University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research
Vol. 12, No. 4, Winter 2023 (417-433)
doi: 10.22124/CR.2023.24407.1765
pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115

RESEARCH PAPER OPEN ACCESS

Application of biofertilizer, organic and inorganic fertilizer and plant growth regulators on dry matter remobilization and grain filling components of barley (*Hordeum vulgare* L.) under water deficit conditions

Sara Mohammadi Kalesarlou[1*], Raouf Seyed Sharifi[2] and Mohammad Sedgi[2]

1. Ph.D. Student, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran (* Corresponding author: mohammadiisara1@gmail.com)
2. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Comprehensive abstract

Introduction

Drought stress is one of the most important factors affecting crop yield especially in irrigated agriculture in arid and semiarid regions. Application of some stress modulators (vermicompost, mycorrhiza, putrescine and zinc nanooxide) increases growth, yield and the resistance of plants against various environmental stresses such as drought. However, the effect of these compounds alone has been investigated on modulating the effects of stress, there are fewer reports about their interaction effects. In this experiment, the interaction effects of organic, biological and mineral fertilizers and stress modulators were investigated on the improvement of current photosynthesis, dry matter remobilization process, grain filling components and grain yield of barley under water deficit conditions.

Materials and methods

To investigate the interaction effects of some stress modulators (vermicompost, mycorrhiza, zinc nanooxide and putrescine) on the contribution of dry matter remobilization and grain filling components of barley under water deficit stress conditions, a factorial experiment in randomized complete block design with three replications was conducted in research greenhouse of Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, in 2022. The experimental factors were included irrigation in three levels (full irrigation as control, irrigation withholding at 50% of the heading and 50% of the booting stages, equal to codes 55 and 43 of BBCH scale, as moderate and severe water limitation, respectively), application of biofertilizer, and organic and inorganic fertilizers in four levels (no application of fertilizers as control, application of vermicompost, application of mycorrhiza, combined application of vermicompost and mycorrhiza), and foliar application of putrescine and zinc nanooxide in four levels (foliar application of water as control, foliar application of 0.4 $g.L^{-1}$ Zn nanooxide, foliar application of 0.8 mM putrescine, combined foliar application of Zn nanooxide and putrescine). Mycorrhiza fungus (*mosseae* species) was purchased from Zist Fanavar Turan company and according to copany's protocol, 10 g per kg soil was used. Vermicompost was purchased from Gilda company and according to copany's protocol, 50 g per kg soil was used. Zinc nanooxide production of China, with an average particle size of less than 30 nm, a specific surface of more than 30 $m^2.g^{-1}$, a Zn content of about 65.21% and a purity of 99%, was purchased from Jahan Kimia company, Urmia, Iran. The barley variety used in the experiment was Nobahar variety, which was cultivated with a plant density of 400 seeds per m^2.

Research findings

The results showed that the combined application of stress modulators (vermicompost, mycorrhizal, Zn nanooxide and putrescine) under irrigation withholding at booting stage conditions decreased dry matter remobilization from shoot and stem (22.32% and 25.65%, respectively) and their contribution in grain yield (52.92% and 56.95%, respectively) compared to the no application of biofertilizers and no foliar application of putrescine and Zn. In contrast, application of stress modulators under irrigation withholding in booting stage conditions increased total chlorophyll (24.91%), current photosynthesis (62.57%), contribution of current photosynthesis in grain yield (30.54%), grain filling rate (6.62%), grain filling period (18.06%), effective grain filling period (27.67%) and grain yield (25.18%) compared to the no application of biofertilizers and no foliar application of putrescine and Zn.

Conclusion

The findings of the current experiment showed that the application of stress modulators (vermicompost, mycorrhizal, Zn nanooxide and putrescine) can increase grain yield of barley under water limitation conditions by improving the current photosynthesis and grain filling components.

Keywords: Current photosynthesis, Drought, Grain filling rate, Foliar application, Total chlorophyll

Received: August 10, 2022 Accepted: January 07, 2023

Cite this article:

Mohammadi Kalesarlou, S., Seyed Sharifi, R. and Sedgi, M. 2023. Effects of application of biofertilizer, organic and inorganic fertilizer and plant growth regulators on dry matter remobilization and grain filling of barley (Hordeum Vulgare L.) under drought stress conditions. *Cereal Research*, 12(4), pp. 417-433.

تحقیقات غلات
دوره دوازدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۱ (۴۳۳-۴۱۷)
doi: 10.22124/CR.2023.24407.1765
دانشگاه گیلان
دانشکده علوم کشاورزی
مقاله پژوهشی
دسترسی آزاد

اثر مصرف کودهای آلی، زیستی، معدنی و تنظیم‌کننده‌های رشد بر انتقال مجدد مواد و مولفه‌های پر شدن دانه جو (*Hordeum vulgare* L.) تحت شرایط کمبود آب

سارا محمدی کله‌سرلو[1*]، رئوف سید شریفی[2] و محمد صدقی[2]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
(* نویسنده مسئول: mohammadiisara1@gmail.com)
۲- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده جامع

