



Research Article

Vol. 24, No. 3, Fall 2026, p. 375-388

The Effects of Mycorrhizal Fungi and Plant Growth-Promoting Bacteria on Photosynthetic Pigments, Antioxidant Enzymes, and Yield of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Different Irrigation Regimes

A. Tobeh^{1*}, A. Tobeh¹, S. Farzaneh¹

1- Department of Genetics and Plant Breeding, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

(*- Corresponding author's Email: Aydintobeh11@gmail.com)

Received: 27 November 2025
Revised: 23 February 2026
Accepted: 12 April 2026
Available Online: 12 May 2026

How to cite this article:

Tobeh, A., Tobeh, A., & Farzaneh, S. (2026). The effects of mycorrhizal fungi and plant growth-Promoting bacteria on photosynthetic pigments, antioxidant enzymes, and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under different irrigation regimes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(3), 375-388. (In Persian)
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2026.96731.1435>

Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is a strategic global cereal, providing over 20% of human calorie intake. However, climate change, increased drought frequency, and declining irrigation water resources seriously threaten sustainable wheat production. In many agricultural regions, including Iran, drought stress is a primary factor limiting wheat yield. Therefore, finding biological strategies to enhance wheat's tolerance to water stress is a research priority in sustainable agriculture. Utilizing low-cost and environmentally friendly approaches to increase plant resilience to environmental stresses is essential. Among these, employing beneficial rhizosymbionts like Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR), such as *Pseudomonas* and *Azospirillum*, has garnered significant research interest. AMF form extensive hyphal networks in the soil, dramatically increasing the root absorption surface area and improving plant access to water and less mobile nutrients like phosphorus. PGPR enhance plant growth and abiotic stress tolerance through various mechanisms, including producing plant growth hormones (e.g., auxins), synthesizing siderophores, fixing nitrogen, and inducing systemic resistance. While many studies have focused on the individual effects of AMF or PGPR, research on their combined impact on wheat growth and performance under limited irrigation condition is scarce. This study aimed to evaluate the individual and combined effects of mycorrhizal fungi and plant growth-promoting bacteria on photosynthetic pigments, antioxidant enzymes, biochemical resistance traits, and ultimately, the yield of wheat under different irrigation regimes.

Materials and Methods

This research was conducted during the 2021-2022 growing season at a research farm in the Arshaq region, Meshgin Shahr County, Ardabil Province, Iran. The experiment was arranged as a factorial based on a Randomized Complete Block Design with three replications. The first factor was biofertilizer type at four levels: control, mycorrhizal fungi (*Rhizophagus intraradices*), PGPR (*Pseudomonas fluorescens* and *Azospirillum brasilense*), and a combination of both mycorrhizal fungi and PGPR. The second factor was irrigation regime at three levels: no irrigation (rainfed), irrigation at 50% of plant water requirement, and full irrigation (100% water requirement). Measured traits included root colonization percentage, chlorophyll a, b, and carotenoid content, activities of the antioxidant enzymes catalase (CAT), peroxidase (POX), and superoxide dismutase (SOD), number of grains per spike, thousand-kernel weight, and grain yield. Root colonization was assessed using staining and microscopic examination. Photosynthetic pigments were extracted with acetone and measured spectrophotometrically. Enzyme activities were determined using specific spectrophotometric assays: CAT



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jcesc.2026.96731.1435>

activity by monitoring H_2O_2 decomposition at 240 nm, POX activity by monitoring guaiacol oxidation at 470 nm, and SOD activity by measuring the inhibition of nitroblue tetrazolium reduction at 560 nm.

Results and Discussion

The analysis of variance indicated that the main effects of biofertilizers and irrigation regimes, as well as their interaction, were significant for all measured traits. The highest root colonization (79.6%) was observed in the full irrigation $\times$ combined biofertilizer treatment. Drought stress reduces carbohydrate allocation to roots, limiting the carbon source for fungi and hindering colonization. Biofertilizers, especially the combination, provided direct inoculation and improved the root environment, facilitating higher colonization. The maximum chlorophyll a (2.55 mg g^{-1}), chlorophyll b (0.85 mg g^{-1}), and carotenoid (0.204 mg g^{-1}) contents were recorded in the full irrigation $\times$ combined biofertilizer treatment. The minimum values were under severe drought without biofertilizers. Drought degrades chloroplasts and activates chlorophyll-degrading enzymes. Biofertilizers, by improving water and nutrient (especially phosphorus) uptake, helped maintain pigment synthesis and protect the photosynthetic apparatus from oxidative damage. The highest activities of CAT (32.5 U mg^{-1}), POX (4.88 U mg^{-1}), and SOD (28.8 U mg^{-1}) were found in the no irrigation $\times$ no biofertilizer treatment. Conversely, the lowest enzyme activities were consistently observed in the full irrigation $\times$ combined biofertilizer treatment. Elevated antioxidant enzyme activity under drought stress without biofertilizers is a physiological response to high oxidative stress caused by increased Reactive Oxygen Species (ROS) production. The application of biofertilizers, particularly the combination, mitigated water and nutrient deficits, thereby reducing ROS generation and the need for high antioxidant enzyme activity, indicating better physiological equilibrium. Increased significantly from $2501.7 \text{ kg ha}^{-1}$ under severe drought without biofertilizers to $4891.6 \text{ kg ha}^{-1}$ under full irrigation with combined biofertilizers. This demonstrates that the synergistic effect of AMF and PGPR in improving water relations, nutrient status, and oxidative stress management translated into superior yield performance.

Conclusion

The findings of this study demonstrate that the combined application of mycorrhizal fungi and plant growth-promoting bacteria is an effective strategy for mitigating the adverse effects of drought stress and enhancing wheat yield. This biological combination acted synergistically to significantly increase root colonization, preserve the photosynthetic system by maintaining higher chlorophyll and carotenoid levels, and reduce oxidative stress by modulating antioxidant enzyme activities. These improvements ultimately led to a significant increase in yield components. Therefore, employing these bio-inputs can serve as a sustainable and eco-friendly approach, paving the way for reduced chemical fertilizer use, increased plant resilience to water scarcity, and enhanced food security.

Keywords: Carotenoid, Catalase, Chlorophyll, Colonization, Peroxidase

تأثیر قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد بر رنگیزه‌های فتوسنتزی، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

آیدین توبه^{۱*}، احمد توبه^۱، سلیم فرزانه^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۳

چکیده

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین غلات جهان است. تنش خشکی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل محدودکننده عملکرد گندم شناخته می‌شود. بنابراین، یافتن راهکارهای زیستی از جمله استفاده از قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد جهت افزایش مقاومت گیاه اهمیت زیادی دارد. این پژوهش طی سال زراعی ۱۴۰۰-۴۰۱ در مزرعه تحقیقاتی جهاد کشاورزی ارسق از توابع شهرستان مشگین‌شهر واقع در استان اردبیل با هدف بررسی اثر کاربرد جداگانه و ترکیبی قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد بر رنگیزه‌های فتوسنتزی، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و عملکرد گندم تحت سطوح مختلف آبیاری انجام گرفت. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. عامل‌ها شامل چهار سطح کود زیستی (شاهد، قارچ میکوریزا، باکتری‌های محرک رشد و ترکیب هر دو) و سه رژیم آبیاری (آبیاری کامل، آبیاری معادل ۵۰ درصد نیاز آبی و قطع آبیاری) بودند. بیشترین درصد کلونی‌زاسیون ریشه (۷۹/۶ درصد)، محتوای کلروفیل a و b و کاروتنوئیدها (به‌ترتیب ۲/۵۵، ۰/۸۵ و ۰/۲۰۴ میلی‌گرم بر گرم) و عملکرد دانه (۴۸۹۱/۶ کیلوگرم در هکتار) در تیمار آبیاری کامل همراه با کاربرد توأم هر دو کود زیستی به‌دست آمد. در تمامی سطوح آبیاری، کاربرد کودهای زیستی به‌ویژه کاربرد توأم آن‌ها موجب بهبود صفات زراعی و فیزیولوژیکی گیاه شد. یافته‌های این آزمایش نشان داد که کاربرد ترکیبی قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد، از طریق تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و ظرفیت فتوسنتزی راهکاری مؤثر برای کاهش خسارات ناشی از تنش خشکی است و زمینه کاهش مصرف کودهای شیمیایی را فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پراکسیداز، کاتالاز، کاروتنوئید، کلروفیل، کلونی‌زاسیون

مقدمه

کشت شده که ۷۹ درصد آن‌ها دیم است. با توجه به اینکه اکثر کشت گندم در ایران و استان اردبیل به‌صورت دیم است، تغییر اقلیم و کمبود بارندگی در سالیان گذشته باعث محدودیت در کمیت و کیفیت تولید گندم شده است. در بسیاری از مناطق کشاورزی جهان از جمله ایران، تنش خشکی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل محدودکننده عملکرد گندم شناخته می‌شود. تنش کم‌آبی با تأثیر بر رشد ریشه و اندام هوایی، کاهش سطح برگ، اختلال در جذب عناصر غذایی و اختلال در فتوسنتز موجب کاهش عملکرد دانه می‌شود (Farooq et al., 2009). از این‌رو، یافتن راهکارهای زیستی برای افزایش تحمل گندم به تنش آبی، از اولویت‌های پژوهشی در کشاورزی پایدار به شمار می‌رود.

