آماده انتشار

تأثیر قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد بر عملکرد، کارایی مصرف آب و شاخص‌های بیوشیمیایی مربوط به تنش در گندم تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

آیدین توبه[1*]، احمد توبه[2]

[1*] نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، گروه ژنتیک و تولیدات گیاهی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: Aydintobeh11@gmail.com

[2] استاد گروه ژنتیک و تولیدات گیاهی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: ahmadtobeh1340@gmail.com

چکیده

سابقه و هدف: گندم نان (*Triticum aestivum L.*) به‌عنوان یکی از حیاتی‌ترین غلات جهان، نقش تعیین‌کننده‌ای در تأمین امنیت غذایی دارد، اما تولید آن با چالش‌های جدی از جمله تنش خشکی روبه‌رو است. خشکی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل محدودکننده، موجب کاهش عملکرد و نارسایی در فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه می‌شود. در این راستا، استفاده از کودهای زیستی مانند قارچ‌های میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد ریزوسفری (PGPR) به عنوان راهکاری پایدار برای افزایش تاب‌آوری گیاهان در برابر تنش‌ها و بهبود بهره‌وری مصرف آب مطرح شده‌اند. این میکروارگانیسم‌ها از راه سازوکارهای گوناگون هم‌چون تسهیل جذب آب و مواد مغذی، تولید هورمون‌های رشد و القای مقاومت در برابر تنش‌ها، به بهبود رشد و عملکرد گیاه کمک می‌کنند. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر جداگانه و توأم قارچ میکوریزا (*Rhizophagus intraradices*) و باکتری‌های محرک رشد (*Pseudomonas fluorescens* و *Azospirillum brasilense*) بر فرآیندهای فیزیولوژیکی، مقاومت بیوشیمیایی و عملکرد گندم تحت سطوح مختلف آبیاری بود.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ در مزرعه تحقیقاتی جهاد کشاورزی منطقه ارشق (مشگین‌شهر، استان اردبیل) به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. عامل‌های آزمایش شامل کود زیستی در چهار سطح (شاهد، قارچ میکوریزا، باکتری‌های محرک رشد و ترکیب هر دو) و رژیم آبیاری در سه سطح (بدون آبیاری، آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی و آبیاری کامل) بود. بذرهای گندم با روش پوشش‌دهی با سوسپانسیون باکتریایی (غلظت 10^8 CFU/ml) و مایه تلقیح قارچی (حاوی ۱۰۰ اسپور زنده در گرم) تلقیح شدند. صفات مختلفی از جمله درصد کلونیزاسیون ریشه، نشت الکترولیت، محتوای مالون‌دی‌آلدئید(MDA) ، قندهای محلول کل، شاخص سطح برگ (LAI)، وزن خشک ریشه، تعداد دانه در سنبله، وزن هزاردانه، عملکرد دانه، شاخص گلوتن و کارایی مصرف آب (WUE)اندازه‌گیری شدند.

یافته‌ها: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی کودهای زیستی، رژیم آبیاری و برهمکنش آن‌ها بر کلیه صفات اندازه‌گیری شده معنی‌دار بود. بیشترین درصد کلونیزاسیون ریشه (۷۹/۶ درصد)، عملکرد دانه (۴۸۹۱/۶ کیلوگرم در هکتار)، شاخص سطح برگ (۶/۰۸)، تعداد دانه در سنبله (۳۶/۷)، وزن هزاردانه (۴۳/۵ گرم) و شاخص گلوتن (۴۵/۷۲ درصد) در تیمار ترکیب هر دو کود زیستی تحت آبیاری کامل مشاهده شد. در مقابل، بیشترین مقادیر نشت الکترولیت (۴۲/۵۳ درصد)، مالون‌دی‌آلدئید (۲۷/۷۳ نانومول بر گرم) و قندهای محلول کل (۱۸/۳۷ میلی‌گرم بر گرم) در تیمار شاهد (بدون کود و بدون آبیاری) ثبت شد. کارایی مصرف آب در شرایط آبیاری ۵۰ درصد (۱/۳۸ تا ۱,۶۱ کیلوگرم بر مترمکعب) به طور معنی‌داری بیشتر از آبیاری کامل (۰/۸۴ تا ۰/۹۸ کیلوگرم بر مترمکعب) بود و در هر دو شرایط، تیمارهای کود زیستی به ویژه ترکیب هر دو کود، این شاخص را بهبود بخشیدند. بیشترین وزن خشک ریشه (۵/۵۱ گرم) در تیمار ترکیب هر دو کود تحت آبیاری ۵۰ درصد مشاهده شد که نشان از توسعه سامانه ریشه برای دسترسی بهتر به منابع آبی محدود دارد.

نتیجه‌گیری کلی: کاربرد هم‌زمان قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد به عنوان موثرترین ترکیب تیماری، با بهبود هماهنگ صفات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکردی گندم، تاب‌آوری گیاه را در برابر تنش خشکی افزایش داد. این کودهای زیستی از طریق سازوکارهای هم‌افزایی مانند افزایش کلونیزاسیون ریشه، کاهش آسیب‌های اکسیداتیو، توسعه سامانه ریشه و سطح برگ، و بهبود جذب آب، زمینه را برای دستیابی به حداکثر توان عملکرد گندم حتی در شرایط محدودیت آبی فراهم کردند. بنابراین، استفاده از این کودهای زیستی می‌تواند به عنوان یک راهبرد مؤثر و پایدار در مدیریت کشت گندم جهت کاهش اثرات منفی تنش خشکی و افزایش عملکرد و کارایی مصرف آب توصیه شود.

کلمات کلیدی: شاخص سطح برگ، شاخص گلوتن، کارایی مصرف آب، قندهای محلول کل، نشت الکترولیت

The effect of mycorrhizal fungi and growth-promoting bacteria on yield, water use efficiency, and biochemical stress-related indices of wheat under different irrigation regimes

Aydin Tobeh[1*], Ahmad Tobeh[2]

[*1] Corresponding Author, PhD student, Dept. of Genetics and Plant Breeding, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil. Iran. E-mail: Aydintobeh11@gmail.com

[2] Professor, Dept. of Genetics and Plant Breeding, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil. Iran. E-mail: ahmadtobeh1340@gmail.com

Abstract

Background and Objectives: Bread wheat (Triticum aestivum L.), as one of the world's most vital cereals, plays a decisive role in ensuring food security. However, its production faces serious challenges, including drought stress. Drought, as one of the primary limiting factors, causes reduced yield and disruption of physiological processes in plants. In this regard, the use of bio-fertilizers such as mycorrhizal fungi and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) has been proposed as a sustainable strategy to enhance plant resilience against stresses and improve water use efficiency. These microorganisms contribute to improved plant growth and performance through various mechanisms, including facilitating water and nutrient uptake, producing growth hormones, and inducing stress resistance. The objective of this research was to investigate the individual and combined effects of mycorrhizal fungus (*Rhizophagus intraradices*) and plant growth-promoting bacteria (*Pseudomonas fluorescens* and *Azospirillum brasilense*) on physiological processes, biochemical resistance, and yield of wheat under different irrigation levels.

Materials and Methods: This research was conducted during the 2021-2022 agricultural year at the Jahad Keshavarzi research farm in the Arshaq region (Meshginshahr, Ardabil province) as a factorial experiment based on a randomized complete block design with three replications. Experimental treatments included four levels of bio-fertilizer (control, mycorrhizal fungus, plant growth-promoting bacteria, and combination of both) and three levels of irrigation regime (no irrigation, irrigation at 50% of water requirement, and full irrigation), totaling 12 treatments. Wheat seeds were inoculated using the coating method with a bacterial suspension (concentration of 10^8 CFU/ml) and fungal inoculant (containing 100 live spores per gram). Various traits were measured, including root colonization percentage, electrolyte leakage, malondialdehyde (MDA) content, total soluble sugars, leaf area index (LAI), root dry weight, number of grains per spike, 1000-grain weight, grain yield, gluten index, and water use efficiency (WUE).