مقدمه: خشکی یکی از مهم‌ترین فاکتورهای موثر بر عملکرد به‌ویژه در زراعت آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است. کاربرد برخی از تعدیل کننده‌های تنش (ورمی‌کمپوست، مایکوریزا و پوترسین و نانواکسید روی)، رشد، عملکرد و مقاومت گیاهان در برابر انواع تنش‌های محیطی از جمله خشکی را افزایش می‌دهند. اگرچه اثر هر یک از این ترکیبات به‌تنهایی بر تعدیل اثرات ناشی از تنش بررسی شده است، اما گزارش‌های کم‌تری در مورد برهم‌کنش توام این عوامل وجود دارد. در این آزمایش، اثر توأم کودهای آلی، زیستی و معدنی و تنظیم کننده‌های رشد بر بهبود فتوسنتز جاری، فرآیند انتقال مجدد مواد، مولفه‌های پر شدن دانه و عملکرد دانه جو تحت شرایط کمبود آب مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش: به‌منظور ارزیابی برهم‌کنش برخی تعدیل‌کننده‌های تنش (ورمی‌کمپوست، میکوریز، روی و پوترسین) بر سهم فرآیند انتقال مجدد و مولفه‌های پر شدن دانه جو تحت شرایط تنش کمبود آب، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۱ اجرا شد. فاکتورهای آزمایشی شامل آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل به‌عنوان شاهد، قطع آبیاری در ۵۰ درصد مراحل سنبله‌دهی و آبستنی معادل کد ۵۵ و ۴۳ مقیاس BBCH به‌ترتیب به‌عنوان محدودیت ملایم و شدید آبی)، کاربرد کودهای زیستی، آلی و معدنی در چهار سطح (عدم کاربرد کود به‌عنوان شاهد، کاربرد ورمی‌کمپوست، کاربرد مایکوریزا و کاربرد مخلوط ورمی‌کمپوست و مایکوریزا)، و محلول‌پاشی پوترسین و نانواکسید روی در چهار سطح (محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی ۰/۴ گرم بر لیتر نانواکسید روی، محلول‌پاشی ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین، محلول‌پاشی توام روی و پوترسین) بودند. قارچ مایکوریز گونه موسهآ از شرکت زیست فناوران توران خریداری و بر اساس دستورالعمل شرکت، ۱۰ گرم در هر کیلوگرم خاک مصرف شد. ورمی‌کمپوست از شرکت گیلدا خریداری و بر اساس دستوالعمل شرکت، ۵۰ گرم در هر کیلوگرم خاک استفاده شد. نانواکسید روی تولید کشور چین با متوسط اندازه ذرات کم‌تر از ۳۰ نانومتر، سطح ویژه بیش از ۳۰ مترمربع در هر گرم، محتوای روی در حدود ۶۵/۲۱ درصد و خلوص ۹۹ درصد، از شرکت جهان کیمیای ارومیه خریداری شد. رقم جو مورد استفاده در این آزمایش رقم نوبهار بود که با تراکم ۴۰۰ بذر در متر مربع کشت شد.

یافته‌های تحقیق: نتایج نشان داد که کاربرد توام تعدیل‌کننده‌های تنش (ورمی‌کمپوست، مایکوریز، نانواکسید روی و پوترسین) تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی، انتقال مجدد ماده خشک از اندام هوایی و ساقه را به‌ترتیب ۲۲/۳۲ و ۲۵/۶۵ درصد و سهم این صفات در عملکرد دانه را به‌ترتیب ۵۲/۹۲ و ۵۶/۹۵ درصد نسبت به شرایط عدم کاربرد کودهای زیستی و عدم محلول‌پاشی پوترسین و روی کاهش داد. در مقابل، کاربرد توام تعدیل‌کننده‌های تنش در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی موجب افزایش کلروفیل کل (۲۴/۹۱ درصد)، فتوسنتز جاری (۶۲/۵۷ درصد)، سهم فتوسنتز جاری در عملکرد دانه (۳۰/۵۴ درصد)، سرعت پر شدن دانه (۶/۶۲ درصد)، طول دوره پر شدن دانه (۱۸/۰۶ درصد)، دوره موثر پرشدن دانه (۲۷/۶۷ درصد) و عملکرد دانه (۲۵/۱۸ درصد) نسبت به عدم کاربرد کودهای زیستی و محلول‌پاشی تحت این شرایط شد.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این آزمایش نشان داد که کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش (ورمی‌کمپوست، مایکوریزا و محلول‌پاشی پوترسین و نانواکسید روی) می‌تواند با بهبود فتوسنتز جاری و مولفه‌های پر شدن دانه، موجب افزایش عملکرد دانه جو تحت شرایط محدودیت آبی شود.

واژه‌های کلیدی: خشکی، سرعت پر شدن دانه، فتوسنتز جاری، کلروفیل کل، محلول‌پاشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷

نحوه استناد به این مقاله:

محمدی کله‌سرلو، سارا، سید شریفی، رئوف و صدقی، محمد. ۱۴۰۱. اثر مصرف کودهای آلی، زیستی، معدنی و تنظیم‌کننده‌های رشد بر انتقال مجدد و پرشدن دانه جو (*Hordeum vulgare* L.) در شرایط تنش خشکی. *تحقیقات غلات*، ۱۲(۴): ۴۳۳-۴۱۷.

مقدمه

جو (*Hordeum vulgare* L.) گیاهی یک‌ساله از تیره غلات است که به‌طور غیرمستقیم نقش مهمی در زنجیره غذایی انسان دارد (Malakouti *et al*., 2005). تنش‌های محیطی به‌ویژه تنش آبی از عوامل اصلی کاهش دهنده عملکرد گیاهان زراعی در مناطق وسیعی از جهان هستند (Mantri *et al*., 2012). واکنش گیاهان به تنش آبی به عوامل مختلفی از قبیل عوامل ژنتیکی، مرحله رشدی، شدت و طول مدت تنش وابسته است. علایم رایج مشاهده شده در گیاهان پس از مواجه شدن با کمبود آب، شامل توقف رشد، کاهش سرعت فتوسنتز، تسریع پیری برگ و کاهش وزن دانه‌ها است (Sohrabi *et al*., 2012). بهاری و همکاران (Bahrani *et al*., 2011) نشان دادند که در گیاهان متاثر از تنش آبی و مواد غذایی، فتوسنتز جاری کاهش می‌یابد و گیاه برای جبران آن، انتقال مجدد ماده خشک به دانه را افزایش می‌دهد.