در این شرایط، بهره‌گیری از راهکارهای کم‌هزینه و سازگار با محیط زیست برای افزایش تاب‌آوری گیاهان در برابر تنش‌های محیطی، ضرورتی انکارناپذیر است. در بین این راهکارها، استفاده از

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین غلات راهبردی جهان محسوب می‌شود و بیش از ۲۰ درصد کالری مصرفی بشر را تأمین می‌کند. با این حال، تغییرات اقلیمی، افزایش وقوع خشکسالی و کاهش منابع آب آبیاری، تولید پایدار گندم را به‌طور جدی تهدید می‌کند (Adel & Carels, 2023). بیش از ۶۵ درصد اراضی کشاورزی در ایران به کشت گندم اختصاص یافته که حدود دو سوم آن دیم است. در استان اردبیل نیز گندم در حدود ۲۹۰ هزار هکتار (تقریباً نیمی از زمین‌های کشاورزی)

۱- گروه ژنتیک و تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(*) - نویسنده مسئول: Email: Aydintobeh11@gmail.com

<https://doi.org/10.22067/jcsc.2026.96731.1435>

میکوریزا یا باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه بر گیاهان متمرکز بوده‌اند و بررسی اثرهای هم‌زمان این دو بر رشد و عملکرد گندم تحت شرایط آبیاری محدود، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این شکاف دانشی، لزوم انجام مطالعات جامع‌تر در این زمینه را نشان می‌دهد. این پژوهش با هدف اصلی بررسی اثرات جداگانه و ترکیبی قارچ‌های میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد بر رنگیزه‌های فتوسنتزی، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و صفات بیوشیمیایی مقاومت در برابر تنش و در نهایت عملکرد گندم تحت سطوح مختلف آبیاری اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر طی سال زراعی ۱۴۰۰-۰۱ در مزرعه نمونه تحقیقاتی جهاد کشاورزی منطقه ارشق از توابع شهرستان مشگین‌شهر واقع در استان اردبیل انجام گرفت. میزان بارندگی سالانه در این منطقه حدود ۳۵۰ میلی‌متر است. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. عامل اول رژیم آبیاری دارای سه سطح (بدون آبیاری، آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه و آبیاری کامل) بود. عامل دوم نوع کود زیستی در چهار سطح بود. این سطوح عبارتند از شاهد، استفاده از کود زیستی قارچ میکوریزا، استفاده از باکتری‌های محرک رشد و استفاده توأم از قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد بود. در مجموع، ۱۲ تیمار آزمایشی وجود داشت. این تیمارهای آزمایشی هرکدام در سه تکرار انجام شدند و در مجموع ۳۶ واحد آزمایشی وجود داشت. نیاز آبی کامل گندم براساس گزارش‌های محلی جهاد کشاورزی و با استفاده از روش پنمن-مانتیت و داده‌های هواشناسی منطقه، معادل ۵۰۰۰ مترمکعب در هکتار برای کل دوره رشد برآورد شد (Allen et al., 1998). آبیاری‌ها از مرحله پنجه‌زنی (حدود ۲۰ روز پس از کاشت) آغاز و تا انتهای مرحله پُر شدن دانه ادامه یافت. آبیاری به‌صورت نوبتی و براساس تبخیر و تعرق تجمعی از تشتک کلاس A محاسبه و اعمال گردید. در تیمار آبیاری کامل، آبیاری هنگامی انجام می‌شد که رطوبت خاک به حدود ۷۰ درصد ظرفیت زراعی می‌رسید. در تیمار ۵۰ درصد، آبیاری تنها پس از رسیدن به ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی مجاز انجام شد. کلیه عملیات آبیاری با استفاده از سیستم جوی و پشته و یکنواخت‌سازی شیب زمین به‌منظور توزیع یکنواخت آب انجام پذیرفت. تیمار بدون آبیاری تنها متکی به بارش‌های طبیعی فصل بود. جهت کاهش هرگونه نشت یا خطای احتمالی تمهیدات لازم انجام شد، از جمله این تمهیدات وجود پشته‌های خاکی عریض، حفر کانال‌های زهکشی عمیق در اطراف هر کرت جهت جمع‌آوری و هدایت آب و همچنین وجود ردیف‌های حفاظتی کاشته‌شده در کناره‌های کرت بود که جز مساحت نمونه‌برداری نبود. برای اعمال تیمارهای زیستی، از یک دستورالعمل

ریزوسیمبیونت‌های مفید مانند قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار و باکتری‌های محرک رشد گیاه از جمله *Pseudomonas Azospirillum* توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. قارچ‌های میکوریزا با ایجاد شبکه‌های گسترده هیفی در خاک، سطح جذب ریشه را به‌طور چشمگیری افزایش داده و دسترسی گیاه به آب و عناصر کم‌تحرک مانند فسفر را بهبود می‌بخشد (Smith & Read, 2008). افزون‌بر این، قارچ‌های میکوریزا با تنظیم بیان ژن‌های مرتبط با تنش آبی و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، در سازگاری غلات با خشکی نقش آفرینی می‌کند (Naseri et al., 2021; Ruiz-lozano et al., 2016). این قارچ‌ها در تجزیه مواد آلی خاک و آزادسازی مواد غذایی نقش دارند و آن‌ها را در اختیار گیاه قرار می‌دهند (Lehmann et al., 2020). ژانگ و همکاران در پژوهش خود مشاهده کردند که استفاده از قارچ‌های میکوریزا می‌تواند مقاومت به خشکی، و رشد و عملکرد گندم را در شرایط کم‌آبی افزایش دهد (Zhang et al., 2019). همچنین باکتری‌های محرک رشد با سازوکارهای مختلف از جمله تولید هورمون‌های رشد گیاهی (مانند اکسین)، سنتز سیدروفور، تثبیت نیتروژن و القای مقاومت سیستمیک موجب بهبود رشد و افزایش تحمل گیاه در برابر تنش‌های غیرزیستی می‌شوند (Backer et al., 2018). این باکتری‌ها با حل‌کنندگی فسفات و القای مقاومت به تنش‌ها، نقش مهمی در بهبود رشد و عملکرد گیاهان ایفا می‌کنند (Khodadadi & Ghorbani, 2020). یافته‌های تحقیقاتی حاکی از آن است که کاربرد این باکتری‌ها می‌تواند موجب افزایش محتوای کلروفیل، بهبود نرخ فتوسنتز و در نهایت، افزایش عملکرد گندم تحت تنش خشکی شود (Vurukonda et al., 2016). گروهی از این باکتری‌ها می‌توانند نیتروژن موجود در هوا را که گیاه قادر به جذب مستقیم آن نیست، گرفته و به‌شکل قابل استفاده برای گیاه تبدیل کنند (Kuan et al., 2016). این کار بسیار مهمی است و تا حدی نیاز گیاه به کودهای نیتروژنی را کاهش می‌دهد. بسیاری از این باکتری‌ها همچنین موادی به‌نام هورمون‌های رشد تولید می‌کنند که به‌طور مستقیم باعث تحریک تقسیم سلولی، طولی شدن ریشه و گسترش سیستم ریشه‌ای می‌شوند (Karimi et al., 2022). یک ریشه قوی و گسترده، دسترسی گیاه به آب و غذا را بسیار افزایش می‌دهد. جمیل و همکاران در مطالعه خود نتیجه گرفتند که کاربرد *Pseudomonas fluorescens* در گندم تحت شرایط تنش خشکی موجب افزایش طول ریشه و فعالیت رنگیزه‌های فتوسنتزی می‌شود (Jamil et al., 2018). طبق پژوهش گالیندو و همکاران (Galindo et al., 2022)، مایه‌زنی با *Azospirillum brasilense* وابستگی به کود نیتروژن را تا ۵۰ درصد کاهش داده و ضمن افزایش عملکرد و سودآوری، به امنیت غذایی و پایداری محیط زیست کمک می‌کند. بیشتر مطالعات انجام‌شده تاکنون بر تأثیر جداگانه قارچ‌های

انجام آزمایش بررسی شده است.