Findings: Results of variance analysis showed that the main effects of bio-fertilizers, irrigation regime, and their interaction were significant on all measured traits. The highest root colonization percentage (79.6%), grain yield (4891.6 kg/ha), leaf area index (6.08), number of grains per spike (36.7), 1000-grain weight (43.5 g), and gluten index (45.72%) were observed in the combined bio-fertilizer treatment under full irrigation. In contrast, the highest values of electrolyte leakage (42.53%), malondialdehyde (27.73 nmol/g), and total soluble sugars (18.37 mg/g) were recorded in the control treatment (no fertilizer and no irrigation). Water use efficiency under 50% irrigation (1.38 to 1.61 kg/m³) was significantly higher than under full irrigation (0.84 to 0.98 kg/m³), and under both conditions, bio-fertilizer treatments, especially the combined treatment, improved this index. The highest root dry weight (5.51 g) was observed in the combined bio-fertilizer treatment under 50% irrigation, indicating root system development for better access to limited water resources.

Conclusion: The combined application of mycorrhizal fungus and plant growth-promoting bacteria was the most effective treatment, increasing plant resilience against drought stress by coordinately improving physiological, biochemical, and performance traits of wheat. These bio-fertilizers, through synergistic mechanisms such as increased root colonization, reduced oxidative damage, development of root system and leaf area, and improved water uptake, provided the basis for realizing wheat yield potential even under water-limited conditions. Therefore, the use of these bio-fertilizers can be recommended as an effective and sustainable strategy in wheat cultivation management to reduce the negative effects of drought stress and increase yield and water use efficiency.

Keywords: Electrolyte Leakage, Gluten Index, Leaf Area Index, Total Soluble Sugars, Water Use Efficiency

مقدمه

گندم نان (*Triticum aestivum L.*) یکی از حیاتی‌ترین غلات جهان است که سهمی تعیین‌کننده در تأمین امنیت غذایی و تغذیه جمعیت در حال رشد جهان دارد. مطابق آمار سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (۱)، این گیاه بیش از ۲۰ درصد از کالری و پروتئین مورد نیاز انسان را در سطح جهان فراهم می‌کند. با این وجود، تولید این محصول راهبردی به دلیل عوامل پرشماری چون از جمله تغییرات اقلیمی، کمبود منابع آبی و تشدید تنش‌های محیطی با چالش‌های جدی روبه‌رو است. در این میان، خشکی به عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل محدودکننده، می‌تواند منجر به کاهش عملکرد، اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه و در نهایت، خطر برای امنیت غذایی شود (۲). در چنین شرایطی، به کارگیری راهکارهای پایدار و سازگار با محیط زیست برای افزایش تاب‌آوری گیاهان در برابر تنش‌ها و ارتقای بهره‌وری مصرف آب، امری ضروری است. در این راستا، کودهای زیستی شامل قارچ‌های میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد ریزوسفری (PGPR)، به عنوان گزینه‌های موثر جایگزین کودهای شیمیایی و راهبردی برای کاهش اثرات منفی تنش‌های محیطی مطرح شده‌اند (۳). این میکروارگانیسم‌ها از طریق سازوکارهای متعددی همچون تسهیل جذب آب و مواد مغذی، تولید هورمون‌های رشد گیاهی و القای مقاومت در برابر تنش‌ها، به بهبود رشد و عملکرد گیاهان کمک می‌کنند (۴). قارچ‌های میکوریزا، به‌ویژه گونه‌های متعلق به جنس ***Rhizophagus***، با تشکیل شبکه‌های گسترده هیفی در خاک، سطح جذب ریشه را افزایش داده و دسترسی گیاه به آب و عناصر غذایی کم‌متحرک مانند فسفر را بهبود می‌بخشند (۵). ژانگ و همکاران ۲۰۱۹ در پژوهش خود مشاهده کردند که استفاده از قارچ‌های میکوریزا می‌تواند مقاومت به خشکی، رشد و عملکرد گندم را در شرایط کم‌آبی افزایش دهد (۶).

همچنین، باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه (PGPR) با تولید هورمون‌های گیاهی نظیر اکسین و جیبرلین، حل‌کنندگی فسفات و القای مقاومت به تنش‌ها، نقش مهمی در بهبود رشد و عملکرد گیاهان ایفا می‌کنند (۷). یافته‌های پژوهشی 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 (۸). جمیل و همکاران (۲۰۱۸) نتیجه گرفتند کاربرد ***Pseudomonas fluorescens*** در گندم تحت

شرایط تنش خشکی موجب افزایش طول ریشه و فعالیت رنگیزه‌های فتوسنتزی شد (۹). طبق پژوهش گالیندو و همکاران (۲۰۲۲) 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 محیط‌زیست کمک می‌کند (۱۰).* در مطالعه‌ای دیگر، مشخص شد که تلقیح کلزا با قارچ و باکتری‌های محرک رشد موجب افزایش عملکرد در شرایط تنش خشکی می‌شود (۱۱).

بیشتر مطالعات انجام‌شده تاکنون بر تاثیر جداگانه قارچ‌های میکوریزا یا باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه بر گیاهان متمرکز بوده‌اند و بررسی اثرات همزمان این دو بر رشد و عملکرد گندم تحت شرایط آبیاری محدود، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این شکاف دانشی لزوم انجام تحقیقات جامع‌تر در این زمینه را نشان می‌دهد. هدف اصلی این مطالعه بررسی تاثیر همزمان و جداگانه قارچ‌های میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد بر عملکرد، صفات بیوشیمیایی مربوط به تنش از جمله قندهای محلول کل برگ، نشت الکترولیت، محتوای مالون‌دی‌الدئید ، کارایی مصرف آب و خصوصیات ریشه گندم در رژیم‌های مختلف آبیاری بوده است.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در مزرعه نمونه تحقیقاتی جهاد کشاورزی منطقه ارشق از توابع شهرستان مشگین‌شهر واقع در استان اردبیل انجام گرفت. طول جغرافیایی این منطقه برابر با ۴۷ درجه و ۵۲ دقیقه و عرض جغرافیایی آن برابر با ۳۸ درجه و ۳۹ دقیقه بود. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار انجام شد. فاکتور اول 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 توام از قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد بود. فاکتور دوم رژیم آبیاری دارای ۳ سطح (بدون آبیاری، آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه و آبیاری کامل) بود. در مجموع ۱۲ تیمار آزمایشی وجود داشت. این تیمارهای آزمایشی هر کدام در ۳ تکرار انجام شدند و در مجموع ۳۶ واحد آزمایشی وجود داشت. نیاز آبی کامل گندم بر اساس گزارشات محلی جهاد کشاورزی و با استفاده از روش پنمن-مانتیث و داده‌های هواشناسی منطقه، معادل ۵۰۰۰ مترمکعب در هکتار برای کل دوره رشد برآورد شد (۱۲). آبیاری‌ها از مرحله پنجه‌زنی (حدود ۲۰ روز پس از کاشت) آغاز و تا انتهای مرحله پر شدن دانه ادامه یافت آبیاری به صورت نوبتی و بر اساس 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٪ ظرفیت زراعی می‌رسید. در تیمار ۵۰٪، آبیاری تنها پس از رسیدن به ۵۰٪ تخلیه رطوبتی مجاز انجام شد. کلیه عملیات آبیاری با استفاده از سیستم جوی و پشته و یکنواخت‌سازی شیب زمین به منظور توزیع یکنواخت آب انجام پذیرفت. تیمار بدون آبیاری تنها متکی به بارش‌های طبیعی فصل بود. برای اعمال تیمارهای زیستی، از یک پروتکل دو مرحله‌ای برای تلقیح بذرها استفاده شد (۱۳). در تیمارهای شامل باکتری‌های محرک رشد (اعم از تیمار باکتری به تنهایی و تیمار ترکیبی)، بذرهای گندم با استفاده از سوسپانسیونی حاوی باکتری‌های *Pseudomonas fluorescens* و *Azospirillum brasilense* با غلظت 10^8 CFU/ml به روش پوشش‌دهی آغشته شدند، به طوری که مقدار مصرف سوسپانسیون ۱ لیتر در هکتار در نظر گرفته شد. در تیمارهای شامل قارچ میکوریزا (اعم از تیمار قارچ به تنهایی 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 شد. برای اطمینان از انتقال موثر 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 به عنوان ماده حامل، با نسبت مشخص ۱۰۰ گرم اینوکولوم قارچ به ازای هر کیلوگرم بذر مخلوط شدند تا اسپورها به طور یکنواخت به سطح بذر بچسبند. در نهایت، تمامی بذرهای تلقیح شده بلافاصله و در همان روز در شرایط مزرعه کشت شدند. ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپر فسفات تریپل و ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سولفات پتاسیم و همچنین ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره به‌عنوان کود پایه استفاده شد. عملیات کاشت در ۷ آبان‌ماه انجام شد. کاشت بذرها با استفاده از بذرکار دستی (ردیف‌کار) و به‌صورت خطی انجام شد. بذرها در عمق ۳ تا ۴ سانتی‌متر و با فاصله ردیف‌های ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار داده شدند. تراکم کاشت معادل ۳۵۰ بذر در متر مربع تنظیم شد. طول کرت‌ها ۴/۵ متر و عرض آن ۲ متر بود. همچنین فاصله بین کرت‌ها در یک بلوک نیم متر و فاصله بین بلوک‌ها یک متر بود که به‌وسیله پشته‌های خاکی عریض از هم جدا شده بودند. با ایجاد کانال‌های زهکشی هرگونه آب مازاد برای جلوگیری از نشت، هدایت شد. رقم مورد استفاده، آذر ۲ بود که رقمی پاییزه و متحمل به سرماست. بذرهای مورد استفاده با قوه نامیه بالای ۹۵ درصد و خلوص فیزیکی ۹۸ درصد از ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل تهیه شدند. در جدول۱، ویژگی‌های خاک محل انجام آزمایش بررسی شده است.