امروزه کاربرد برخی تعدیل‌کننده‌های تنش (مایکوریزا، ورمی‌کمپوست، روی و پوتریسین) یکی از راه‌کارهای اساسی در بهبود عملکرد گیاهان متاثر از تنش‌های مختلف محیطی است. ورمی‌کمپوست یکی از کودهای آلی است که به‌دلیل برخورداری از قدرت جذب و نگهداری بالای آب و عناصر معدنی، افزایش جذب مواد غذایی و فتوسنتز توسط گیاه، تهویه و زهکشی مناسب خاک، در بهبود عملکرد کمی و کیفی گیاهان زراعی در کشاورزی پایدار نیز مورد توجه قرار گرفته است (Kaya *et al*., 2018). شهبازی و همکاران (Shahbazi *et al*., 2014) گزارش کردند که تحت شرایط تنش‌های محیطی، به‌واسطه پیری زودرس، ریزش برگ‌ها و کاهش سطح برگ طی دوره پر شدن دانه، فتوسنتز جاری کاهش می‌یابد و در نتیجه بخش بیش‌تری از پر شدن دانه به‌واسطه انتقال بیش‌تر ماده خشک از ساقه و اندام هوایی به سمت دانه تامین می‌شود. آنها اظهار داشتند که کاربرد ورمی‌کمپوست با توسعه اندام‌های فتوسنتزکننده، منجر به افزایش تولید و ذخیره مواد پرورده می‌شود و در نتیجه با افزایش فتوسنتز جاری، عملکرد دانه گندم را افزایش می‌دهد.

قارچ‌های مایکوریزا نیز یکی از مهم‌ترین کودهای زیستی در محیط‌های زراعی هستند که از طریق کمک به جذب بیش‌تر عناصر غذایی و تعدیل آثار ناشی از کمبود آب در خاک، موجب بهبود فتوسنتز و افزایش سهم این فرایند در عملکرد دانه می‌شوند (Ebadi *et al*., 2019). در بیش‌تر موارد کاهش عملکرد در شرایط تنش خشکی، ناشی از کاهش طول دوره رشد به‌ویژه دوره رشد زایشی است که منجر به کاهش مولفه‌های پر شدن دانه می‌شود (Yang *et al*., 2004). ناصری و همکاران (Naseri *et al*., 2017) گزارش کردند که کاربرد قارچ مایکوریزا در جذب کارآمد برخی عناصر مانند فسفر که به‌عنوان عنصر کلیدی در انتقال انرژی طی فرآیند فتوسنتز است، ضمن بهبود محتوای کلروفیل و نرخ فتوسنتز جاری، موجب بهبود مولفه‌های پر شدن دانه (افزایش سرعت و طول دوره پر شدن دانه) می‌شود.

گزارش‌های موجود نشان می‌دهند که تنش آبی ضمن برهم زدن تعادل تغذیه‌ای گیاه، موجب محدودیت در فراهمی مواد غذایی به‌ویژه عناصر ریزمغذی می‌شود. برای غلبه بر این مشکل می‌توان با تکمیل مصرف عناصر غذایی از طریق محلول‌پاشی نانوذرات، وضعیت رشدی گیاه را بهبود بخشید. کاربرد نانوکودها به‌صورت محلول‌پاشی ضمن توزیع یکنواخت، میزان کاربرد کم و واکنش سریع گیاه به عناصر غذایی، منجر به افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی، کاهش سمیت خاک و به‌حداقل رساندن اثر منفی ناشی از مصرف بیش از حد کود و کاهش تعداد دفعات کاربرد کود می‌شود (Saadati *et al*., 2013). کمبود روی پس از نیتروژن، فسفر و پتاسیم، مهم‌ترین عامل کاهش عملکرد گیاهان زراعی است (Rehman, 2014). حد بحرانی عنصر روی برای دستیابی به حداکثر عملکرد گیاه گندم، طبق معادله میچرلیش ۰/۸۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک اعلام شده است (Feizi Asl *et al*., 2004). در این زمینه سیدشریفی و همکاران (Seyed sharifi *et al*., 2018) اظهار داشتند که محلول‌پاشی نانواکسید روی در شرایط خشکی با فراهمی شرایط بهینه برای محتوای کلروفیل، رشد سریع‌تر برگ‌ها، جذب حداکثری نور و فتوسنتز جاری موجب می‌شود تا با سنتز بیش‌تر آسیمیلات‌ها و افزایش انتقال مواد به دانه، عملکرد و اجزای پرشدن دانه گندم افزایش یابد. مطالعه خیری‌زاده آروق و همکاران (Kheirizadeh Arough *et al*., 2017) نشان داد که کاربرد قارچ مایکوریزا و محلول‌پاشی نانواکسید روی در شرایط تنش رطوبتی با توسعه اندام‌های فتوسنتز کننده، منجر به افزایش فتوسنتز جاری، اجزای پر شدن دانه (سرعت و طول دوره پر شدن دانه) و عملکرد دانه تریتیکاله شد.

امروزه ثابت شده است که پلی‌آمین‌ها در افزایش تحمل گیاه به تنش‌های محیطی و تنظیم فرآیندهای مختلف فیزیولوژیک از جمله جوانه‌زنی بذر، رشد و نمو گیاهان و به تاخیر انداختن پیری، نقش مهمی دارند (Chen *et al*., 2019). نریمانی و همکاران (Narimani *et al*., 2022) گزارش کردند که محلول‌پاشی پوترسین تحت شرایط محدودیت آبی، سرعت و طول دوره پر شدن دانه را به‌واسطه بهبود فتوسنتز جاری افزایش می‌دهد. در بررسی سایر محققین نیز محلول‌پاشی پوترسین در شرایط محدودیت آبی ضمن کمک به بهبود محتوای کلروفیل، موجب افزایش طول دوره پرشدن دانه و عملکرد دانه گندم شد (Mohseni Mohammadjanlou *et al*., 2021).