نحوه اندازه‌گیری صفات

پس از رسیدگی کامل گیاه، ناحیه‌ای به مساحت یک مترمربع از ردیف‌های وسط هر کرت انتخاب شد و برداشت به‌منظور اندازه‌گیری صفات عملکردی صورت گرفت. سپس میانگین مربوط به هر صفت در هر کرت به دست آمده و ثبت شد. پس از آن، عملکرد دانه به‌دست‌آمده به هکتار تعمیم داده شد. با توجه به متفاوت بودن تیمارها از نظر سطوح آبیاری و سطوح کودی، زمان برداشت و طول دوره رسیدگی در هر تیمار متفاوت بود. بنابراین تاریخ ثابت و مشخصی برای برداشت وجود ندارد. به این نکته که هر تیمار در زمان رسیدگی کامل برداشت شود، دقت گردید. جهت اندازه‌گیری درصد کلونیزاسیون ریشه در پایان دوره رشد و هم‌زمان با برداشت نهایی، از سیستم ریشه گیاهان در تمامی تیمارها به‌طور تصادفی نمونه‌برداری شد. نمونه‌های ریشه پس از شست‌وشو، در اتانول ۷۰ درصد تثبیت گردیدند. برای ارزیابی درصد کلونیزاسیون ریشه، از نمونه‌های ریشه نازک استفاده شد. به این منظور، نمونه‌ها ابتدا در محلول پتاسیم هیدروکسید ۱۰ درصد به مدت ۴۸ ساعت در دمای اتاق شفاف‌سازی و سپس در محلول اسید هیدروکلریک یک درصد خنثی‌سازی شدند. در نهایت، رنگ‌آمیزی با جوهر شفر ۰/۰۵ درصد در محلول اسید لاکتیک-گلیسرول به مدت ۲۴ ساعت انجام پذیرفت. پس از خارج کردن رنگ اضافی با اسید لاکتیک-گلیسرول خالص، نمونه‌ها بر روی لام قرار داده شده و با میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند (Trouvelot et al., 2015).

زمان سنجش صفات فیزیولوژیک، مرحله حداکثر رشد رویشی بود. برای اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم کاتالاز، ابتدا یک گرم از نمونه بافت برگ‌های جوان و کاملاً توسعه‌یافته گیاه در یک بافر فسفات سرد همگن شد. سپس محلول همگن‌شده به مدت ۱۵ دقیقه در سانتریفیوژ با سرعت ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه قرار گرفت تا مواد جامد جدا شوند. فاز مایع شفاف به‌عنوان منبع آنزیم کاتالاز استفاده گردید.

دو مرحله‌ای برای تلقیح بذرها استفاده شد. در تیمارهای شامل باکتری‌های محرک رشد (اعم از تیمار باکتری به‌تنهایی و تیمار ترکیبی)، بذرها با استفاده از سوسپانسیون حاوی باکتری‌های *Pseudomonas fluorescens* و *Azospirillum brasilense* با غلظت 10^8 CFU ml^{-1} به‌روش پوشش‌دهی آغشته شدند، به‌طوری که مقدار مصرف سوسپانسیون یک لیتر در هکتار در نظر گرفته شد. در تیمارهای شامل قارچ میکوریزا (اعم از تیمار قارچ به‌تنهایی و تیمار ترکیبی)، از مایه تلقیح قارچی گونه *Rhizophagus intraradices* حاوی ۱۰۰ اسپور زنده در هر گرم از بستر تلقیح (خاک استریل و اجزای زادمایه) استفاده گردید. برای اطمینان از انتقال مؤثر قارچ به بذر و منطقه ریشه، روش پوشش‌دهی بذر با ماده حامل خشک به کار رفت؛ بدین صورت که بذرها (که در تیمار ترکیبی قبلاً با سوسپانسیون باکتریایی مرطوب شده بودند) با مخلوطی از مایه تلقیح قارچ و خاک استریل به‌عنوان ماده حامل، با نسبت مشخص ۱۰۰ گرم اینوکولوم قارچ به‌ازای هر کیلوگرم بذر مخلوط شدند تا اسپورها به‌طور یکنواخت به سطح بذر بچسبند. در نهایت، تمامی بذرها تلقیح‌شده بلافاصله و در همان روز در شرایط مزرعه کشت شدند. ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپر فسفات تریپل و ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود پتاسیم سولفات و همچنین ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره به‌عنوان کود پایه استفاده گردید. کود پایه کمتر از نیاز گیاه مصرف شد تا اثر کودهای زیستی و هم‌زیستی میکوریزایی تحت تأثیر قرار نگیرد. عملیات کاشت در ۷ آبان ماه انجام شد. کاشت بذرها با استفاده از بذرکار دستی (ردیف‌کار) و به‌صورت خطی صورت گرفت. بذرها در عمق سه تا چهار سانتی‌متر و با فاصله ردیف‌های ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار داده شدند. تراکم کاشت معادل ۳۵۰ بذر در مترمربع تنظیم گردید. طول کرت‌ها ۴/۵ متر و عرض آن دو متر بود. همچنین فاصله بین کرت‌ها در یک بلوک نیم متر و فاصله بین بلوک‌ها یک متر بود. فاصله بین ردیف‌های کاشت گندم، ۲۰ سانتی‌متر بود که به‌وسیله پشته‌های خاکی عریض از هم جدا شده بودند. رقم مورد استفاده، آذر ۲ بود که رقمی پاییزه و متحمل به سرما است. بذرها با قوه نامیه بالای ۹۵ درصد و خلوص فیزیکی ۹۸ درصد از ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل تهیه شدند. در جدول ۱، ویژگی‌های خاک محل

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل انجام آزمایش در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری

Table 1- Physicochemical properties of the soil used in the experiment at a depth of 0 to 30 cm

بافت Texture	پتاسیم قابل جذب Potassium available (ppm)	فسفر قابل جذب Phosphorus available (ppm)	ماده آلی Organic matter (%)	نیترژن کل Total nitrogen (%)	اسیدیته خاک pH	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	شن Sand (%)
لومی رسی Clay loam	150	12	1.3	0.08	7.2	25	43	32

جدول ۲- اطلاعات هواشناسی محل انجام پژوهش

Table 2- Meteorological information of the research site

ماه	بیشینه دما	کمینه دما	میزان بارندگی
Month	T Maximum (°C)	T Minimum (°C)	Precipitation (mm)
مهر October	21.5	10.5	4.3
آبان November	11.7	3.3	26.3
آذر December	8.7	-0.6	18
دی January	7	-2	41
بهمن February	4	-8.5	23.4
اسفند March	12.4	1.9	30.2
فروردین April	14.4	4.2	28
اردیبهشت May	17.5	6.7	80.2
خرداد June	23	10.2	12
تیر July	24	13	1.8
مرداد August	27.1	14.1	0.5
شهریور September	22.8	11	1.1

و یک ماده جاذب انجام شد. سپس مایع شفاف به دست آمده از سانتریفیوژ در دمای چهار درجه سانتیگراد جمع‌آوری گردید. مخلوط واکنش شامل بافر فسفات، اسید آمینه متیونین، معرف تترازولیوم، ریبوفلاوین و عصاره آنزیمی است. این مخلوط به مدت ۲۰ دقیقه در معرض نور لامپ فلورسنت قرار گرفت و سپس میزان جذب نور در طول موج ۵۶۰ نانومتر خوانده شد. یک واحد فعالیت این آنزیم به عنوان مقداری از آنزیم تعریف می‌شود که موجب ۵۰ درصد مهار کاهش معرف تترازولیوم در شرایط استاندارد شود (Giannopolitis & Ries, 1977).