جدول۱- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک محل انجام آزمایش در عمق صفر تا۳۰ سانتی‌متری

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

شن (٪)	رس (٪)	سیلت (٪)	اسیدیته خاک	نیتروژن کل	ماده آلی	فسفر قابل	پتاسیم قابل	بافت خاک

Soil Texture	جذب Available Potassium (mg kg^{-1})	جذب Available Phosphorus (mg kg^{-1})	(٪) Organic Matter (%)	(٪) Total Nitrogen (%)	pH	Silt (%)	Clay (%)	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 **Month**	بیشینه دما T Maximum (°C)	کمینه دما T Minimum (°C)	میزان بارندگی 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

نحوه اندازه‌گیری صفات

پس از رسیدگی کامل گیاه، ناحیه‌ای به مساحت یک متر مربع 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 این کار عملکرد دانه به دست آمده به هکتار تعمیم داده شد. برای تعیین وزن خشک ریشه، نمونه‌برداری از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک و از مساحت ۳۰ × ۳۰ سانتی‌متر در مرکز هر کرت انجام شد. در هر کرت ۶ نمونه تصادفی برداشت شد. نمونه‌های ریشه

پس از شستشوی کامل از ذرات خاک، در پاکت‌های کاغذی قرار گرفته و به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند تا به وزن ثابت برسند. پس از خنک‌شدن در دسیکاتور، وزن نهایی ریشه‌های خشک‌شده با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم ثبت شد.

جهت اندازه‌گیری درصد کلونیزاسیون ریشه با قارچ در پایان دوره رشد و همزمان با برداشت نهایی، از سیستم ریشه گیاهان در تمامی تیمارها به طور تصادفی نمونه‌برداری شد. نمونه‌های ریشه پس از شستشو، در اتانول ٪۷۰ تثبیت گردیدند. برای ارزیابی درصد کلونیزاسیون ریشه، از نمونه‌های ریشه نازک استفاده شد. به این منظور، نمونه‌ها ابتدا در محلول هیدروکسید پتاسیم 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 (۱۴). با روش تخمین (Grid-line Intersect Method) درصد کلونیزاسیون ریشه مشخص شد (۱۵).

برای اندازه‌گیری شاخص گلوتن در گندم، از روش استاندارد ICC Standard No.155 استفاده شد. ابتدا نمونه‌های آرد گندم تهیه و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار داده شدند تا به دمای محیط برسند. سپس ۱۰ گرم از آرد با پنج میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط شده و به مدت ۲۰ ثانیه با دست هم زده شد تا خمیر اولیه تشکیل شود. خمیر به دست‌آمده به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه گلوتن واشر شسته شد تا نشاسته و سایر مواد محلول از آن جدا شوند. پس از شست‌وشو، گلوتن مرطوب به دست‌آمده وزن شد. سپس گلوتن مرطوب به مدت چهار ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شد تا وزن گلوتن خشک به دست آید (۱۶). شاخص گلوتن با استفاده رابطه ۱ محاسبه شد:

رابطه ۱: شاخص گلوتن = (وزن خشک گلوتن / وزن اولیه آرد) × ۱۰۰

زمان سنجش صفات فیزیولوژیک مرحله حداکثر رشد رویشی بود. برای سنجش نشت الکترولیت برگ‌ها از رابطه ۲ استفاده شد (۱۷):

رابطه ۲: $$EL=(L_1/L_2)\times 100$$

در این رابطه منظور از EL نشت الکترولیت، منظور از L_1 هدایت الکتریکی نمونه ها بعد از ۲۴ ساعت قرار گرفتن در آب مقطر و منظور از L_2 هدایت الکتریکی نمونه‌ها در مرحله دوم بعد از قرار گرفتن بمدت ۱۷ دقیقه در اتوکلاو در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد است. اندازه‌گیری هدایت الکتریکی به وسیله هدایت سنج EC متر انجام گرفت.

برای اندازه‌گیری شاخص سطح برگ (LAI) در هر یک از کرت‌ها از دستگاه leaf area meter دستی CI202 شرکت CID امریکا استفاده شد. در هر کرت ۶ بوته به‌طور تصادفی انتخاب و از برگ‌های بالا بوته (برای کاهش خطای ناشی از برگ‌های پیر، زرد یا در حال ریزش) به منظور اندازه‌گیری شاخص سطح برگ استفاده شد. اندازه‌گیری این صفت در زمان حداکثر رشد رویشی گیاه انجام شد.

برای سنجش قندهای محلول کل، ابتدا نمونه‌های برگ، در نیتروژن مایع منجمد و سپس به پودر نرم تبدیل شدند. حدود ۱/۰ گرم از پودر برگ در اتانول ۸۰ درصد سوسپانسیون و به منظور استخراج قندها، در بن‌ماری ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰-۲۰ دقیقه انکوبه شد. پس از سانتریفیوژ، مایع روئین جمع‌آوری شد. سپس، یک میلی‌لیتر از عصاره با معرف آنترون مخلوط و در حمام آب جوش به مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفت. پس از سرد کردن لوله‌ها، جذب نوری مخلوط در طول‌موج ۶۲۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر خوانده شد. غلظت نهایی قندهای محلول کل بر اساس یک منحنی استاندارد که با گلوکز رسم شده است، محاسبه و بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر گزارش شد (۱۸).

برای سنجش مالون‌دی‌آلدئید به عنوان نشانه آسیب اکسیداتیو، از روش سنجش با ماده تیوباربیتوریک استفاده شد. برای این منظور، ابتدا نمونه برگ گندم با محلول اسید تری‌کلرواستیک همگن شده و سپس مخلوط حاصل سانتریفیوژ شد. بخش مایع بالایی جدا شده و با محلول اسید تیوباربیتوریک مخلوط شد. این مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب جوش قرار داده شد. پس از سرد کردن، میزان جذب نور در دو طول‌موج مختلف اندازه‌گیری شده و مقدار مالون‌دی‌آلدئید با استفاده از ضریب استاندارد محاسبه و بر اساس نانومول در گرم وزن تر گیاه گزارش شد (۱۹).