در بیش‌تر مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، عموماً بخشی از دوره رشد زایشی جو با محدودیت آبی مواجه می‌شود. از طرف دیگر، گزارش‌های موجود نشان می‌دهند که ترکیباتی نظیر ورمی‌کمپوست، مایکوریزا، نانواکسید روی و پوترسین به‌عنوان تعدیل کننده‌های تنش، در کاهش بخشی از اثرات ناشی از تنش آبی در گیاهان موثر هستند. اگرچه اثر این ترکیبات بر تعدیل اثرات ناشی از تنش، به‌تنهایی بررسی شده است، اما در مورد اثر توام این عوامل اطلاعات کم‌تری وجود دارد. در این آزمایش، اثر توأم کودهای آلی، زیستی، معدنی و تنظیم کننده‌های رشد بر فرآیند انتقال مجدد و مولفه‌های پر شدن دانه جو در شرایط محدودیت آبی مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۱ اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل طی دوره رشد گیاه به‌عنوان شاهد، و قطع آبیاری در مراحل ۵۰ درصد سنبله‌دهی و آبستنی (چکمه‌ای شدن) به‌ترتیب به‌عنوان محدودیت ملایم و شدید آبی معادل کد ۵۵ و ۴۳ مقیاس BBCH)، کاربرد کودهای زیستی در چهار سطح (عدم کاربرد کود به‌عنوان شاهد، کاربرد ورمی‌کمپوست، کاربرد مایکوریزا، کاربرد توأم ورمی‌کمپوست و مایکوریزا، محلول‌پاشی پوترسین و نانواکسید روی در چهار سطح (محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی ۰/۴ گرم بر لیتر نانواکسید روی، ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین، محلول‌پاشی توام ۰/۴ گرم بر لیتر نانواکسید روی و ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین) بودند. قارچ مایکوریزا گونه موسهآ از شرکت زیست فناوران توران تهیه و بر اساس توصیه شرکت مربوطه، به‌میزان ۲۰ گرم در هر متر مربع خاک (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار یا ۱۰ گرم در کیلوگرم خاک) استفاده شد. ورمی‌کمپوست مصرفی در این آزمایش از شرکت گیلدا خریداری و به‌میزان ۱۰ تن در هکتار (معادل ۵۰ گرم در هر کیلوگرم خاک) استفاده شد. نانواکسید روی تولید کشور چین با محتوای ۶۵/۲۱ درصد روی و خلوص ۹۹ درصد از شرکت جهان کیمیای ارومیه تهیه شد. مشخصات ورمی‌کمپوست در جدول ۱ و مشخصات خاک مورد استفاده در جدول ۲ ارایه شده است.

رقم جو استفاده شده در این آزمایش، جو بهاره دو ردیفه رقم نوبهار بود که در سال ۱۳۹۹ برای اقلیم گرم ایران معرفی شد. این رقم دارای وزن هزار دانه ۵۱ گرم، سنبله تقریباً بلند و مخروطی شکل، متوسط ارتفاع بوته ۹۰ سانتی‌متر و متوسط عملکرد ۵۳۰۹ گیلوگرم در هکتار است و مقاوم به شکنندگی، ورس، زنگ زرد و تنش‌های محیطی از جمله سرما، شوری و خشکی است. بذر این رقم از مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی استان اردبیل تهیه و با تراکم ۴۰۰ بذر در مترمربع کشت شد که تراکم مطلوب و توصیه شده برای این رقم است (Sharafizadeh *et al*., 2020). برای نیل به این تراکم، ۵۰ بذر در گلدان‌هایی با قطر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر با میانگین ۱۵ کیلوگرم خاک در هر گلدان کشت شد. اولین آبیاری بعد از کاشت و آبیاری‌های بعدی بسته به شرایط محیط و نیاز گیاه و بر اساس ظرفیت زراعی خاک اعمال شد. برای این منظور قبل از پر کردن گلدان‌ها با خاک، ابتدا چند نمونه تصادفی از خاک مورد نظر انتخاب و به آزمایشگاه منتقل شد. در آزمایشگاه مجدداً چند نمونه تصادفی از نمونه های مورد نظر انتخاب و روی آنها رطوبت‌های وزنی مختلف اعمال و با استفاده از تانسیومتر میزان مکش خاک در هر یک از رطوبت های وزنی اعمال شده تعیین شد. در مرحله بعد، بر اساس ترسیم منحنی رطوبتی خاک، میزان رطوبت وزنی مورد نظر برای رسیدن خاک به حد ظرفیت زراعی خاک تعیین شد. سپس به‌طور متوسط هر ۱۰ روز یک‌بار، ۱/۱ لیتر آب به هر یک از گلدان‌ها برای رسیدن به حد ظرفیت زراعی خاک، تا زمان قطع آبیاری اول و دوم (در مجموع ۱۵ نوبت آبیاری طی دوره رشد گیاه) داده شد.

جدول ۱- مشخصات ورمی‌کمپوست مورد استفاده در این آزمایش

Table 1. Vermicompost characteristics used in this experiment

Cd	Pb	Zn	Cu	Mn	Fe	EC	pH
mg.kg^{-1}						dS.m^{-1}	
1	19	110	20	275	5000	1.12	7.64

Table 1. Continued

جدول ۱- ادامه

Mg	Ca	K	P	N	Organic carbon	Organic matter
Percent						
0.95	2.73	0.4	0.4	1.55	32.9	56.8

جدول ۲- مشخصات فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده در این آزمایش

Table 2. Soil physicochemical characteristics used in this experiment

K	P	Zn	N	Organic carbon	Sand	Silt	Clay	Saturate extract	pH
mg.kg^{-1}			Percent						
255	27.3	1.02	0.04	0.72	38.5	42	19.5	47	7.8

گلدان‌ها در شرایط گلخانه با میانگین دمای ۲۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۵ ±۶۰ درصد و طول دوره روشنایی ۱۵-۱۴ ساعت (با استفاده از ترکیبی از لامپ‌های معمولی و مهتابی) نگه‌داری شدند. کنترل علف‌های هرز نیز طی دوره رشد گیاه به‌صورت دستی انجام شد.

