخص‌های رشد ذرت (*Zea mays* L.) در برخی مناطق ایران. *تحقیقات کاربردی خاک*. ۴(۱)، ۱۰۳-۱۱۳.

طایفه افشاری، هادی.، میرشکاری، بهرام.، حسن‌زاده قورت تپه، عبداله.، فرح وش، فرهاد.، یارنیا، مهرداد. (۱۴۰۲). تأثیر کاربرد کودهای بیولوژیکی و سوپر جاذب بر خصوصیات زراعی گیاه کرچک (*Ricinus communis* L.) تحت شرایط تنش کم‌آبی. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۶(۳)، ۸۵۳-۸۶۹.

نصراله زاده اصل، وحید.، محرم نژاد، سجاد.، یوسفی، مهری.، بنده حق، علی.، ابراهیمی، لاله. (۱۳۹۶). ارزیابی عملکرد دانه هیبریدهای ذرت (*Zea mays* L) تحت محدودیت آب. *دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۲۷(۲)، ۸۵-۹۶.

نصیری محلاتی، مهدی.، بهامین، صادق.، فتحی، امین.، بهشتی، سید علیرضا .(۱۴۰۱). تأثیر تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت با استفاده از روش فراتحلیل. *پژوهش‌های کاربردی زراعی*، ۳۵(۱)، ۳۰-۵۳.

REFERENCES

Abadie, C., & Tcherkez, G. (2019). In vivo phosphoenolpyruvate carboxylase activity is controlled by CO 2 and O2 mole fractions and represents a major flux at high photorespiration rates. *New Phytologist*, *221*(4), 1843-1852.

Alhammad, B. A., Zaheer, M. S., Ali, H. H., Hameed, A., Ghanem, K. Z., & Seleiman, M. F. (2023). Effect of Co-application of Azospirillum brasilense and Rhizobium pisi on wheat performance and soil nutrient status under deficit and partial Root drying stress. *Plants*, *12*(17), 3141.

Al-Huqail, A. A., AL-Rashed, S. A., Ibrahim, M. M., El-Gaaly, G. A., & Qureshi, M. I. (2017). Arsenic induced eco-physiological changes in Chickpea (*Cicer arietinum*) and protection by gypsum, a source of

sulphur and calcium. *Scientia Horticulturae*, *217*, 226-233.
Ali, A. F., Alsaady, M. H. M., Salim, H. A., Bader, B. R., & Abed, A. H. (2020). Effect of bio-fertilizers Azotobacter chrocooccum and Azospirillum brasilense on the growth of vegetative yield of the winter wheat cultivar (Audi) as a fodder srop. *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences*, *16*(1), 1749-1753.
Alizadeh-Dehkordi, P., Kamkar, B., & Nehbandani, A. (2024). The effect of climate change on the future of rainfed wheat cultivation in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 26(1), 687-709.
Ansari, F. A., Ahmad, I., & Pichtel, J. (2023). Synergistic effects of biofilm-producing PGPR strains on wheat plant colonization, growth and soil resilience under drought stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *30*(6), 103664.
Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24, 1-5.
Ashraf, M. F. M. R., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, *59*(2), 206-216.
Besharati, H., Khosravi, H., Mostashari, M., Mirzashahi, K., Ghaderi, J., & Zabihi, H. R. (2016). Evaluation of effects of Thiobacillus, sulfur and phosphorous on corn (*Zea mays* L.) growth indices in some regions of Iran. *Applied Soil Research*, *4*(1), 103-113. (in Persian).
Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *28*(4), 1327-1350.
Camaille, M., Fabre, N., Clément, C., & Ait Barka, E. (2021). Advances in wheat physiology in response to drought and the role of plant growth promoting rhizobacteria to trigger drought tolerance. *Microorganisms*, *9*(4), 687.
Chowdhury MA, Sultana T, Rahman MA, Saha BK, Chowdhury T, Tarafder S (2020) Sulphur fertilization enhanced yield, its uptake, use efficiency and economic returns of *Aloe vera* L. Heliyon 6:e05726. https:// doi. org/ 10. 1016/j. heliy on. 2020. e05726.
Devi, B., Tiwari, M., Yadav, N., & Singh, P. (2023). Intergenerational immune priming: harnessing plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) for augmented wheat protection against spot blotch. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, *128*, 102164.
Díaz-Zorita, M., & Fernández-Canigia, M. V. (2009). Field performance of a liquid formulation of Azospirillum brasilense on dryland wheat productivity. *European Journal of Soil Biology*, *45*(1), 3-11.
El-Sorady, G. A., El-Banna, A. A., Abdelghany, A. M., Salama, E. A., Ali, H. M., Siddiqui, M. H., ... & Lamlom, S. F. (2022). Response of bread wheat cultivars inoculated with azotobacter species under different nitrogen application rates. *Sustainability*, *14*(14), 8394.
Emami, S., Alikhani, H. A., Pourbabaei, A. A., Etesami, H., Sarmadian, F., & Motessharezadeh, B. (2019). Effect of rhizospheric and endophytic bacteria with multiple plant growth promoting traits on wheat growth. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*, 19804-19813.
Farman, M., Nawaz, F., Majeed, S., Javeed, H. M. R., Ahsan, M., Ahmad, K. S., ... & Hussain, M. B. (2022). Silicon seed priming combined with foliar spray of sulfur regulates photosynthetic and antioxidant systems to confer drought tolerance in maize (*Zea mays* L.). *Silicon*, *14*(13), 7901-7917.
Fatma, M., Asgher, M., Masood, A., & Khan, N. A. (2014). Excess sulfur supplementation improves photosynthesis and growth in mustard under salt stress through increased production of glutathione. *Environmental and Experimental Botany*, *107*, 55-63.
Fracasso, A., Telò, L., Lanfranco, L., Bonfante, P., & Amaducci, S. (2020). Physiological beneficial effect of Rhizophagus intraradices inoculation on tomato plant yield under water deficit conditions. *Agronomy*, *10*(1), 71.
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.
Grote, U., Fasse, A., Nguyen, T. T., & Erenstein, O. (2021). Food security and the dynamics of wheat and maize value chains in Africa and Asia. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *4*, 617009.
Han, Y., Yang, H., Wu, M., & Yi, H. (2019). Enhanced drought tolerance of foxtail millet seedlings by sulfur dioxide fumigation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *178*, 9-16.
Ilyas, N., Mazhar, R., Yasmin, H., Khan, W., Iqbal, S., Enshasy, H. E., & Dailin, D. J. (2020). Rhizobacteria isolated from saline soil induce systemic tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) against salinity stress. *Agronomy*, *10*(7), 989.
Jha, U. C., Bohra, A., & Singh, N. P. (2014). Heat stress in crop plants: its nature, impacts and integrated