برای اندازه‌گیری کارایی مصرف آب، مقدار آب مصرفی در هر تیمار بر اساس درصدی از نیاز آبی کامل گندم در منطقه (۵۰۰۰ مترمکعب در هکتار بر اساس گزارشات جهاد کشاورزی) محاسبه شد. سپس کارایی مصرف آب از تقسیم عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) بر میزان آب مصرفی (مترمکعب در هکتار) به دست آمد.

به منظور تجزیه و تحلیل، داده‌ها ابتدا تست نرمال شدند. سپس داده‌های غیرنورمال با استفاده از روش لگاریتمی تغییر داده‌ها نورمال سازی شدند .برای تجزیه واریانس داده‌ها از نرم افزارهایSAS نسخه۹,۴ و SPSS نسخه ۲۴ استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) و در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

درصد کلونیزاسیون ریشه

اثرهای اصلی کودهای زیستی و رژیم آبیاری و همچنین برهم‌کنش آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر روی صفت درصد کلونیزاسیون ریشه معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسات میانگین برهمکنش کودهای زیستی و رژیم آبیاری نشان داد بیشترین میزان کلونیزاسیون ریشه مربوط به برهم‌کنش آبیاری کامل و کاربرد توام هر دو کود قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد با میزان ۷۹/۶ درصد بود. همچنین کم‌ترین میزان ثبت شده نیز مربوط به برهمکنش سطح شاهد کودی و سیستم بدون آبیاری با میزان ۱۷/۵ درصد بود (جدول ۴). تحت تنش خشکی، اگرچه گیاه ممکن است در مراحل اولیه سعی در افزایش تخصیص کربوهیدرات به ریشه برای توسعه سامانه ریشه‌ای داشته باشد، اما تحت تنش شدید و طولانی‌مدت، کاهش کلی فتوسنتز منجر به محدودیت در عرضه کربوهیدرات به همه اندام‌ها از جمله ریشه می‌شود (۲۰). از آنجا که این ترشحات منبع غذایی اصلی برای قارچ هستند، کاهش آن، انگیزه و توانایی قارچ برای کلونیزه کردن ریشه را کم می‌کند. همچنین، خشکی به طور فیزیکی رشد ریشه و هیف را کند می‌نماید (۲۱). انواع قارچ‌های میکوریز به‌صورت عمده کلونیزاسیون را افزایش می‌دهد چون آن‌ها مستقیما عامل تلقیح‌اند. افزون بر این، کود زیستی می‌تواند امکانات تغذیه‌ای و آبی به ریشه بدهد که شرایط را برای قارچ‌ها مناسب‌تر می‌کند (۲۲). باکتری‌های محرک رشد (PGPR) می‌توانند به عنوان کمک‌کننده‌های میکوریزایی عمل کنند (۲۳). آن‌ها با تولید هورمون‌های خاص یا تغییر در ترشحات ریشه، شرایط را برای جوانه‌زنی اسپور و نفوذ هیف به درون ریشه مساعدتر می‌سازند، که این موضوع، برهم‌کنش مثبت را توضیح می‌دهد. قارچها از طریق شبکه‌های هیف که در خاک گسترش می‌یابند، دسترسی به نواحی دوردست خاک را برای جذب آب و مواد مغذی گسترش می‌دهد، که به‌ویژه در شرایط کم‌آبی مفید است (۲۴). همچنین، کود زیستی ممکن است سبب تحریک تولید پیام‌های مولکولی در ریشه شود که پذیرش همزیستی قارچی را تسهیل می‌کند (مثلاً پیام‌های اکسین، ژیبرلین، اتیلن) (۲۵).

نشت الکترولیت‌ها (EC)

بر اساس نتایج تجزیه واریانس جدول ۳، اثر اصلی کودهای زیستی، رژیم‌های آبیاری و همچنین برهمکنش آن‌ها بر صفت نشت الکترولیت (EC) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. مقایسهٔ میانگین داده‌ها (جدول ۵) نشان می‌دهد که تیمار بدون آبیاری و بدون کود بیشترین میزان نشت الکترولیت (۴۲/۵۳ درصد) و تیمار آبیاری کامل و مصرف هر دو کود کمترین مقدار (۱۰/۶۷ درصد) را نشان دادند. افزایش نشت الکترولیت در شرایط تنش خشکی شدید (بدون آبیاری) و عدم کاربرد کود زیستی را می‌توان به آسیب‌غشایی ناشی از تنش اکسیداتیو و تخریب ساختار سلول‌ها نسبت داد. این یافته با پژوهش‌های جدیدی از جمله مطالعه ظریف و همکاران همسو است که گزارش کردند تنش خشکی با ایجاد گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) ، به یکپارچگی غشای پلاسمایی آسیب زده و نشت یون‌ها را افزایش می‌دهد (۲۶). از سوی دیگر، کاهش معنی‌دار نشت الکترولیت در تیمارهای تلفیقی آبیاری کامل و کوددهی زیستی (به‌ویژه کاربرد همزمان قارچ میکوریزا و باکتری) نشان می‌دهد که این کودها با بهبود وضعیت فیزیولوژیک گیاه و افزایش کارایی سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، پایداری غشا را در برابر تنش‌های محیطی تقویت کرده و از تخریب سلول جلوگیری می‌کنند (۲۷).

محتوای مالون‌دی‌آلدئید

بر اساس نتایج تجزیه واریانس جدول ۳، اثر اصلی کودهای زیستی، رژیم‌های آبیاری و همچنین برهم‌کنش آن‌ها بر صفت محتوای مالون‌دی‌آلدئید (MDA) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. مقایسهٔ میانگین داده‌های جدول ۵ نشان می‌دهد که تیمار بدون آبیاری و بدون کود با بالاترین میزان مالون‌دی‌آلدئید (۲۷/۷۳ نانومول بر گرم) و تیمار آبیاری کامل و مصرف هر دو کود با کمترین مقدار (۶/۹۵ نانومول بر گرم) قرار گرفتند. افزایش شدید محتوای مالون‌دی‌آلدئید در شرایط تنش خشکی شدید و عدم مصرف کودهای زیستی، نشان‌دهندهٔ وقوع سطوح بالای پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی است که در نتیجه فعالیت مخرب گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) ایجاد می‌شود (۲۸). از سوی دیگر، کاهش معنی‌دار محتوای مالون‌دی‌آلدئید در تیمارهای تلفیقی آبیاری کامل و کوددهی زیستی (به‌ویژه کاربرد همزمان قارچ میکوریزا و باکتری) نشان می‌دهد که این کودها با تقویت سیستم‌های آنزیمی و غیرآنزیمی آنتی‌اکسیدانی، باعث کاهش پراکسیداسیون لیپیدی و در نتیجه محافظت از غشاهای سلولی در برابر آسیب‌های اکسیداتیو می‌شوند (۲۹). در تیمار بدون آبیاری و بدون کود که بالاترین میزان مالون‌دی‌آلدئید را نشان داد، شاهد بیشترین نشت

الکترولیت نیز بودیم. این الگو نشان می‌دهد که تحت تنش خشکی شدید، گیاه اگرچه با تولید قندهای محلول سعی در تنظیم فشار اسمزی دارد، اما از طرفی با تجمع گونه‌های فعال اکسیژن مواجه می‌شود که به غشای سلولی آسیب رسانده و همزمان باعث افزایش نشت الکترولیت و تجمع مالون‌دی‌آلدئید می‌گردد (۳۰).