جهت اندازه‌گیری محتوای کلروفیل برگ پرچم از روش آرنون (Arnon, 1949) استفاده شد. برای این منظور، ۰/۲ گرم بافت برگ پرچم به‌تدریج با استون ۸۰ درصد له شد تا کلروفیل وارد محلول استون شود. سپس حجم محلول با استون ۸۰ درصد به ۲۰ میلی‌لیتر رسانده شد. محلول حاصل به‌مدت ۱۰ دقیقه در ۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ و سپس جذب نور محلول‌رویی در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر قرائت شد. در نهایت محتوای کلروفیل‌های a، b و کل بر اساس اعداد قرائت شده از اسپکتروفتومتر به‌ترتیب با استفاده از روابط (۱) تا (۳) برآورد شدند:

$$Chla = \frac{[(19.3\times A_{663})-(0.86\times A_{645})]V}{100W} \quad (۱)$$

$$Chla = \frac{[(19.3\times A_{645})-(3.6\times A_{663})]V}{100W} \quad (۲)$$

$$ChlT = Chla + Chlb \quad (۳)$$

در این روابط، V و W به‌ترتیب حجم استون و وزن نمونه گیاهی استفاده شده هستند.

به‌منظور تعیین مولفه‌های پرشدن دانه، هشت روز بعد از سنبله‌دهی و در فواصل زمانی هر چهار روز یک‌بار، سه بوته از بین بوته‌های رقابت‌کننده به‌طور تصادفی انتخاب و پس از انتقال به آزمایشگاه، ابتدا دانه‌های سنبله اصلی جدا و شمارش شد و سپس به‌مدت ۴۸ ساعت در آون الکتریکی تهویه‌دار در دمای۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفت. دلیل انتخاب هشت روز بعد از سنبله‌دهی آن بود که دانه‌های تشکیل شده در هر سنبله از حداقل وزن برخوردار باشند تا امکان برآورد وزن دانه برای تعیین اجزای پر شدن دانه ممکن باشد. البته در هر واحد آزمایشی قبل از انجام نمونه‌برداری برای پرشدن دانه، تعدادی بوته مشابه و یکنواخت از ساقه‌های اصلی انتخاب و با نخ رنگی علامت گذاری شد تا از نمونه‌برداری بوته‌های غیریکنواخت و ناهمگن در طول دوره رشد جلوگیری شود. سپس وزن خشک تک بذر از محاسبه وزن خشک کل به تعداد بذر برآورد شد (Ronanini *et al*., 2004). به‌منظور برآورد، تجزیه و تحلیل و تفسیر پارامترهای مربوط به پرشدن دانه از یک مدل رگرسیون خطی دو تکه‌ای بر اساس رویه DUD و دستورالعمل Proc Nline نرم‌افزار SAS به‌صورت زیر استفاده شد:

$$GW = \begin{cases} a + bt_0 & t < t_0 \\ a + bt_0 & t > t_0 \end{cases} \quad (۴)$$

در این رابطه، GW وزن دانه، t زمان و b سرعت پرشدن دانه، t_0 پایان دوره پرشدن دانه و a عرض از مبدا رگرسیون است. این مدل تغییرات وزن دانه نسبت به زمان را به دو مرحله تفکیک می‌کند: مرحله اول که در حقیقت مرحله خطی پرشدن دانه است، وزن دانه تا رسیدن به حداکثر مقادیر خود در زمان (t_0) که در حقیقت زمان

رسیدگی وزنی است، به‌صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. شیب خط رگرسیون در این مرحله ($t < t_0$) سرعت پرشدن دانه را نشان می‌دهد (Ellis and Pieta-Filho, 1992). با پردازش این مدل بر کلیه داده‌ها ابتدا دو پارامتر مهم پرشدن دانه یعنی سرعت پرشدن دانه (b) و زمان رسیدگی وزنی (t_0) به‌دست آمد و سپس مقدار عددی (t_0) در بخش دوم رابطه قرار داده شد و GW یعنی وزن دانه محاسبه شد. برای تعیین دوره مؤثر پرشدن دانه از رابطه (۵) استفاده شد (Ellis and Pieta-Filho, 1992):

$$EFP = \frac{MGW}{b} \quad (۵)$$

در این رابطه، EFP دوره موثر پرشدن دانه، MGW حداکثر وزن دانه و b سرعت پرشدن دانه است.

برای برآورد میزان انتقال مجدد مواد از اندام‌های رویشی گیاه به دانه، در هر واحد آزمایشی (گلدان) بوته‌هایی مشابه و یکنواخت علامت‌گذاری و هر چهار روز یک‌بار از یک هفته قبل از پرشدن دانه تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیک، نمونه‌برداری انجام شد. بوته‌های برداشت شده به ساقه، برگ و دانه تفکیک و پس از خشک شدن در آون در دمای ۷۵ درجه سلسیوس به‌مدت ۴۸ ساعت، اندام‌های مختلف توزین شد و سپس میزان انتقال ماده خشک، سهم انتقال مجدد از بخش رویشی به دانه و میزان مشارکت ذخایر ساقه در عملکرد دانه با استفاده از روابط (۶) تا (۱۱) محاسبه شد (Barnett and Pearce, 1983). در این روابط، کاهش ناشی از تنفس در نظر گرفته نشده و فرض شده است که تنفس برای شرایط محیطی استفاده شده در این آزمایش یکسان بوده است. اهدایی و وینز (Ehdaie and Waines, 1993) نیز به‌منظور ارزیابی تنوع ژنتیکی انتقال مجدد در گندم، فرض مشابهی را به‌کار بردند:

$$DMT = DMA - DMM \quad (۶)$$

در این رابطه، DMT، DMA و DMM به‌ترتیب میزان انتقال ماده خشک کل، حداکثر میزان ماده خشک اندام هوایی در برداشت اول و میزان ماده خشک اندام هوایی (به‌جز دانه) در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک بر حسب گرم در بوته است.

$$CDMAG = \frac{DMT}{GY} \times 100 \quad (۷)$$

CDMAG سهم فرآیند انتقال مجدد ماده خشک کل در تشکیل دانه بر حسب درصد و GY عملکرد دانه بر حسب گرم در بوته است.

$$SDMT = SDMM - SDMA \quad (۸)$$

که در آن، SDMT، SDMA و SDMM به‌ترتیب میزان انتقال ماده خشک از ساقه، حداکثر وزن خشک ساقه در برداشت اول و وزن خشک ساقه در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک بر حسب گرم در بوته هستند.

$$CSAG = \frac{SDMT}{GY} \times 100 \quad (۹)$$

CSAG سهم ذخایر ساقه در عملکرد دانه بر حسب درصد است.

$$CP = GY - DMT \quad (۱۰)$$

CP میزان فتوسنتز جاری بر حسب گرم در بوته است.

$$CCPG = \frac{CP}{GY} \times 100 \quad (۱۱)$$

CCPG سهم نسبی فتوسنتز جاری در عملکرد دانه بر حسب درصد است.