breeding strategies to improve heat tolerance. *Plant Breeding*, *133*(6), 679-701.
Karimi, N., Goltapeh, E. M., Amini, J., Mehnaz, S., & Zarea, M. J. (2021). Effect of azospirillum zeae and seed priming with zinc, manganese and auxin on growth and yield parameters of wheat, under dryland farming. *Agricultural Research*, *10*(1), 44-55.
Karimi, N., Zarea, M. J., & Mehnaz, S. (2018). Endophytic Azospirillum for enhancement of growth and yield of wheat. *Environmental Sustainability*, *1*(2), 149-158.
Khalid, A., Arshad, M., & Zahir, Z. A. (2006). Phytohormones: Microbial production an applications. In *Biological Approaches to Sustainable Soil System* (pp. 207-220).
Kumar, S. G., Reddy, A. M., & Sudhakar, C. (2003). NaCl effects on proline metabolism in two high yielding genotypes of mulberry (*Morus alba* L.) with contrasting salt tolerance. *Plant Science*, *165*(6), 1245-1251.
Lee, B. R., Muneer, S., Jung, W. J., Avice, J. C., Ourry, A., & Kim, T. H. (2014). Partitioning of newly absorbed and previously stored nitrogen and sulfur under sulfate deficient nutrition. *Journal of Plant Nutrition*, *37*(10), 1702-1716.
Li, N., Yang, Y., Wang, L., Zhou, C., Jing, J., Sun, X., & Tian, X. (2019). Combined effects of nitrogen and sulfur fertilization on maize growth, physiological traits, N and S uptake, and their diagnosis. *Field Crops Research*, *242*, 107593.
Liu, J., Hou, H., Zhao, L., Sun, Z., & Li, H. (2020). Protective Effect of foliar application of sulfur on photosynthesis and antioxidative defense system of rice under the stress of Cd. *Science of the Total Environment*, *710*, 136230.
Lu, H. B., Qiao, Y. M., Gong, X. C., Li, H. Q., Zhang, Q., Zhao, Z. H., & Meng, L. L. (2015). Influence of drought stress on the photosynthetic characteristics and dry matter accumulation of hybrid millet. *Photosynthetica*, *53*(2), 306-311.
Lu, Y., Wang, Q. F., Li, J., Xiong, J., Zhou, L. N., He, S. L., ... & Liu, H. (2019). Effects of exogenous sulfur on alleviating cadmium stress in tartary buckwheat. *Scientific Reports*, *9*(1), 7397.
Ma, Y., Zhang, H., Xue, Y., Gao, Y., Qian, X., Dai, H., ... & Li, Z. (2021). Effect of sulfur fertilizer on summer maize grain yield and soil water utilization under different irrigation patterns from anthesis to maturity. *Agricultural Water Management*, *250*, 106828.
Morison, J. I., Stewart, B. A., & Howell, T. (2003). Plant water use, stomatal control. *Encyclopedia of Water Science. Marcel Dekker, New York*, 680-685.
Mousavi, S. S., Karami, A., & Maggi, F. (2022). Photosynthesis and chlorophyll fluorescence of Iranian licorice (*Glycyrrhiza glabra* L.) accessions under salinity stress. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 984944.
Nasrollahzade Asl, V., Moharramnejad, S., Yusefi, M., Bandehhagh, A., & Ibrahimi, L. (2017). Evaluation of grain yield of maize (Zea mays L.) hybrides under water limitation. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *27*(2), 85-96. (in Persian).
Nassiri Mahallati, M., Bahamin, S., Fathi, A., & Beheshti, S. A. (2022). The effect of drought stress on yield and yield components of maize using meta-analysis method. *Applied Field Crops Research*, *35*(1), 53-35. (in Persian).
Padhy, A. K., Kaur, P., Singh, S., Kashyap, L., & Sharma, A. (2024). Colored wheat and derived products: key to global nutritional security. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(7), 1894-1910.
Pelloso, M. F., Vidigal Filho, P. S., Scapim, C. A., Ortiz, A. H. T., Numoto, A. Y., & Freitas, I. R. M. (2023). Agronomic performance and quality of baby corn in response to the inoculation of seeds with Azospirillum brasilense and nitrogen fertilization in the summer harvest. *Heliyon*, *9*(4).
Rashid, A., Khan, F., Ali, R., Kahn, M. A., Hameed, S., Elahi, M. E., ... & Khan-Marwat, S. (2016). Maximizing wheat yield through foliar application of Sulfur and Zinc with and without farmyard manure. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, *16*(5), 882-887.
Raza, M. A., Feng, L. Y., Manaf, A., Wasaya, A., Ansar, M., Hussain, A., ... & Yang, W. (2018). Sulphur application increases seed yield and oil content in sesame seeds under rainfed conditions. *Field Crops Research*, *218*, 51-58.
Reynolds, M. P., Singh, R. P., Ibrahim, A., Ageeb, O. A. A., Larquesaavedra, A., & Quick, J. S. (1998). Evaluating physiological traits to complement empirical selection for wheat in warm environments. *Euphytica Netherlands Journal of Plant Breeding*, 100, 85-94.
Saddiq, M. S., Iqbal, S., Afzal, I., Ibrahim, A. M., Bakhtavar, M. A., Hafeez, M. B., & Maqbool, M. M. (2019). Mitigation of salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings through physiological seed enhancements. *Journal of Plant Nutrition*, *42*(10), 1192-1204.
Shafiq, B. A., Nawaz, F., Majeed, S., Aurangzaib, M., Al Mamun, A., Ahsan, M., ... & ul Haq, T. (2021). Sulfate-based fertilizers regulate nutrient uptake, photosynthetic gas exchange, and enzymatic