شاخص سطح برگ

با توجه به نتایج تجزیه واریانس جدول ۳، اثرهای اصلی کودهای زیستی، رژیم‌های آبیاری و همچنین برهمکنش آن‌ها بر صفت شاخص سطح برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. داده‌های جدول ۴ نشان می‌دهد که شاخص سطح برگ از کمترین مقدار (۲/۱۵) در تیمار بدون آبیاری و بدون کود به بیشترین مقدار (۶/۰۸) در تیمار آبیاری کامل و مصرف هر دو کود افزایش یافته است. این روند کاهشی شاخص سطح برگ تحت تنش خشکی را می‌توان به عنوان یک پاسخ سازشی گیاه برای کاهش سطح تعرق و حفظ آب دانست. کمبود آب، تورم سلول‌های در حال تقسیم و گسترش در برگ را محدود می‌کند که مستقیماً به کاهش سطح نهایی برگ منجر می‌شود. در مقابل افزایش سطح برگ در تیمارهای دریافت‌کننده کود زیستی (به‌ویژه تیمار ترکیبی) نشان‌دهنده نقش این میکروارگانیسم‌ها در تسهیل جذب آب و عناصر غذایی حیاتی برای توسعه برگ است. قارچ میکوریزا با بهبود جذب فسفر و ریزعناصر، و باکتری‌های محرک رشد با تولید فیتوهورمون‌هایی مانند اکسین و جیبرلین، هر دو تقسیم سلولی و گسترش سلول‌های برگ را تحریک می‌کنند (۳۱). علاوه بر این، این میکروارگانیسم‌ها با کاهش تنش اکسیداتیو، عمر مفید و عملکرد فتوسنتزی برگ‌های موجود را نیز حفظ کرده و به حفظ سطح برگ بالاتر کمک می‌کنند (۴). توسعه سطح برگ، زمینه را برای جذب بیشتر نور و انجام فتوسنتز کارآمدتر فراهم می‌کند که نتیجه آن، مشاهده مقادیر برتر در صفات عملکردی در تیمار آبیاری کامل و مصرف هر دو کود است.

وزن خشک ریشه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳)، اثرهای اصلی کودهای زیستی، رژیم‌های آبیاری و همچنین برهم‌کنش آن‌ها بر روی صفت وزن خشک ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. داده‌های جدول ۴ نشان می‌دهد که وزن خشک ریشه از کمترین مقدار (۲/۷۵ گرم بر بوته) در تیمار بدون آبیاری و بدون کود به بیشترین مقدار (۵/۵۱ گرم) در تیمار آبیاری ۵۰ درصد و مصرف هر دو کود رسید. تنش خشکی از طریق مکانیسم‌های متعددی از جمله بسته شدن روزنه‌ها، کاهش فعالیت آنزیم‌های کلیدی فتوسنتزی، تخریب ساختار کلروپلاست و اختلال در انتقال الکترون، فرآیند فتوسنتز را مختل می‌کند (۳۲ و ۲۰). در نتیجه،

مواد قندی (کربوهیدرات‌ها) که هم به عنوان سوخت و هم به عنوان مصالح ساختمانی برای رشد و نگهداری ریشه ضروری هستند، به شدت کاهش می‌یابند. در این حالت، گیاه در یک حالت بقا قرار می‌گیرد و منابع انرژی محدود خود را نه برای گسترش ریشه، بلکه برای زنده نگه‌داشتن بافت‌های حیاتی خود حفظ می‌کند (۲۰). با این حال، نکته جالب توجه، افزایش چشمگیر وزن خشک ریشه در تیمار آبیاری ۵۰ درصد و مصرف هر دو کود است که حتی از تیمار آبیاری کامل نیز فراتر رفته است. این پدیده را می‌توان به عنوان یک پاسخ سازشی هوشمندانه گیاه تفسیر کرد که تحت تیمار آبیاری ۵۰ درصد و با کمک کودهای زیستی، گیاه با توسعه بیشتر سیستم ریشه، راهکاری برای دسترسی به منابع آبی محدود و افزایش تحمل به خشکی در پیش می‌گیرد. این توسعه سیستم ریشه به طور مستقیم با بهبود جذب آب و مواد غذایی مرتبط است. در مقابل، در تیمار آبیاری کامل، آب به میزان کافی در دسترس است و گیاه انگیزه کمتری برای توسعه سیستم ریشه دارد و در نتیجه منابع خود را بیشتر به توسعه بخش هوایی اختصاص می‌دهد (۳۳).

تعداد دانه در سنبله

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثرات اصلی کودهای زیستی و رژیم آبیاری در سطح احتمال یک درصد و برهم‌کنش آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد در صفت تعداد دانه در سنبله معنی‌دار بود (جدول ۳). 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 یافته است (جدول ۴). باکتری‌های محرک رشد مانند *Azospirillum*، *Pseudomonas* و *Bacillus* با تولید هورمون‌های رشد گیاهی مانند اکسین و جیبرلین و همچنین تسهیل جذب عناصر غذایی مانند نیتروژن و فسفر، باعث افزایش تعداد دانه در سنبله می‌شوند (۳۴). علاوه بر این، با آبیاری و کاربرد کودها، کاهش استرس اکسیداتیو باعث می‌شود انرژی گیاه به جای مقابله با تنش، صرف فرآیندهای تولیدمثلی و پر کردن دانه‌ها شود (۳۵).

وزن هزاردانه

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثرات اصلی کودهای زیستی و رژیم آبیاری در سطح احتمال یک درصد و برهم‌کنش آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد در صفت وزن هزاردانه معنی‌دار بود (جدول ۳). 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 مصرف هر دو کود افزایش یافته است (جدول ۴). تنش خشکی با مختل کردن فرآیند انتقال مواد فتوسنتزی از برگ به دانه، موجب کاهش ذخیره‌سازی مواد پرورنده در دانه‌ها

می‌شود. در نتیجه، دانه‌ها به‌طور کامل پر نشده و وزن نهایی آن‌ها کاهش می‌یابد (۳۶). باکتری‌هایی مانند *Azospirillum* از طریق تثبیت نیتروژن مولکولی و تبدیل آن به فرم‌های قابل جذب برای گیاه (مانند آمونیوم)، دسترسی به این عنصر حیاتی را افزایش می‌دهند. نیتروژن کافی باعث بهبود سنتز پروتئین‌های ذخیره‌ای دانه، توسعه بهتر بافت آندوسپرم و در نتیجه افزایش وزن هزاردانه می‌شود (۳۷). همچنین قارچ میکوریزا با گسترش شبکه ریشه‌ای گیاه و افزایش جذب آب و مواد غذایی از خاک، تاب‌آوری گیاه در برابر تنش خشکی را بهبود می‌بخشد و موجب بهبود وزن هزاردانه گیاه می‌شود. (۳۸).

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. بر اساس 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 مصرف هر دو کود رسیده است. در تیمار شاهد (بدون آبیاری و کوددهی)، عملکرد اندک محصول با وضعیت نامطلوب سایر ویژگی‌های گیاهی ارتباط مستقیم دارد. این تیمار دارای ضعیف‌ترین سامانه ریشه‌ای (پایین‌ترین وزن خشک ریشه)، کمترین سطح فعال فتوسنتزی (کمترین شاخص سطح برگ)، اختلال در فرآیند زایشی (کاهش تعداد دانه در هر سنبله)، عدم تکمیل ذخیره‌دانه (پایین‌ترین وزن هزاردانه) و همچنین شدیدترین تنش اکسیداتیو (بیشترین میزان مالون‌دی‌آلدئید و نشت الکترولیت) بود. این عوامل در کنار یکدیگر، به‌صورت زنجیره‌ای منجر به افت شدید عملکرد در این تیمار شدند. در مقابل، در تیمار آبیاری کامل همراه با کاربرد هر دو کود زیستی، عملکرد بالا نشان‌دهنده فراهم‌بودن شرایط بهینه رشد است که در قالب بهترین نتایج در اغلب صفات اندازه‌گیری‌شده تبلور یافته است. بهبود شاخص سطح برگ و وزن خشک ریشه در تیمارهای حاوی کودهای زیستی نشان می‌دهد که این کودها توازن بهینه‌ای بین رشد اندام‌های هوایی و زیرزمینی برقرار کرده است. توسعه سطح برگ، ظرفیت فتوسنتزی گیاه را افزایش داده و توسعه ریشه، پایه مستحکمی برای جذب منابع و انتقال مواد به دانه‌ها فراهم آورده است. کودهای زیستی با تقویت سازوکارهای دفاعی گیاه و حفظ تعادل درونی آن در شرایط تنش، زمینه را برای شکوفایی کامل توان ژنتیکی گیاه در تولید دانه فراهم آوردند (۳۹). باکتری‌های محرک رشد باعث بهبود بهره‌وری نیتروژن و فسفر از طریق افزایش ترشح سیدروفورها و افزایش دسترسی به مواد مغذی خاک می‌شوند (۴۰).