برای اندازه‌گیری میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی، ابتدا نیم گرم از برگ را وزن کرده و در ۲۰ میلی‌لیتر حلال استون ۸۰ درصد همگن‌سازی کرده، سپس نمونه در سانتریفیوژ با ۶۰۰۰ دور در دقیقه قرار گرفت تا ذرات جامد از محلول جدا شوند. پس از آن، محلول شفاف به دستگاه اسپکتروفتومتر منتقل شده و میزان جذب آن در طول موج‌های خاصی اندازه‌گیری گردید. برای تعیین غلظت کلروفیل و کاروتنوئیدها، جذب نوری در طول موج‌های ۶۶۳ نانومتر برای کلروفیل a، ۶۴۵ نانومتر برای کلروفیل b و ۴۷۰ نانومتر برای کاروتنوئیدها اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از فرمول‌های استاندارد،

برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم، ۵۰ میکرولیتر از مایع شفاف به ۲/۹ میلی‌لیتر از محلول پراکسید هیدروژن (۱۰ میلی‌مولار در بافر فسفات) اضافه شد. کاهش جذب نور در طول موج ۲۴۰ نانومتر به مدت یک دقیقه با استفاده از دستگاه طیف‌سنج UV-Vis ثبت گردید. فعالیت کاتالاز براساس میزان کاهش جذب نور و با استفاده از ضریب خاموشی پراکسید هیدروژن (۰/۰۴۳ میلی‌مولار بر سانتی‌متر) محاسبه شد (Hadwan & Abed, 2018).

برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم پراکسیداز، ۵۰ میکرولیتر از فاز مایع شفاف به ۲/۹ میلی‌لیتر از مخلوط واکنش حاوی بافر فسفات، گایاکول (۲۰ میلی‌مولار) و پراکسید هیدروژن (۱۰ میلی‌مولار) اضافه شد. افزایش جذب نور در طول موج ۴۷۰ نانومتر به مدت یک دقیقه با استفاده از دستگاه طیف‌سنج UV-Vis ثبت می‌شود. فعالیت پراکسیداز براساس میزان افزایش جذب نور و با استفاده از ضریب خاموشی تترایاکول (۲۶/۶ میلی‌مولار بر سانتی‌متر) محاسبه گردید (Singh et al., 2017).

فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز در برگ‌های گندم به روش جیانوپولوتیس و رایز اندازه‌گیری شد. به این منظور، استخراج آنزیم از نمونه‌های برگ خردشده در یک بافر فسفات سرد حاوی ماده محافظ

کودهای زیستی و رژیم آبیاری در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد بر صفت وزن هزاردانه معنی‌دار بود. داده‌های **جدول ۴** نشان می‌دهد که وزن هزاردانه از کمترین مقدار (۳۴/۸ گرم) در تیمار بدون آبیاری و بدون کود به بیشترین مقدار (۴۳/۵ گرم) در تیمار آبیاری کامل و هر دو کود افزایش یافت. برخی باکتری‌های محرک رشد از جمله *Azospirillum* با تثبیت نیتروژن موجود در جو، قابلیت جذب این عنصر را توسط گیاه بالا برده و باعث افزایش وزن هزار دانه می‌گردند (Dobbelaere et al., 2003). از سوی دیگر، قارچ‌های میکوریزا با بالا بردن مقاومت گیاه در برابر کم‌آبی، به حفظ وزن دانه در شرایط تنش کمک می‌کنند (Gholinezhad & Darvishzadeh, 2015). این در حالی است که در وضعیت خشکی، فرآیند انتقال مواد تولیدشده در فتوسنتز از برگ‌ها به سمت دانه‌ها مختل شده و در نتیجه دانه‌ها به‌خوبی پر نمی‌شوند (Omid Nasab et al., 2024).

عملکرد دانه

طبق نتایج تجزیه واریانس (**جدول ۳**)، اثر اصلی کودهای زیستی، رژیم‌های آبیاری و برهم‌کنش آن‌ها بر صفت عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. براساس داده‌های **جدول ۴**، عملکرد دانه از کمترین مقدار (۲۵۰۱/۷ کیلوگرم در هکتار) در تیمار بدون آبیاری و بدون کود به بیشترین مقدار (۴۸۹۱/۶ کیلوگرم در هکتار) در تیمار آبیاری کامل و هر دو کود رسید. عملکرد دانه به‌عنوان ماحصل و نتیجه نهایی عملکرد هماهنگ و تأثیر متقابل ده‌ها صفت فیزیولوژیک و مورفولوژیک دیگر است. در تیمار بدون آبیاری و بدون کود، عملکرد پایین به‌طور مستقیم با مقادیر نامطلوب سایر صفات مرتبط است. این تیمار بیشترین تنش اکسیداتیو (که از فعالیت بیشتر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مشخص است) و تخریب بیشتر رنگیزه‌های فتوسنتزی را در بین تیمارها نشان داد و در نتیجه کمترین میزان عملکرد دانه را نیز ثبت کرد. این شرایط برای تیمار آبیاری کامل و هر دو کود کاملاً برعکس است. کودهای زیستی در این راه با تقویت سیستم دفاعی گیاه و کمک به حفظ هموستازی درونی و پایداری گیاه تحت تنش، بستری فراهم کردند تا پتانسیل ژنتیکی گیاه برای تولید دانه به حداکثر برسد (Nemati et al., 2021). قارچ‌های میکوریزا با شبکه‌های هیفی گسترده خود، ابرراه‌های انتقال مواد را در خاک ایجاد می‌کنند که نه‌تنها آب و مواد معدنی، بلکه سیگنال‌های شیمیایی بین گیاهان را نیز جابه‌جا می‌کنند (Roger et al., 2013). از سوی دیگر، باکتری‌های محرک رشد با تولید سیدروفور و تنظیم هورمونی، بازار مواد غذایی را در ریزوسفر رونق می‌بخشند (Saha et al., 2016). وقتی این دو با هم ترکیب می‌شوند، یک بوم‌نظام میکروبی هم‌افزا شکل می‌گیرد که در آن راندمان تبدیل نهاده‌ها به خروجی به‌طور تصاعدی افزایش می‌یابد (Zhang et al., 2018).

مقدار هر یک از این رنگدانه‌ها محاسبه شد (Lichtenthaler & Wellburn, 1983).

به‌منظور تجزیه و تحلیل، داده‌ها ابتدا تست نرمال شدند. سپس داده‌های غیرنرمال با استفاده از روش لگاریتمی تغییر داده‌ها نرمال‌سازی گردید. جهت تجزیه واریانس داده‌ها از نرم افزارهای SAS نسخه ۹/۴ و SPSS نسخه ۲۴ استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) و در سطح احتمال پنج درصد انجام گردید.

نتایج و بحث

تعداد دانه در سنبله

طبق **جدول ۳**، تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی کودهای زیستی و رژیم آبیاری در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد بر صفت تعداد دانه در سنبله معنی‌دار بود. داده‌های **جدول ۴** نشان می‌دهد که تعداد دانه در سنبله از کمترین مقدار (۲۲/۳ دانه) در تیمار بدون آبیاری و بدون کود به بیشترین مقدار (۳۶/۷ دانه) در تیمار آبیاری کامل و مصرف هر دو کود افزایش یافت. این الگوی تغییرات را می‌توان با تأثیر این عوامل بر مراحل حساس نمو گیاه توجیه کرد. تعداد دانه در سنبله عمدتاً در مرحله گرده‌افشانی و تشکیل دانه تعیین می‌شود که از حساس‌ترین دوره‌ها به تنش خشکی محسوب می‌شود. تنش خشکی در این مرحله می‌تواند منجر به نابرابری گرده، کاهش رشد لوله گرده و اختلال در تلقیح شود که همگی به کاهش مستقیم تعداد دانه منجر می‌گردند (Saini & Westgate, 2000). کاهش شدید این صفت در تیمار شاهد خشکی، به‌طور آشکار نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالای این مرحله از رشد در برابر کم‌آبی است. در مقابل، در شرایط بهینه (آبیاری کامل و کود زیستی)، گیاه در حالت رفاه قرار دارد. دسترسی به آب و مواد غذایی کافی که توسط کودهای زیستی به‌طور پیوسته و کارآمد تأمین می‌شود، به گیاه این اطمینان و منابع مازاد را می‌دهد که می‌تواند به‌طور حداکثری روی تولیدمثل سرمایه‌گذاری کند (Igihon & Babalola, 2018). در این حالت، گیاه نه‌تنها برای پر کردن دانه‌های بیشتر توانایی دارد، بلکه از نظر فیزیولوژیک انگیزه و پیام لازم برای انجام این کار را دریافت می‌کند. قارچ‌های میکوریزا و باکتری‌ها با بهبود سلامت کلی و وضعیت تغذیه‌ای گیاه، در واقع بوجه‌بندی گیاه را بهبود می‌بخشند و منابع کافی را برای سرمایه‌گذاری روی فرآیند پرهزینه تولید دانه‌های بیشتر فراهم می‌کنند (Bitterlich et al., 2018).