تجزیه داده‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شد. برای مقایسه میانگین‌ها نیز از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

کلروفیل کل: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهم‌کنش توام تعدیل‌کننده‌های تنش (ورمی‌کمپوست، مایکوریزا، روی و پوترسین) در سطوح مختلف آبیاری بر محتوای کلروفیل کل در مراحل مختلف نمونه‌برداری در سطح احتمال پنج و یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیش‌ترین محتوای کلروفیل کل (۵/۱۵۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) در کاربرد توام تعدیل‌کننده‌های تنش در شرایط آبیاری کامل مشاهده شد، به‌طوری که کاربرد این ترکیب تیماری منجر به افزایش ۵۰/۴۳ درصدی کلروفیل کل نسبت به عدم کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی شد (جدول ۴). کلروفیل رنگدانه‌ای است که نقش اصلی آن دریافت انرژی نور برای استفاده در فتوسنتز است. مولکول کلروفیل از دو بخش (یک سر پورفیرین و یک هیدروکربن طویل با دنباله فیتول) تشکیل شده و پورفیرین از چهار حلقه پیرول حاوی نیتروژن که به‌صورت حلقوی قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. کامل‌کننده مولکول کلروفیل یک یون منیزیم است که با چهار اتم نیتروژن در مرکز حلقه تشکیل کلات می‌دهد. بنابراین، افزایش میزان کلروفیل تحت همزیستی

ریشه گیاه با قارچ مایکوریزا را احتمالاً می‌توان به اثر مثبت این قارچ در جذب عناصر غذایی مورد نیاز از قبیل نیتروژن و منیزیم نسبت داد (Begum *et al*., 2019). در همین راستا، یانگ و همکاران (Yang *et al*., 2014) افزایش محتوای کلروفیل در گیاهان تلقیح شده با مایکوریزا نسبت به گیاهان شاهد را به افزایش جذب آب و عناصر غذایی نسبت دادند. در واقع مایکوریزا از طریق نفوذ در حفرات بسیار ریز خاک، نفوذ ریشه‌های مویین گیاه به نقاط غیرقابل دسترس خاک را افزایش می‌دهد و فواید متعددی از جمله بهبود تغذیه و جذب آب، جذب کربن اضافی، افزایش ظرفیت انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی و افزایش تولید فیتوهورمون‌ها را برای گیاه درگیر فراهم می‌کند و موجب افزایش محتوای کلروفیل در غلات می‌شود (Buba and Muhammad, 2020).

از طرف دیگر، به‌نظر می‌رسد بخشی از بهبود محتوای کلروفیل می‌تواند ناشی از تاثیر ورمی‌کمپوست در افزایش دسترسی گیاه به نیتروژن، آهن و روی باشد (جدول ۲) که از عناصر اساسی در سنتز کلروفیل محسوب می‌شوند. نردی و همکاران (Nardi *et al*., 2002) نیز عنوان کردند که عناصر موجود در ورمی‌کمپوست مثل تنظیم‌کننده‌های رشد عمل می‌کنند و با خواص شبه سیتوکینینی خود می‌توانند موجب افزایش محتوای کلروفیل و جلوگیری از پیری برگ‌ها شوند. کاربرد روی به‌طور مستقیم بر تشکیل کلروفیل موثر نیست، ولی می‌تواند بر غلظت عناصر غذایی دیگر مانند آهن و منیزیم که قسمتی از مولکول کلروفیل هستند موثر باشد. در آزمایشی، محلول‌پاشی نانواکسید روی و منگنز موجب افزایش محتوای کلروفیل گیاه گلرنگ شد، که این امر می‌تواند به‌علت نقش این عناصر در متابولیسم نیتروژن و ساخت کلروفیل باشد (Movahhedi Dehnavi *et al*., 2004). از طرف دیگر، محلول‌پاشی پوترسین نیز با بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌تواند موجب افزایش محتوای کلروفیل کل شود (Abd Elbar *et al*., 2019). نتایج مشابهی در بررسی تاثیر محلول‌پاشی پوترسین بر بهبود محتوای کلروفیل برگ گندم توسط سایر محققان گزارش شده است (Mohseni Mohammadjanlou *et al*., 2021).

مولفه‌های پر شدن دانه: بر اساس نتایج تجزیه واریانس، برهم‌کنش تعدیل‌کننده‌های تنش و سطوح آبیاری بر مولفه‌های پر شدن دانه (حداکثر وزن دانه، سرعت پر شدن دانه، طول دوره و دوره موثر پرشدن دانه) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کاربرد توام تعدیل‌کننده‌های تنش در شرایط آبیاری کامل به‌ترتیب موجب افزایش ۴۸/۱، ۸/۴۳، ۲۴/۴ و ۳۷/۱۳ درصدی حداکثر وزن دانه، سرعت پرشدن دانه، طول دوره و دوره موثر پرشدن دانه نسبت به عدم کاربرد تعدیل‌کننده‌ها در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی شد (جدول ۴). به‌نظر می‌رسد افزایش محدودیت آبی، ضمن کاهش محتوای کلروفیل (جدول ۴) و فتوسنتز جاری (جدول۶)، موجب کاهش مولفه‌های پرشدن دانه (جدول ۴) می‌شود. بخش دیگری از کاهش وزن دانه در شرایط محدودیت آبی می‌تواند ناشی از کاهش طول دوره پر شدن دانه باشد، زیرا وزن دانه به مقدار زیادی وابسته به دوره پرشدن دانه است. بنابراین محدودیت آبی که موجب کاهش طول دوره پرشدن دانه می‌شود، به‌طور معنی‌داری وزن دانه را کاهش می‌دهد (Narimani *et al*., 2022).