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات بررسی شده در پژوهش

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

منبع تغییرات Sources of variance	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares										
		قندهای محلول کل Total Soluble Sugars	درصد کلونیزاسیون ریشه Root Colonization Percentage	نشت الکترولیت EC	شاخص سطح برگ LAI	محتوای مالون‌دی‌آلدئید MDA Content	تعداد دانه در سنبله grains per spike	وزن هزاردانه Thousand Seed Weight	عملکرد دانه Seed yield	وزن خشک ریشه Root Dry Weight	شاخص گلوتن Gluten index	کارایی مصرف آب WUE
تکرار Repetition	2	0.226	8.45	1.07	0.009	0.62	1.25	0.85	4256.3	0.007	0.31	0.02
کودهای زیستی Biofertilizer (a)	3	95.2**	1245.8**	618.7**	15.1**	328.5**	85.41**	15.62**	358742.6**	10.7**	82.35**	0.45**
رژیم آبیاری Irrigation regime (b)	2	156.4**	287.3**	1072.9**	19.46**	428.1**	120.3**	22.14**	512389.2**	14.4**	71.26**	1.92**
(a) × (b)	6	3.1**	63.21**	14.6**	0.47**	11.4**	25.64*	6.98*	102543.7*	0.35**	30.5**	0.08*
خطای آزمایش Error	22	0.39	15.08	1.73	0.008	1.07	6.21	2.34	18542.7	0.007	3.8	0.035
ضریب تغییرات (٪) CV (%)	-	5.35	8.92	5.41	6.08	6.42	7.67	5.97	6.18	3.8	5.12	6.12

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

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

قندهای محلول کل

طبق نتایج تجزیه واریانس جدول ۳، اثرهای اصلی کودهای زیستی، رژیم‌های آبیاری و همچنین برهم‌کنش آن‌ها بر صفت قندهای محلول کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین داده‌های جدول ۴ نشان می‌دهد که محتوای قندهای محلول کل در شرایط تنش خشکی شدید (بدون آبیاری) و عدم مصرف کودهای زیستی به بیشترین مقدار خود (۱۸/۳۷ میلی‌گرم بر گرم) رسید، در حالی که پایین‌ترین مقدار (۵/۶۳ میلی‌گرم بر گرم) در تیمار آبیاری کامل و هر دو کود مشاهده شد. این الگوی تغییرات را می‌توان با در نظر گرفتن نقش دوگانه قندهای محلول در گیاه تبیین کرد. از یک سو، تحت تنش خشکی، گیاه با تجمع قندهای محلول به عنوان اسمولیت‌های سازگارکننده واکنش نشان می‌دهد تا پتانسیل اسمزی سلول را حفظ و از دست دادن آب را کاهش دهد (۴۱). این مسئله توجیه‌کننده مقادیر بالاتر قندهای محلول در تیمارهای تحت تنش خشکی مانند بدون آبیاری و بدون کود است. از سوی دیگر، مقادیر بسیار بالای قندهای محلول در این تیمارها می‌تواند نشانه‌ای از اختلال در متابولیسم طبیعی گیاه و بروز استرس اکسیداتیو باشد، که این موضوع با همبستگی مثبت و قوی بین مقادیر بالای قندهای محلول و سطوح بالای مالون‌دی‌آلدئید و نشت الکترولیت در همین تیمارها در جدول ۴ تایید می‌شود. در مقابل، کاهش تدریجی و معنی‌دار قندهای محلول در تیمارهای دارای کودهای زیستی و آبیاری مطلوب (مانند آبیاری کامل و هر دو کود) نشان می‌دهد که این تیمارها با بهبود وضعیت آبی گیاه و کاهش نیاز به تجمع اسمولیت‌ها، و همچنین با کاهش استرس اکسیداتیو، توانستند گیاه را به سمت یک متابولیسم عادی‌تر و کارآمدتر سوق دهند (۴۲). این بهبود در وضعیت فیزیولوژیکی به وضوح در صفات عملکردی برتر مانند افزایش تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه و عملکرد نهایی دانه در این تیمارها متجلی شده است. بنابراین، اگرچه تجمع اولیه قندهای محلول می‌تواند یک مکانیسم دفاعی در برابر تنش باشد، اما تداوم و تشدید آن نشان‌دهنده شدت تنش و اختلال در عملکرد طبیعی گیاه است و کاهش آن در شرایط بهینه، نشانه سلامت متابولیکی و بهبود عملکرد محسوب می‌شود.

کارایی مصرف آب

با توجه به نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳)، اثراصلی کودهای زیستی، رژیم‌های آبیاری و برهم‌کنش آن‌ها بر صفت کارایی مصرف آب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اطلاعات جدول ۵ نشان می‌دهد که کارایی مصرف آب در شرایط آبیاری کامل (۰/۸۴ تا ۰/۹۸ کیلوگرم بر مترمکعب) به طور قابل توجهی کمتر از شرایط آبیاری ۵۰ درصد (۱/۳۸ تا ۱/۶۱ کیلوگرم بر مترمکعب) بود. این الگو نشان می‌دهد که گیاه در شرایط کم‌آبی ملایم، با مکانیسم‌های فیزیولوژیکی مختلف، کارایی استفاده از هر

واحد آب را به حداکثر می‌رساند. در هر دو سطح آبیاری، تیمارهای دارای کود زیستی به ویژه تیمار کاربرد هر دو کود توانسته‌اند کارایی مصرف آب را نسبت به تیمارهای فاقد کود به طور معنی‌داری افزایش دهند. کودهای زیستی با توسعه سیستم ریشه و ایجاد رابطه همزیستی با قارچ‌های میکوریزا، سطح جذب آب را افزایش داده و در نتیجه آب بیشتری در اختیار گیاه قرار می‌گیرد (۴۳). همچنین، این کودها با بهبود وضعیت غذایی گیاه به ویژه از نظر جذب فسفر، کارایی فتوسنتز را افزایش داده و در نتیجه عملکرد بیشتری به ازای هر واحد آب مصرفی تولید می‌کنند (۲۲). کودهای زیستی با کاهش تنش اکسیداتیو (که از طریق داده‌های مالون‌دی‌آلدئید و نشت الکترولیت تایید می‌شود) و بهبود سلامت کلی گیاه، باعث می‌شوند که انرژی گیاه به جای مقابله با تنش، صرف تولید ماده خشک شود.

شاخص گلوتن

اثر اصلی کودهای زیستی، رژیم‌های آبیاری و برهم‌کنش آن‌ها در صفت شاخص گلوتن در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). داده‌های جدول ۵ نشان داد که شاخص گلوتن از کمترین مقدار (۲۱/۴۷ درصد) در تیمار بدون آبیاری و بدون کود به بیشترین مقدار (۴۵/۷۲ درصد) در تیمار آبیاری کامل و مصرف هر دو کود افزایش یافته است. استفاده ترکیبی از قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد از تخریب پروتئین‌های گلوتن در تنش خشکی جلوگیری می‌کند و با افزایش نسبت گلوتنین به گلیادین باعث بهبود شاخص گلوتن می‌شود (۴۴). همچنین کودهای زیستی با بهبود جذب نیتروژن و فسفر به افزایش سنتز پروتئین‌های گلوتن کمک می‌کند (۴۵). کاهش شاخص گلوتن در شرایط تنش خشکی شدید را می‌توان به اختلال در سنتز و تجمع پروتئین‌های ذخیره‌ای دانه نسبت داد. تحت تنش خشکی، کاهش فتوسنتز و اختلال در انتقال مواد به دانه منجر به محدودیت در عرضه پیش‌سازهای نیتروژنه و کربنی مورد نیاز برای سنتز پروتئین‌های گلوتن می‌شود (۴۶).