وزن هزاردانه

طبق **جدول ۳**، تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی

درصد کلونیزاسیون ریشه

با توجه به **جدول ۳**، تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرهای اصلی کودهای زیستی و رژیم آبیاری و همچنین برهم‌کنش آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر صفت درصد کلونیزاسیون ریشه معنی‌دار بود. طبق **جدول ۴**، مقایسه میانگین اثر متقابل کودهای زیستی و رژیم آبیاری نشان داد که بیشترین میزان کلونیزاسیون ریشه مربوط به اثر متقابل آبیاری کامل و کاربرد توأم هر کود قارچ و باکتری‌های محرک رشد به‌میزان ۷۹/۶ درصد بود. همچنین کم‌ترین میزان ثبت‌شده نیز مربوط به اثر متقابل سطح شاهد کودی و سیستم بدون آبیاری به‌میزان ۱۷/۵ درصد بود. در شرایط تنش خشکی، گیاه میزان کربوهیدرات‌ها (به‌شکل قند) کمتری را به ریشه خود منتقل می‌کند. از آنجاکه این ترشحات، ماده غذایی اصلی برای قارچ‌ها به شمار می‌روند، کاهش آن‌ها، انگیزه و ظرفیت قارچ برای استقرار و کلونیزه کردن ریشه را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، خشکی به لحاظ فیزیکی، رشد و توسعه ریشه و همچنین گسترش هیف قارچ را با کُندی مواجه می‌سازد (Mathur et al., 2018). کودهای زیستی مؤثر (مانند قارچ‌های میکوریز یا باکتری‌های سودمند) به‌طور مستقیم با فراهم آوردن منبع اولیه تلقیح، به‌طور چشمگیری موجب افزایش کلونیزاسیون ریشه می‌شوند. همچنین این کودها می‌توانند با بهبود وضعیت تغذیه و تأمین آب در دسترس ریشه، محیط بهینه‌تری را برای فعالیت و رشد قارچ‌ها فراهم کنند (Begum et al., 2019). باکتری‌های محرک رشد نیز می‌توانند نقش کمک‌کننده به هم‌زیستی میکوریزایی ایفا نمایند (Battini et al., 2017). این باکتری‌ها با ترشح هورمون‌های خاص یا ایجاد تغییر در ترکیب ترشحات ریشه، بستری مناسب برای جوانه‌زنی اسپور قارچ و نفوذ مؤثر هیف به درون بافت ریشه ایجاد می‌کنند که این امر، توجیه‌کننده اثر سینرژیستیک و متقابل مثبت آن‌ها است. قارچ‌های میکوریز با توسعه شبکه‌های گسترده هیفی در خاک، دسترسی ریشه به آب و مواد مغذی را حتی در مناطق دور از دسترس خاک افزایش می‌دهند که این مزیت به‌ویژه در شرایط محدودیت آبی بسیار حائز اهمیت است (Smith & Smith, 2011). علاوه بر این، کودهای زیستی ممکن است با القای تولید برخی پیام‌های مولکولی در ریشه (مانند پیام‌های مربوط به اکسین، ژبیرلین و اتیلن)، زمینه را برای پذیرش و استقرار بهتر قارچ فراهم ساخته و فرآیند هم‌زیستی را تسهیل نمایند (Gutjahr & Parniske, 2013).

رنگیزه‌های فتوسنتزی

براساس نتایج تجزیه واریانس **جدول ۳**، اثر اصلی کودهای زیستی، رژیم آبیاری و اثر متقابل آن‌ها بر تمامی صفات رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید) در سطح احتمال یک

درصد معنی‌دار بود. طبق جدول مقایسه میانگین (**جدول ۵**)، بیشترین مقدار این رنگیزه‌ها در تیمار ترکیبی آبیاری کامل × مصرف هر دو کود زیستی (با مقادیر ۲/۵۵، ۰/۸۵ و ۰/۲۰۴ میلی گرم بر گرم به‌ترتیب برای کلروفیل a، b و کاروتنوئید) مشاهده شد، درحالی‌که کمترین مقدار مربوط به تیمار بدون آبیاری × عدم مصرف کود بود. خشکی باعث تخریب ساختار کلروپلاست‌ها، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و فعال شدن آنزیم‌های تجزیه‌کننده کلروفیل مانند کلروفیلاز می‌شود (Hosseini & Heidari, 2025). در چنین شرایطی، کاروتنوئیدها نیز که نقش محافظتی در برابر پرتوهای مضر و جلوگیری از پراکسیداسیون دارند، تحت تأثیر قرار می‌گیرند (Hasanuzzaman et al., 2020). کاربرد کودهای زیستی (قارچ میکوریزا و باکتری) به‌طور معنی‌داری از تخریب رنگیزه‌ها جلوگیری می‌کنند. این موجودات با ایجاد رابطه هم‌زیستی با ریشه گیاه، سطح جذب آب و عناصر غذایی به‌ویژه فسفر را که برای سنتز مولکول‌های کلروفیل و ساختار فتوسنتزی ضروری است، افزایش می‌دهند (Rouphael & Colla, 2020). این نتایج با داده‌های مربوط به فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در این پژوهش هم‌خوانی کامل دارد. در تیمار بدون آبیاری × عدم مصرف کود، که کمترین میزان رنگیزه را شاهد بودیم، فعالیت این آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در بالاترین سطح خود بود. این موضوع نشان می‌دهد که گیاه تحت تنش اکسیداتیو شدیدی قرار داشته و سعی در مقابله با رادیکال‌های آزاد تولیدشده داشته است. تولید این رادیکال‌ها به‌طور مستقیم به مولکول‌های کلروفیل آسیب می‌زند. در مقابل، در تیمار آبیاری کامل × هر دو کود، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به کمترین حد خود رسید که نشان از شرایط فیزیولوژیک مطلوب و عدم تنش اکسیداتیو شدید دارد. این محیط آرام، امکان حفظ و انباشت بیشتر رنگیزه‌های فتوسنتزی را فراهم کرده است. کاربرد کودهای زیستی با حفظ یکپارچگی غشاهای سلولی سبب پایداری ساختار و عملکرد دستگاه فتوسنتزی شده و از تخریب رنگیزه‌ها جلوگیری می‌کند (Fayazi et al., 2018). بنابراین کودهای زیستی به‌ویژه کاربرد هم‌زمان هر دو نوع کود زیستی، در تمامی سطوح آبیاری موجب بهبود شرایط رنگیزه‌های فتوسنتزی شده و از این طریق باعث افزایش مقاومت گیاه شده‌اند.

فعالیت آنزیم کاتالاز

نتایج تجزیه واریانس **جدول ۳** نشان داد که اثر اصلی کودهای زیستی و رژیم آبیاری و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر فعالیت آنزیم کاتالاز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. براساس مقایسه میانگین‌ها در **جدول ۵**، بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز (۳۲/۵ واحد بر میلی گرم) در تیمار شاهد (بدون آبیاری و بدون مصرف کود زیستی) مشاهده شد. همچنین کمترین فعالیت این آنزیم (۲۲/۳ واحد بر میلی گرم) مربوط به تیمار آبیاری کامل همراه با کاربرد توأم هر دو

عامل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. این نتایج حاکی از آن است که تغییرات سطوح مختلف آبیاری و کاربرد انواع کودهای زیستی به‌طور مستقل و نیز در کنش با یکدیگر، تأثیر معنی‌داری بر فعالیت این آنزیم آنتی‌اکسیدانی داشته‌اند. براساس مقایسه میانگین اثرات متقابل، بیشترین میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز (۴/۸۸ واحد بر میلی‌گرم) در تیمار بدون آبیاری و عدم مصرف کود زیستی مشاهده شد. در مقابل، کمترین فعالیت این آنزیم (۳/۰۸ واحد بر میلی‌گرم) مربوط به تیمار آبیاری کامل به همراه کاربرد توأم قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد بود. در شرایط تنش خشکی شدید (تیمار شاهد)، کاهش پتانسیل آب گیاه و بسته شدن روزنه‌ها منجر به کاهش ظرفیت فتوسنتزی و در نتیجه تجمع الکترون‌های اضافی در زنجیره انتقال الکترون کلروپلاست می‌شود. این امر باعث افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن مانند یون سوپراکسید و پراکسید هیدروژن در سلول‌های گیاهی می‌گردد (Choudhury et al., 2017).