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر تعدیل کننده‌های تنش بر محتوای کلروفیل کل و مولفه‌های پر شدن دانه جو در سطوح مختلف آبیاری

Table 3. Analysis of variance of the effect of stress modulators on chlorophyll content and grain filling components of barley in various irrigation levels

Source of variation	df	Chlorophyll content	Maximum grain weight	Grain filling rate	Grain filling period	Effective grain filling period
Replication	2	5.98^{**}	141.8^{**}	0.449^{**}	32.87^{**}	24.36^{**}
Irrigation (I)	2	6.99^{**}	829^{**}	0.621^{**}	123.26^{**}	150.68^{**}
Fertilizer (B)	3	1.13^{**}	114.9^{**}	0.108^{**}	14.64^{**}	20.98^{**}
Foliar application (F)	3	1.56^{**}	248.7^{**}	0.0006^{ns}	41.67^{**}	79.64^{**}
I×B	6	0.14^{**}	18.7^{*}	0.024^{ns}	3.54^{*}	3.3^{ns}
I×F	6	0.2^{**}	18.5^{*}	0.004^{*}	3.54^{*}	1.93^{ns}
B×F	9	0.099^{*}	31^{**}	0.005^{**}	5.51^{**}	4.84^{**}
I×B×F	18	0.21^{**}	18.4^{**}	0.0038^{*}	3.62^{**}	3.18^{*}
Error	94	0.047	6.84	0.001	1.58	1.51
CV (%)	-	5.09	4.94	2.4	3.41	4.07

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

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر تعدیل کننده‌های تنش بر محتوای کلروفیل کل و مولفه‌های پر شدن دانه جو در سطوح مختلف آبیاری

Table 4. Comparison of means of the effect of stress modulators on chlorophyll content and grain filling components of barley in various irrigation levels