جدول۴- مقایسه میانگین برهم‌کنش 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 (%)	وزن خشک ریشه Root Dry Weight (g Plant^{-1})	تعداد دانه در سنبله grains per spike) no/Plant (	وزن هزار دانه Thousand Seed Weight (g)	عملکرد دانه Seed yield (kg ha^{-1})	شاخص سطح برگ LAI
بدون آبیاری × بدون کود No Irrigation × No Fertilizer	17.5 e	2.75 g	22.3 h	34.8 g	2501.7 h	2.15 i
بدون آبیاری × قارچ میکوریزا No Irrigation × Mycorrhizal Fungi	48.3 c	3.8 ef	24.8 g	36.5 f	2850.3 g	2.68 h
بدون آبیاری × باکتری No Irrigation × Bacteria	23.6 de	3.68 f	26.1 fg	37.2 ef	2981.2 fg	2.82 gh
بدون آبیاری × هر دو کود No Irrigation × Both Bio-Fertilizers	51.4 c	4.45 d	27.8 f	38.1 cde	3150.4 f	3.25 f
آبیاری ۵۰ درصد × بدون کود 50% Irrigation × No Fertilizer	20.8 de	3.94 e	27 f	36.9 f	3450.5 e	3.12 fg
آبیاری ۵۰ درصد × قارچ میکوریزا 50% Irrigation × Mycorrhizal Fungi	61.2 b	4.83 c	30.2 e	38.7 cde	3765.2 d	3.85 e
آبیاری ۵۰ درصد × باکتری 50% Irrigation × Bacteria	28.5 d	4.94 bc	31.5 de	39.1 cd	3884.7 d	4.02 de
آبیاری ۵۰ درصد × هر دو کود 50% Irrigation × Both Bio-Fertilizers	65.1 b	5.51 a	32.8 cd	40.5 bc	4022.9 cd	4.63 c
آبیاری کامل × بدون کود Full Irrigation × No Fertilizer	25.6 d	3.78 ef	30.8 de	39.5 cd	4203.4 c	4.28 cd
آبیاری کامل × قارچ میکوریزا Full Irrigation × Mycorrhizal Fungi	66.6 b	4.42 d	34.5 bc	41.3 b	4568.9 b	5.12 b
آبیاری کامل × باکتری Full Irrigation × Bacteria	25.7 d	4.58 d	35.2 ab	42 ab	4712.3 ab	5.3 b
آبیاری کامل × هر دو کود Full Irrigation × Both Bio-Fertilizers	79.6 a	5.1 b	36.7 a	43.5 a	4891.6 a	6.08 a

میانگین‌های با حروف متفاوت در هر ستون بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌داری می‌باشند.

Means with different letters in each column indicate significant differences at the 5% probability level based on LSD's t

جدول۵- مقایسه میانگین اثرهای برهم‌کنش کودهای زیستی و رژیم‌های آبیاری بر برخی صفات فیزیولوژیکی گندم

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

تیمارهای آزمایشی Experimental treatments	نشت الکترولیت EC (%)	قندهای محلول کل Total Soluble Sugars (mg g^{-1})	محتوای مالون‌دی‌آلدئید MDA Content (nmol g^{-1})	شاخص گلوتن Gluten index (%)	کارایی مصرف آب WUE (Kg m^{-3})
بدون آبیاری × بدون کود No Irrigation × No Fertilizer	42.53 a	18.37 a	27.73 a	21.47 g	-
بدون آبیاری × قارچ میکوریزا No Irrigation × Mycorrhizal Fungi	35.63 b	15.6 b	23.5 b	26.13 efg	-
بدون آبیاری × باکتری No Irrigation × Bacteria	33.77 bc	14.63 b	21.93 bc	28.14 def	-
بدون آبیاری × هر دو کود No Irrigation × Both Bio-Fertilizers	28.67 d	12.47 cd	18.53 d	31.92 cd	-
آبیاری ۵۰ درصد × بدون کود 50% Irrigation × No Fertilizer	31.5 cd	14.4 bc	20.43 cd	23.58 fg	1.38 c
آبیاری ۵۰ درصد × قارچ میکوریزا 50% Irrigation × Mycorrhizal Fungi	24.7 e	11.73 d	15.87 e	30.37 cde	1.51 b
آبیاری ۵۰ درصد × باکتری 50% Irrigation × Bacteria	22.67 ef	10.57 de	14.5 ef	34.83 bc	1.55 b
آبیاری ۵۰ درصد × هر دو کود 50% Irrigation × Both Bio-Fertilizers	19.03 f	8.87 ef	12.03 gh	37.38 b	1.61 a
آبیاری کامل × بدون کود Full Irrigation × No Fertilizer	20.87 f	9.6 ef	13.73 fg	28.18 def	0.84 f
آبیاری کامل × قارچ میکوریزا Full Irrigation × Mycorrhizal Fungi	15.73 g	7.77 fg	10.12 hi	37.52 b	0.91 e
آبیاری کامل × باکتری Full Irrigation × Bacteria	13.97 gh	6.93 gh	8.81 ij	38.88 b	0.94 de
آبیاری کامل × هر دو کود Full Irrigation × Both Bio-Fertilizers	10.67 h	5.63 h	6.95 j	45.72 a	0.98 d

میانگین‌های با حروف متفاوت در هر ستون بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌داری می‌باشند.

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

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد، کاربرد همزمان قارچ میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد نه‌تنها عملکرد و صفات فیزیولوژیکی گندم را در تمامی سطوح آبیاری از جمله شرایط آبیاری کامل بهبود بخشید، بلکه در شرایط آبیاری محدود (۵۰ درصد نیاز آبی) نیز

توانست کاهش ناشی از تنش آبی را به‌طور معناداری جبران کند. این امر نشان می‌دهد که استفاده از این کودهای زیستی می‌تواند کاهش ۵۰ درصدی مصرف آب را بدون افت معنی‌دار عملکرد دانه جبران نماید. این کودها از طریق سازوکارهای هم‌افزایی، تاب‌آوری گیاه در برابر تنش خشکی را افزایش دادند. این امر با افزایش کلونیزاسیون ریشه، بهبود پایداری غشا (کاهش نشت الکترولیت و مالون‌دی‌آلدئید)، تعدیل متابولیسم گیاه (کاهش قندهای محلول) و توسعه شاخص سطح برگ و سامانه ریشه محقق شد. در نهایت، این بهبود وضعیت فیزیولوژیکی منجر به افزایش تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، شاخص گلوتن و کارایی مصرف آب شد و زمینه را برای تحقق پتانسیل عملکردی گندم فراهم کرد. در مقابل، تیمار شاهد (بدون کود و بدون آبیاری) با بیشترین آسیب‌های اکسیداتیو و اختلال در صفات رشدی، کمترین عملکرد را به همراه داشت. در مناطق با محدودیت آبی، می‌توان با اعمال این کودهای زیستی، آبیاری را تا سطح ۵۰ درصد نیاز کامل گیاه کاهش داد بدون آن که کاهش معنی‌داری در عملکرد دانه و کیفیت گلوتن ایجاد شود. این راهکار، ضمن افزایش کارایی مصرف آب (WUE) ، وابستگی به نهاده‌های شیمیایی را کاهش داده و پایداری سیستم زراعی را بهبود می‌بخشد.