کود زیستی بود. افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط تنش خشکی و عدم استفاده از کودهای زیستی را می‌توان پاسخ فیزیولوژیک گیاه به تنش اکسیداتیو ناشی از خشکی دانست (Sofa et al., 2015). تحت این شرایط، تولید گونه‌های فعال اکسیژن افزایش می‌یابد و گیاه برای محافظت از سلول‌ها، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز را افزایش می‌دهد (Nasrollahzade Asl et al., 2017). در مقابل، کاربرد کودهای زیستی به‌ویژه ترکیب قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد، با بهبود وضعیت آبی و تغذیه‌ای گیاه و کاهش تولید رادیکال‌های آزاد موجب کاهش نیاز به فعالیت بالای آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شده و در نتیجه گیاه در وضعیت فیزیولوژیک متعادل‌تری قرار می‌گیرد (Chandra et al., 2018).

فعالیت آنزیم پراکسیداز

نتایج تجزیه واریانس واریانس جدول ۳ برای فعالیت آنزیم پراکسیداز نشان داد که اثر اصلی کودهای زیستی، رژیم آبیاری و اثر متقابل این دو

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات بررسی شده در پژوهش

Table 3- Analysis of variance of the traits studied in the research

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares									
		کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کاروتنوئید Carotenoids	درصد کلونی‌زاسیون ریشه Root colonization percentage	تعداد دانه در سنبه Grains per spike	وزن هزار دانه Thousand seed weight	عملکرد دانه Seed yield	پراکسیداز POX	کاتالاز CAT	سوپر اکسید دیسکوتاز SOD
تکرار Repetition	2	0.045	0.012	0.003	8.45	1.25	0.85	4256.3	0.008	0.35	0.28
کودهای زیستی Biofertilizer (a)	3	1.84**	0.58**	0.15**	1245.8**	85.41**	15.62**	358742.6**	1.92**	92.4**	71.83**
رژیم آبیاری Irrigation regime (b)	2	3.21**	1.02**	0.27**	287.3**	120.3**	22.14**	512389.2**	3.84**	184.2**	143.1**
a × b	6	0.29**	0.093**	0.025**	63.21**	25.64*	6.98*	102543.7*	0.35**	17.02**	13.22**
خطای آزمایش Error	22	0.038	0.012	0.002	15.08	6.21	2.34	18542.7	0.009	0.43	0.34
ضریب تغییرات CV (%)	-	6.8	7.1	6.9	8.9	7.7	6.0	6.2	6.9	7.1	7.2

ns: عدم معنی‌داری، * و **: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

ns: non-significant, * and **: significant at five and one percent probability levels, respectively

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرهای متقابل کودهای زیستی و رژیم‌های آبیاری بر صفات عملکردی و مورفوفیزیولوژیکی گندم
Table 4- Comparison of the means of interaction effects between bio-fertilizers and irrigation regimes on yield and morpho-physiological traits of wheat

تیمارهای آزمایشی Experimental treatments	درصد کلونیزاسیون ریشه Root colonization (%)	تعداد دانه در سنبله Grains per spike (no/plant)	وزن هزار دانه Thousand seed weight (g)	عملکرد دانه Seed yield (kg ha ⁻¹)
بدون آبیاری × بدون کود No irrigation × no fertilizer	17.5 e*	22.3 h	34.8 g	2501.7 h
بدون آبیاری × قارچ میکوریزا No irrigation × mycorrhizal fungi	48.3 c	24.8 g	36.5 f	2850.3 g
بدون آبیاری × باکتری No irrigation × bacteria	23.6 de	26.1 fg	37.2 ef	2981.2 fg
بدون آبیاری × هر دو کود No irrigation × both bio-fertilizers	51.4 c	27.8 f	38.1 cde	3150.4 f
آبیاری ۵۰ درصد × بدون کود 50% irrigation × no fertilizer	20.8 de	27 f	36.9 f	3450.5 e
آبیاری ۵۰ درصد × قارچ میکوریزا 50% irrigation × mycorrhizal fungi	61.2 b	30.2 e	38.7 cde	3765.2 d
آبیاری ۵۰ درصد × باکتری 50% irrigation × bacteria	28.5 d	31.5 de	39.1 cd	3884.7 d
آبیاری ۵۰ درصد × هر دو کود 50% irrigation × both bio-fertilizers	65.1 b	32.8 cd	40.5 bc	4022.9 cd
آبیاری کامل × بدون کود Full irrigation × no fertilizer	25.6 d	30.8 de	39.5 cd	4203.4 c
آبیاری کامل × قارچ میکوریزا Full irrigation × mycorrhizal fungi	66.6 b	34.5 bc	41.3 b	4568.9 b
آبیاری کامل × باکتری Full irrigation × bacteria	25.7 d	35.2 ab	42 ab	4712.3 ab
آبیاری کامل × هر دو کود Full irrigation × both bio-fertilizers	79.6 a	36.7 a	43.5 a	4891.6 a

* میانگین‌های با حروف متفاوت در هر ستون بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌داری می‌باشند

* Means with different letters in each column indicate significant differences at the 5% probability level based on the LSD's test

باکتری‌ها می‌توانند با تولید هورمون‌هایی مانند اکسین و ژیرلین موجب توسعه سیستم ریشه‌ای قوی‌تر و در نتیجه جذب آب و مواد معدنی بیشتر شوند (Kudoyarova et al., 2019).

فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز

نتایج تجزیه واریانس برای فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز نشان داد که اثر اصلی کودهای زیستی، رژیم آبیاری و همچنین اثر متقابل این دو عامل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. این امر حاکی از آن است که مدیریت آبیاری و استفاده از کودهای زیستی، هم به صورت جداگانه و هم در تعامل با یکدیگر، تأثیر عمیقی بر سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه داشته‌اند. براساس مقایسه میانگین‌های اثر متقابل، بیشترین فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز (۲۸/۸ واحد بر میلی گرم) در تیمار بدون آبیاری و عدم مصرف کود زیستی مشاهده شد. در مقابل، کمترین فعالیت این آنزیم (۱۹/۷ واحد بر میلی گرم) به تیمار آبیاری کامل به همراه کاربرد توأم قارچ میکوریزا

پراکسیداز در چرخه آنتی‌اکسیدانی گیاه، نقش محوری در تجزیه پراکسید هیدروژن (H_2O_2) به آب و اکسیژن دارد (Askari, 2025). بنابراین، افزایش معنی‌دار فعالیت این آنزیم در شرایط تنش خشکی، پاسخی سازشی و ضروری برای جلوگیری از آسیب‌های اکسیداتیو به ماکرومولکول‌های سلولی مانند لیپیدها، پروتئین‌ها و DNA است (Laxa et al., 2019). قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار با گسترش شبکه هیفی خود در خاک، به طور مؤثری حجم خاک در دسترس ریشه برای جذب آب را افزایش می‌دهند و از طریق بهبود وضعیت آبی گیاه، به طور غیرمستقیم از تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌کاهند (Begum et al., 2019). علاوه بر این، این قارچ‌ها با بهبود جذب عناصر غذایی کم‌تحرک مانند فسفر و روی که از اجزای کلیدی سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی هستند، به گیاه در مدیریت بهتر تنش اکسیداتیو کمک می‌کنند (Sedaghati et al., 2021). باکتری‌های محرک رشد نیز از طریق سازوکارهای مستقیم و غیرمستقیم در کاهش تنش اکسیداتیو نقش دارند. این

و باکتری‌های محرک رشد تعلق داشت. این الگوی تغییرات را می‌توان با نقش بیوشیمیایی منحصربه‌فرد این آنزیم تفسیر کرد. سوپر اکسید دیسموتاز، نخستین خط دفاعی در برابر گونه‌های فعال اکسیژن محسوب می‌شود و وظیفه دارد یون سوپراکسید که از اولین رادیکال‌های آزاد تولیدشده در طی تنش‌هایی مانند خشکی است را به پراکسید هیدروژن و اکسیژن تبدیل کند (Alscher et al., 2002). در شرایط تنش خشکی شدید، اختلال در زنجیره انتقال الکترون کلروپلاست‌ها و میتوکندری منجر به تولید انبوه یون سوپراکسید می‌شود. در پاسخ به این هجوم، گیاه فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز را به‌شدت افزایش می‌دهد تا از تجمع این رادیکال خطرناک جلوگیری کرده و از بروز آسیب‌های بعدی به غشاها و ساختارهای سلولی ممانعت به عمل آورد (Gill & Tuteja, 2010). بنابراین، سطح بسیار بالای این آنزیم در تیمار شاهد خشکی، نشان‌دهنده اوج‌گیری تنش اکسیداتیو در سلول‌های گیاه است. کاهش پلکانی و معنی‌دار فعالیت این آنزیم با بهبود شرایط آبیاری و به‌ویژه با کاربرد