antioxidants to increase sunflower growth and yield under drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *21*(3), 2229-2241.

Shiade, S. R. G., Zand-Silakhoor, A., Fathi, A., Rahimi, R., Minkina, T., Rajput, V. D., ... & Chaudhary, T. (2024). Plant metabolites and signaling pathways in response to biotic and abiotic stresses: Exploring bio stimulant applications. *Plant Stress*, 100454.

Skudra, I., & Ruza, A. (2017). Effect of nitrogen and sulphur fertilization on chlorophyll content in winter wheat. *Rural sustainability research*, *37*(332), 29-37.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (No. Ed. 6). Sinauer Associates Incorporated.

Tayfa Afshari, H., Mirshekari, B., Hasanzadeh Ghorttapeh, A., Farahvash, F., & Yarnia, M. (2023). Effect of use of biological fertilizers and superabsorbents on the agronomic characteristics of castor plant (Ricinus communis L.) under water deficit stress conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *16*(3), 853-869. (in Persian).

Ur Rehman, H., Iqbal, Q., Farooq, M., Wahid, A., Afzal, I., & Basra, S. M. (2013). Sulphur application improves the growth, seed yield and oil quality of canola. *Acta physiologiae plantarum*, *35*, 2999-3006.

Usmani, M. M., Nawaz, F., Majeed, S., Shehzad, M. A., Ahmad, K. S., Akhtar, G., ... & Shabbir, R. N. (2020). Sulfate-mediated drought tolerance in maize involves regulation at physiological and biochemical levels. *Scientific Reports*, *10*(1), 1147.

Waraich, E. A., Hussain, A., Ahmad, Z., Ahmad, M., & Barutçular, C. (2022). Foliar application of sulfur improved growth, yield and physiological attributes of canola (*Brassica napus* L.) under heat stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, *45*(3), 369-379.

Xie, Y. X., Zhang, H., Zhu, Y. J., Li, Z. H. A. O., Yang, J. H., Cha, F. N., ... & Guo, T. C. (2017). Grain yield and water use of winter wheat as affected by water and sulfur supply in the North China Plain. *Journal of Integrative Agriculture*, *16*(3), 614-625.

Zaheer, M. S., Ali, H. H., Erinle, K. O., Wani, S. H., Okon, O. G., Nadeem, M. A., ... & Raza, A. (2022). Inoculation of Azospirillum brasilense and exogenous application of trans-zeatin riboside alleviates arsenic induced physiological damages in wheat (Triticum aestivum). *Environmental Science and Pollution Research*, 1-11.

Zarea, M. J. (2017). *Azospirillum* and wheat production. *Probiotics in Agroecosystem*, 329-348.