References

1. FAO. (2021). *The state of food security and nutrition in the world*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
2. Daryanto, S., Wang, L., & Jacinthe, P. A. (2016). Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. *PLOS ONE, 11*(5), e0156362. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156362
3. Haghaninia, M., & Javanmard, A. (2022). Effect of *Rhizophagus intraradices* and chemical fertilizer application on yield and yield components of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) and chickpea (*Cicer arietinum* L.) in intercropping. *Journal of Crop Production, 15*(2), 1–33. (in persian). https://doi.org/10.22069/ejcp.2022.19136.2429
4. Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica, 2012*, 963401. https://doi.org/10.6064/2012/963401
5. Rillig, M. C., Aguilar-Trigueros, C. A., Camenzind, T., Cavagnaro, T. R., Degrune, F., Hohmann, P., & Yang, G. (2019). Why farmers should manage the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *New Phytologist, 222*(3), 1171–1175. https://doi.org/10.1111/nph.15602
6. Zhang, H., Xie, X., Kim, M. S., Kornyeyev, 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. https://doi.org/10.1007/s00344-018-9879-7
7. 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
8. 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

9. 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).
10. 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
11. 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
12. 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
13. Adesemoye, A. O., Torbert, H. A., & Kloepper, J. W. (2009). Plant growth-promoting rhizobacteria allow reduced application rates of chemical fertilizers. Microbial Ecology, 58(4), 921–929. 10.1007/s00248-009-9531-y
14. 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
15. Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Transactions of the British Mycological Society, 55(1), 158–161. https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110
16. Düzgün, M., & Karaman, M. (2021). Determination and evaluation of quality parameters in cool climate cereals. In *Theoretical and practical new approaches in cereal science and technology* (pp. 147–223). IKSAD Publishing House.
17. Sajed Gollojeh, K., Khomari, S., Shekhzadeh, P., Sabaghnia, N., & Mohebodini, M. (2020). The effect of foliar spray of nano silicone and salicylic acid on physiological traits and seed yield of spring rapeseed at water limitation conditions. *Journal of Crop Production, 12*(4), 137–156. (in persian). https://doi.org/10.22069/ejcp.2020.16396.2221
18. Irigoyen, J. J., Einerich, D. W., & Sánchez-Díaz, M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (Medicago sativa) plants. Physiologia Plantarum, 84(1), 55-60. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x
19. Heath, R. L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Archives of Biochemistry and Biophysics, 125(1), 189–198. https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1
20. Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: Metabolic controls and regulations. Annals of Botany, 103(4), 551–560. https://doi.org/10.1093/aob/mcn125
21. 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
22. 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
23. 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
24. 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

25. 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
26. Zarif, H., Fan, C., Yuan, G., Zhou, R., Chang, Y., Sun, J., & Wang, C. (2025). Drought stress in roses: A comprehensive review of morphophysiological, biochemical, and molecular responses. *International Journal of Molecular Sciences, 26*(9), 4272. https://doi.org/10.3390/ijms26094272
27. Rahimzadeh, S., & Pirzad, A. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungi and *Pseudomonas* in reduce drought stress damage in flax (*Linum usitatissimum* L.): A field study. *Mycorrhiza, 27*(6), 537–552. (in persian). https://doi.org/10.1007/s00572-017-0775-y
28. Ahanger, M. A., Bhat, J. A., Siddiqui, M. H., & Ahmad, P. (2021). Antioxidant defense and ROS signaling in plants under drought stress: Roles of mycorrhiza and plant growth-promoting rhizobacteria. *Journal of Plant Growth Regulation, 40*(5), 1858–1874. https://doi.org/10.1007/s00344-020-10251-1
29. Dinarvandi, M. D., Rahnama, A., Meskarbashee, M., & Zoufan, P. (2025). Foliar application of salicylic acid effect on photosynthetic properties, enzymatic antioxidant activities, and yield of canola (*Brassica napus* L.) cultivars under terminal heat stress. *Journal of Crop Production, 18*(2), 87–112. (in persian). https://doi.org/10.22069/ejcp.2025.23526.2674
30. Latef, A. A. H. A., Alhmad, M. F. A., & Alkahtani, M. D. F. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance growth, photosynthesis, and antioxidant defense system under drought stress. *Mycorrhiza, 33*(4), 425–439. https://doi.org/10.1007/s00572-023-01102-0
31. Hashem, A., Tabassum, B., & Abd_Allah, E. F. (2019). *Bacillus subtilis*: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. *Saudi Journal of Biological Sciences, 26*(6), 1291–1297. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.05.004
32. Du, Y., Zhao, Q., Chen, L., Yao, X., Zhang, W., Zhang, B., & Xie, F. (2020). Effect of drought stress on sugar metabolism in leaves and roots of soybean seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry, 146*, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.11.003
33. Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., Oleksyn, J., Poot, P., & Mommer, L. (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist, 193*(1), 30–50. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x
34. Kumar, A., Verma, J. P., & Singh, S. (2020). Role of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) in sustainable agriculture. *Microbial Biotechnology, 13*(4), 1–15. https://doi.org/10.1111/1751-7915.13602
35. Golldack, D., Li, C., Mohan, H., & Probst, N. (2014). Tolerance to drought and salt stress in plants: Unraveling the signaling networks. *Frontiers in Plant Science, 5*, 151. https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00151
36. Rezaei Morad Aali, M., Eivazi, A., Mohammadi, S., & Shir-Alizadeh, S. (2013). Effect of drought stress on dry matter remobilization and grain yield of winter bread wheat genotypes. Iranian Journal of Crop Sciences, 15(3), 262–276. (in persian).
37. Dobbelaere, S., Vanderleyden, J., & Okon, Y. (2010). Plant growth-promoting effects of diazotrophs in the rhizosphere. *Critical Reviews in Plant Sciences, 22*(2), 107–149. https://doi.org/10.1080/07352680390183797
38. 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).
39. 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
40. Tafaroji, S. H., Abtahi, S. A., Jafarinia, M., & Ebadi, M. (2022). The effect of plant growth-promoting rhizobacteria producing ACC-deaminase, IAA, siderophore and phosphate solubilization on growth indices, chlorophyll, proline and protein in alfalfa at different levels of salinity. *Plant Productions, 45*(3), 375–384. (in persian). https://doi.org/10.22055/ppd.2022.40265.2018

41. Qadir, M., Ahmad, M. S. A., & Javed, F. (2016). Role of osmolytes and antioxidative enzymes in the mechanism of salinity tolerance in rice (Oryza sativa L.). Frontiers in Plant Science, 7, 1366. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01366
42. Li, Q., Song, M., Ma, S., & Zhao, Y. (2023). Antioxidant enzyme activities and MDA content in plants under combined drought and biofertilizer application. Plant Stress, 7, 100146. https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100146
43. Al-Arjani, A. B. F., Hashem, A., & Abd_Allah, E. F. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi modulates dynamics tolerance expression to mitigate drought stress in Ephedra foliata Boiss. Saudi Journal of Biological Sciences, 27(1), 380–394. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.10.008
44. Makvandi, M., Bakhshandeh, A., Moshatati, A., Moradi Telavat, M., & Khodaei Joghan, A. (2024). The effect of combined use of nitrogen fertilizer and sugarcane residue compost on wheat grain quality and yield under terminal heat stress conditions in Ahwaz. *Journal of Crops Improvement, 26*(1), 51–74. (in persian). https://doi.org/10.22059/jci.2023.358472.2810
45. Ruiz-Lozano, J. M., Aroca, R., Zamarreño, Á. 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
46. Faridnia, A., Paknejad, F., Sadeghi Shoa, M., Ilkaee, M. N., & Aghayari, F. (2022). Effect of nano micronutrients and growth regulators on wheat grain quality in low irrigation conditions. *Journal of Crop Production, 15*(4), 85–100. (in persian). https://doi.org/10.22069/ejcp.2023.19985.2487