کودهای زیستی، از کاهش تولید اولیه رادیکال سوپراکسید در این تیمارها حکایت دارد. قارچ‌های میکوریزا با بهبود وضعیت آبی گیاه از طریق شبکه هیفی گسترده و همچنین با افزایش جذب عناصری مانند مس و روی که از کوفاکتورهای ضروری برای سوپر اکسید دیسموتاز هستند، هم‌نیاز به تولید آنزیم را کاهش می‌دهند و هم کارایی سیستم دفاعی موجود را افزایش می‌دهند (Chandrasekaran et al., 2019). از سوی دیگر، باکتری‌های محرک رشد نه‌تنها با بهبود وضعیت ریشه، بلکه از طریق القای مقاومت سیستمیک در گیاه باعث می‌شوند گیاه قبل از مواجهه با تنش، تا حدی خود را برای مقابله آماده کند و در نتیجه، هنگام بروز تنش، تولید گونه‌های فعال اکسیژن با شدت کمتری صورت گیرد (Ma et al., 2020). همچنین برخی از گونه‌های *Pseudomonas* قادر به تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز به‌طور مستقیم در محیط ریزوسفر هستند که به کاهش بار اکسیداتیو کل گیاه کمک می‌کند (Kang et al., 2014).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرهای متقابل کودهای زیستی و رژیم‌های آبیاری بر صفات عملکردی و مورفوفیزیولوژیکی گندم

Table 5- Comparison of the means of interaction effects between bio-fertilizers and irrigation regimes on yield and morpho-physiological traits of wheat

تیمارهای آزمایشی Experimental treatments	پراکسیداز POX ($\mu\text{g mg}^{-1}$)	کاتالاز CAT ($\mu\text{g mg}^{-1}$)	سوپر اکسید دیسموتاز SOD ($\mu\text{g mg}^{-1}$)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg g^{-1})	کلروفیل b Chlorophyll b (mg g^{-1})	کاروتنوئید Carotenoids (mg g^{-1})
بدون آبیاری × بدون کود No irrigation × no fertilizer	4.88 a*	32.5 a	28.8 a	1.21 g	0.38 g	0.102 g
بدون آبیاری × قارچ میکوریزا No irrigation × mycorrhizal fungi	4.12 de	28.7 d	25.4 de	1.58 ef	0.5 ef	0.132 e
بدون آبیاری × باکتری No irrigation × bacteria	4.27 cd	30 c	26.3 cd	1.52 f	0.48 f	0.127 ef
بدون آبیاری × هر دو کود No irrigation × both bio-fertilizers	3.66 hi	26.4 f	23.2 g	1.78 cd	0.57 cd	0.15 c
آبیاری ۵۰ درصد × بدون کود 50% irrigation × no fertilizer	4.57 b	31.2 b	27.6 b	1.45 f	0.46 f	0.122 f
آبیاری ۵۰ درصد × قارچ میکوریزا 50% irrigation × mycorrhizal fungi	3.92 efg	27.6 e	24.4 f	1.85 c	0.59 c	0.156 c
آبیاری ۵۰ درصد × باکتری 50% irrigation × bacteria	3.97 ef	28.1 de	24.7 ef	1.82 c	0.58 c	0.153 c
آبیاری ۵۰ درصد × هر دو کود 50% irrigation × both bio-fertilizers	3.47 i	25 g	22 h	2.01 b	0.64 b	0.17 b
آبیاری کامل × بدون کود Full irrigation × no fertilizer	4.38 bc	29.8 c	26.5 c	1.68 de	0.53 de	0.141 d
آبیاری کامل × قارچ میکوریزا Full irrigation × mycorrhizal fungi	3.72 gh	26.1 f	23 g	2.03 b	0.65 b	0.172 b
آبیاری کامل × باکتری Full irrigation × bacteria	3.77 fgh	26.5 f	23.3 g	2 b	0.64 b	0.169 b
آبیاری کامل × هر دو کود Full irrigation × both bio-fertilizers	3.08 j	22.3 h	19.7 i	2.55 a	0.85 a	0.204 a

* میانگین‌های با حروف متفاوت در هر ستون بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌داری می‌باشد

* Means with different letters in each column indicate significant differences at the 5% probability level based on the LSD's test

نتیجه گیری

براساس یافته‌های این پژوهش، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که استفاده هم‌زمان از کودهای زیستی شامل قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد، راهبردی مؤثر و کارآمد برای کاهش پیامدهای منفی تنش خشکی و افزایش عملکرد گندم به شمار می‌رود. این ترکیب بیولوژیک با ایجاد همکاری و هم‌افزایی موجب افزایش چشمگیر کلونیزاسیون ریشه، حفظ و پایداری سامانه فتوسنتزی از طریق افزایش محتوای رنگدانه‌های کلروفیل و کاروتنوئید، و همچنین

کاهش تنش اکسیداتیو با تنظیم فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گردید. این بهبودها در نهایت به افزایش معنی‌دار اجزای عملکرد یعنی تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه و در نتیجه عملکرد نهایی دانه منجر شد. بنابراین، به‌کارگیری این نهادهای زیستی می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار و سازگار با محیط زیست، زمینه را برای کاهش مصرف کودهای شیمیایی، افزایش تاب‌آوری گیاه در برابر کم‌آبی و تضمین امنیت غذایی فراهم نماید.

References

- Adel, S., & Carels, N. (2023). Plant tolerance to drought stress with emphasis on wheat. *Plants*, 12(11), 2170. <https://doi.org/10.3390/plants12112170>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>
- Alscher, R. G., Erturk, N., & Heath, L. S. (2002). Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. *Journal of Experimental Botany*, 53(372), 1331-1341. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.372.1331>
- Askari Foroshani, F., Rahnama, A., Meskarbashe, M., & Kamranfar, I. (2025). Effect of waterlogging duration at different growth stages on some photosynthetic characteristics, antioxidant activity, and yield of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(2), 171-186. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2024.88492.1335>
- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Battini, F., Grønlund, M., Agnolucci, M., Giovannetti, M., & Jakobsen, I. (2017). Facilitation of phosphorus uptake in maize plants by mycorrhizosphere bacteria. *Scientific Reports*, 7(1), 4686. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04959-0>
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., & Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1068. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>
- Bitterlich, M., Sandmann, M., & Graefe, J. (2018). Arbuscular mycorrhiza alleviates restrictions to substrate water flow and delays transpiration limitation to stronger drought in tomato. *Frontiers in Plant Science*, 9, 154. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00154>
- Chandra, D., Srivastava, R., Glick, B. R., & Sharma, A. K. (2018). Drought-tolerant *Pseudomonas* spp. improve the growth performance of finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.) under non-stressed and drought-stressed conditions. *Pedosphere*, 28(2), 227-240. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60013-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60013-X)
- Chandrasekaran, M., Chanratana, M., Kim, K., Seshadri, S., & Sa, T. (2019). Impact of arbuscular mycorrhizal fungi on photosynthesis, water status, and gas exchange of plants under salt stress—a meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 10, 457. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00457>
- Choudhury, F. K., Rivero, R. M., Blumwald, E., & Mittler, R. (2017). Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination. *The Plant Journal*, 90(5), 856-867. <https://doi.org/10.1111/tpj.13299>
- Dobbelaere, S., Vanderleyden, J., & Okon, Y. (2003). Plant growth-promoting effects of diazotrophs in the rhizosphere. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 22(2), 107-149. <https://doi.org/10.1080/713610853>
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185-212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>
- Fayazi, H., Abdali Mashhadi, A., Koochekzadeh, A., Papzan, A., & Arzanesh, M. H. (2018). Effect of organic and biological fertilizers on nitrogen, phosphorous and potassium contents, photosynthetic pigments and active ingredient in coneflower (*Echinacea purpurea* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 16(2), 283-298. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/gsc.v16i2.49182>
- Galindo, F. S., Pagliari, P. H., Fernandes, G. C., Rodrigues, W. L., Boleta, E. H. M., Jalal, A., & Teixeira Filho, M. C. M. (2022). Improving sustainable field-grown wheat production with *Azospirillum brasilense* under

- tropical conditions: A potential tool for improving nitrogen management. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 821628. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.821628>
16. Gholinezhad, E., & Darvishzadeh, R. (2015). Effect of mycorrhizal fungi on yield and yield components of sesame (*Sesamum indicum* L.) landraces under different irrigation levels. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 25(3), 119–135. (In Persian).
17. Giannopolitis, C. N., & Ries, S. K. (1977). Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, 59(2), 309–314. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>
18. Gill, S. S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(12), 909–930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
19. Gutjahr, C., & Parniske, M. (2013). Cell and developmental biology of arbuscular mycorrhiza symbiosis. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 29, 593–617. <https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-101512-122413>
20. Hadwan, M. H., & Abed, H. N. (2018). Simple spectrophotometric assay for measuring catalase activity in biological tissues. *BMC Biochemistry*, 19, 7. <https://doi.org/10.1186/s12858-018-0097-5>
21. Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Zulfikar, F., Raza, A., Mohsin, S. M., Mahmud, J. A., Fujita, M., & Fotopoulos, V. (2020). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, 9(8), 681. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>
22. Hosseini, R., & Heidari, M. (2025). Impact of drought stress on biochemical and molecular responses in lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.): Effects on essential oil composition and antibacterial activity. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1506660. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1506660>
23. Igiehon, N. O., & Babalola, O. O. (2018). Rhizosphere microbiome modulators: contributions of nitrogen fixing bacteria towards sustainable agriculture. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(4), 574. <https://doi.org/10.3390/ijerph15040574>
24. Jamil, M., Ahamd, M., Anwar, F., Zahir, Z. A., Kharal, M. A., & Nazli, F. (2018). Inducing drought tolerance in wheat through combined use of l-tryptophan and *Pseudomonas fluorescens*. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 55(2). <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/18.4980>
25. Kang, S. M., Khan, A. L., Waqas, M., You, Y. H., Kim, J. H., Kim, J. G., Hamayun, M., & Lee, I. J. (2014). Plant growth-promoting rhizobacteria reduce adverse effects of salinity and osmotic stress by regulating phytohormones and antioxidants in *Cucumis sativus*. *Journal of Plant Interactions*, 9(1), 673–682. <https://doi.org/10.1080/17429145.2014.894587>
26. Karimi, E., Mohammadi, S., & Esfandyari, E. (2022). The effect of biofilm forming growth promoting bacterium and tryptophan on root characteristics of rye and their relationship with root cadmium accumulation. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 32(2), 253–268. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/saps.2021.45695.2671>
27. Khodadadi, R., & Ghorbani Nasrabadi, R. (2020). Mechanisms of plant growth promoting rhizobacteria on growth indices, physiology, nutrient uptake and production of secondary metabolites in medicinal plants. *Technology of Medicinal and Aromatic Plants of Iran*, 2(2), 52–69. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/mpt.2020.127462.1047>
28. Kuan, K. B., Othman, R., Abdul Rahim, K., & Shamsuddin, Z. H. (2016). Plant growth-promoting rhizobacteria inoculation to enhance vegetative growth, nitrogen fixation and nitrogen remobilisation of maize under greenhouse conditions. *Plos One*, 11(3), e0152478. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152478>
29. Kudoyarova, G., Arkhipova, T., Korshunova, T., Bakaeva, M., Loginov, O., & Dodd, I. C. (2019). Phytohormone mediation of interactions between plants and non-symbiotic growth promoting bacteria under edaphic stresses. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1368. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01368>
30. Laxa, M., Liebthal, M., Telman, W., Chibani, K., & Dietz, K. J. (2019). The role of the plant antioxidant system in drought tolerance. *Antioxidants*, 8(4), 94. <https://doi.org/10.3390/antiox8040094>
31. Lehmann, A., Zheng, W., Ryo, M., Soutschek, K., Roy, J., Rongstock, R., & Rillig, M. C. (2020). Fungal traits important for soil aggregation. *Frontiers in Microbiology*, 10, 2904. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02904>
32. Lichtenthaler, H. K., & Wellburn, A. R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11(5), 591–592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>
33. Ma, Y., Dias, M. C., & Freitas, H. (2020). Drought and salinity stress responses and microbe-induced tolerance in plants. *Frontiers in Plant Science*, 11, 591911. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.591911>
34. Mathur, S., Sharma, M. P., & Jajoo, A. (2018). Improved photosynthetic efficacy of maize (*Zea mays*) plants with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under high temperature stress. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 180, 149–154. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.02.002>
35. Naseri, R., Mirzaei, A., & Abbasi, A. (2021). Effect of application of different fertilizer sources on physiological and biochemical traits of new cultivars of barley under dryland conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 19(2), 121–140. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2021.37177.0>

36. Nasrollahzade Asl, V., Moharramnejad, S., & Yusefi, M. (2017). Grain yield, chlorophyll content, osmolyte accumulation, total phenolics and catalase activity in maize (*Zea mays* L.) under drought stress. *Journal of Plant Environmental Physiology*, 12(46), 1-14. (In Persian).
37. Nemati, A., Alilou, A., & Sedghi, M. (2021). Evaluation of yield and yield components of some rapeseed cultivars with endophyte *P. indica* and *A. siccitolerans* under drought stress. *Journal of Crop Production*, 13(4), 87-110. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/ejcp.2021.18408.2364>
38. Omid Nasab, D., Meskarbashee, M., & Rahnama Ghahfarokhi, A. (2024). The effect of deficit irrigation on grain yield and some physiological indicators of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 22(1), 71-88. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2023.83198.1258>
39. Roger, A., Colard, A., Angelard, C., & Sanders, I. R. (2013). Relatedness among arbuscular mycorrhizal fungi drives plant growth and intraspecific fungal coexistence. *The ISME Journal*, 7(11), 2137-2147. <https://doi.org/10.1038/ismej.2013.112>
40. Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Toward a sustainable agriculture through plant biostimulants: From experimental data to practical applications. *Agronomy*, 10(10), 1461. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101461>
41. Ruiz-Lozano, J. M., Aroca, R., Zamarreño, A. M., Molina, S., Andreo-Jiménez, B., Porcel, R., & López-Ráez, J. A. (2016). Arbuscular mycorrhizal symbiosis induces strigolactone biosynthesis under drought and improves drought tolerance in lettuce and tomato. *Plant, Cell & Environment*, 39(2), 441-452. <https://doi.org/10.1111/pce.12631>
42. Saha, M., Sarkar, S., Sarkar, B., Sharma, B. K., Bhattacharjee, S., & Tribedi, P. (2016). Microbial siderophores and their potential applications: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(5), 3984-3999. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4294-0>
43. Saini, H. S., & Westgate, M. E. (2000). Reproductive development in grain crops during drought. *Advances in Agronomy*, 68, 59-96. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60843-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60843-3)
44. Sedaghati, E., Ahmadzadeh, M., Sabri-Rise, R., Rahimi, A., Hatami, N., & Mohammadi Mirik, A. (2021). The effect of application of arbuscular mycorrhizal fungi with some microorganisms and chemical compounds on the antioxidant enzymes activity and phenolic compounds of corn under drought stress. *Journal of Plant Biological Sciences*, 13(2), 53-76. (In Persian). <https://doi.org/10.22108/ijpb.2022.129942.1258>
45. Singh, S., Tripathi, D. K., Singh, S., Sharma, S., Dubey, N. K., Chauhan, D. K., & Vaculík, M. (2017). Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: A review. *Environmental and Experimental Botany*, 137, 177-193. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.01.005>
46. Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis* (3rd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6>
47. Smith, S. E., & Smith, F. A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: New paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annual Review of Plant Biology*, 62, 227-250. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103846>
48. Sofo, A., Scopa, A., Nuzzaci, M., & Vitti, A. (2015). Ascorbate peroxidase and catalase activities and their genetic regulation in plants subjected to drought and salinity stresses. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(6), 13561-13578. <https://doi.org/10.3390/ijms160613561>
49. Trouvelot, S., Bonneau, L., Redecker, D., Van Tuinen, D., Adrian, M., & Wipf, D. (2015). Arbuscular mycorrhiza symbiosis in viticulture: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4), 1449-1467. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0329-7>
50. Vurukonda, S. S. K. P., Vardharajula, S., Shrivastava, M., & SkZ, A. (2016). Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, 184, 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.12.003>
51. Zhang, H., Xie, X., Kim, M. S., Korniyev, D. A., Holaday, S., & Paré, P. W. (2019). Effects of mycorrhizal fungi and PGPR on drought tolerance of wheat. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38(2), 558-571.
52. Zhang, L., Feng, G., & Declerck, S. (2018). Signal beyond nutrient, fructose, exuded by an arbuscular mycorrhizal fungus triggers phytate mineralization by a phosphate solubilizing bacterium. *The ISME Journal*, 12(10), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0171-4>