Treatment †	Chlorophyll content (mg.g^{-1} FW)	Maximum grain weight (mg)	Grain filling rate (mg.day^{-1})	Grain filling period (day)	Effective grain filling period (day)	Estimated equation
$I_1\times B_1\times F_1$	4.307^{i-o}	53^{i-o}	1.79^{a-e}	36.65^{g-n}	29.53^{j-r}	Y=0.00179x-0.0129
$I_1\times B_2\times F_1$	4.395^{f-m}	54.6^{f-l}	1.76^{b-k}	37.83^{c-j}	31.17^{e-j}	Y=0.00179x-0.0120
$I_1\times B_3\times F_1$	3.9^{p-w}	57.8^{b-g}	1.83^{a}	38.77^{a-e}	31.59^{c-i}	Y=0.00174x-0.0112
$I_1\times B_4\times F_1$	4.836^{a-e}	50.4^{m-t}	1.73^{e-n}	35.54^{l-p}	29.04^{l-s}	Y=0.00173x-0.0102
$I_1\times B_1\times F_2$	4.696^{c-g}	56.3^{d-j}	1.78^{a-g}	38.15^{b-i}	31.58^{c-i}	Y=0.00176x-0.0120
$I_1\times B_2\times F_2$	4.026^{n-u}	53.8^{g-m}	1.8^{a-e}	36.4^{h-n}	29.96^{i-p}	Y=0.00179x-0.0117
$I_1\times B_3\times F_2$	4.722^{c-g}	60.1^{a-d}	1.83^{a}	39.3^{a-d}	32.81^{a-f}	Y=0.00181x-0.0116
$I_1\times B_4\times F_2$	5.076^{ab}	60.6^{a-c}	1.81^{a-c}	39.62^{a-c}	33.48^{a-c}	Y=0.00179x-0.0109
$I_1\times B_1\times F_3$	4.461^{f-k}	53.9^{g-m}	1.74^{d-m}	37.4^{d-l}	31.04^{f-l}	Y=0.00179x-0.0126
$I_1\times B_2\times F_3$	4.93^{a-e}	56. 8^{a-d}	1.82^{ab}	39.25^{a-d}	32.88^{a-f}	Y=0.00183x-0.0120
$I_1\times B_3\times F_3$	4.871^{a-e}	58.7^{a-f}	1.8^{a-d}	38.97^{a-e}	32.6^{b-g}	Y=0.00180x-0.0116
$I_1\times B_4\times F_3$	4.983^{a-c}	60.2^{a-d}	1.8^{a-d}	39.41^{a-d}	33.34^{a-d}	Y=0.00178x-0.0106
$I_1\times B_1\times F_4$	4.596^{e-j}	56.4^{c-j}	1.73^{e-n}	38.34^{b-h}	32.62^{b-g}	Y=0.00171x-0.0111
$I_1\times B_2\times F_4$	4.899^{a-e}	60.9^{ab}	1.8^{a-e}	39.62^{ab}	33.86^{b}	Y=0.00180x-0.0111
$I_1\times B_3\times F_4$	4.96^{a-d}	59.2^{a-e}	1.79^{a-f}	40^{ab}	33.03^{a-f}	Y=0.00179x-0.0109
$I_1\times B_4\times F_4$	5.151^{a}	62.5^{a}	1.8^{a-e}	40.57^{a}	34.79^{a}	Y=0.00179x-0.0103
$I_2\times B_1\times F_1$	3.732^{t-z}	48.5^{p-u}	1.74^{d-m}	35.2^{m-q}	27.91^{q-u}	Y=0.00174x-0.0129
$I_2\times B_2\times F_1$	3.794^{s-y}	51.2^{k-r}	1.77^{a-i}	36.12^{i-o}	28.91^{m-s}	Y=0.00173x-0.0122
$I_2\times B_3\times F_1$	3.988^{o-v}	49.7^{m-t}	1.74^{d-m}	35.67^{k-p}	28.53^{o-t}	Y=0.00175x-0.0126
$I_2\times B_4\times F_1$	4.146^{k-s}	49.2^{o-t}	1.75^{c-l}	35.22^{m-q}	28.05^{p-t}	Y=0.00163x-0.0092
$I_2\times B_1\times F_2$	4.017^{n-u}	49.4^{n-t}	1.72^{f-o}	35.57^{l-p}	28.62^{n-t}	Y=0.00177x-0.0130
$I_2\times B_2\times F_2$	4.673^{c-h}	56.4^{c-j}	1.79^{a-f}	38.39^{b-h}	31.49^{c-j}	Y=0.00178x-0.0125
$I_2\times B_3\times F_2$	4.425^{f-l}	48^{q-v}	1.69^{l-p}	34.76^{n-r}	28.4^{o-t}	Y=0.00175x-0.0117
$I_2\times B_4\times F_2$	4.341^{h-o}	54.3^{g-l}	1.75^{b-l}	37.64^{c-k}	31.05^{f-k}	Y=0.00176x-0.0109
$I_2\times B_1\times F_3$	4.083^{l-t}	50.9^{k-r}	1.75^{c-l}	36.19^{i-n}	29.11^{k-s}	Y=0.00174x-0.0127
$I_2\times B_2\times F_3$	4.329^{h-o}	55^{e-k}	1.75^{b-l}	37.99^{b-j}	31.42^{d-j}	Y=0.00167x-0.0106
$I_2\times B_3\times F_3$	4.369^{g-n}	50.5^{l-s}	1.7^{i-p}	35.98^{j-p}	29.6^{i-r}	Y=0.00170x-0.0111
$I_2\times B_4\times F_3$	4.642^{d-j}	48.8^{o-u}	1.68^{m-p}	34.95^{n-r}	29.04^{m-s}	Y=0.00177x-0.0108
$I_2\times B_1\times F_4$	4.118^{k-s}	49.3^{n-t}	1.65^{p}	35.48^{l-q}	29.86^{i-q}	Y=0.00174x-0.0126
$I_2\times B_2\times F_4$	4.222^{k-p}	57.5^{b-h}	1.77^{a-i}	38.66^{a-g}	32.49^{b-h}	Y=0.00175x-0.0118
$I_2\times B_3\times F_4$	4.652^{c-i}	57.9^{b-g}	1.77^{a-h}	38.69^{a-f}	32.63^{b-g}	Y=0.00166x-0.0097
$I_2\times B_4\times F_4$	4.748^{b-f}	59.1^{a-e}	1.79^{a-f}	39.11^{a-e}	3307^{a-e}	Y=0.00178x-0.0108
$I_3\times B_1\times F_1$	3.424^{z}	42.2^{w}	1.66^{op}	32.61^{s}	25.37^{w}	Y=0.00166x-0.0124
$I_3\times B_2\times F_1$	3.892^{p-x}	46.1^{t-w}	1.72^{f-o}	34.1^{o-s}	26.75^{t-w}	Y=0.00170x-0.0126
$I_3\times B_3\times F_1$	4.145^{k-s}	44.8^{u-w}	1.72^{g-o}	33.45^{q-s}	26.05^{u-w}	Y=0.00173x-0.0127
$I_3\times B_4\times F_1$	3.864^{q-x}	47.3^{r-v}	1.72^{f-o}	34.73^{n-r}	27.41^{s-v}	Y=0.00168x-0.0105
$I_3\times B_1\times F_2$	3.508^{yz}	43.9^{vw}	1.69^{k-p}	33.02^{rs}	25.9^{vw}	Y=0.00171x-0.0128
$I_3\times B_2\times F_2$	4.332^{h-o}	47.7^{r-v}	1.7^{j-p}	35.01^{n-q}	28^{p-u}	Y=0.00170x-0.0121
$I_3\times B_3\times F_2$	3.657^{v-z}	48.1^{p-v}	1.71^{h-p}	34.94^{n-r}	28.02^{p-u}	Y=0.00175x-0.0127
$I_3\times B_4\times F_2$	4.05^{m-u}	52^{k-q}	1.7^{i-p}	35.37^{l-q}	30.53^{h-n}	Y=0.00173x-0.0111
$I_3\times B_1\times F_3$	3.541^{x-z}	53. $^{h-n}$	1.76^{b-k}	37.74^{c-j}	30.28^{i-o}	Y=0.00172x-0.0128
$I_3\times B_2\times F_3$	4.411^{f-l}	51^{k-r}	1.76^{b-k}	36.12^{i-o}	28.96^{m-s}	Y=0.00172x-0.0122
$I_3\times B_3\times F_3$	3.613^{w-z}	53^{i-o}	1.78^{a-h}	37.15^{e-m}	29.75^{i-r}	Y=0.00176x-0.0131
$I_3\times B_4\times F_3$	4.178^{k-r}	49.1^{o-t}	1.7^{j-p}	35.3^{m-q}	28.82^{m-s}	Y=0.00170x-0.0107
$I_3\times B_1\times F_4$	3.696^{u-z}	46.3^{s-w}	1.66^{n-p}	33.97^{p-s}	27.81^{r-v}	Y=0.00173x-0.0129
$I_3\times B_2\times F_4$	3.829^{r-x}	52^{k-q}	1.72^{f-o}	36.43^{h-n}	30.14^{i-o}	Y=0.00171x-0.0113
$I_3\times B_3\times F_4$	4.187^{k-q}	52.3^{j-p}	1.7^{j-p}	36.72^{f-n}	30.73^{j-m}	Y=0.00170x-0.0112
$I_3\times B_4\times F_4$	4.277^{j-o}	57. 2^{b-i}	1.77^{a-j}	38.5^{b-g}	32.39^{b-g}	Y=0.00176x-0.0109
$LSD_{5\%}$	0.3539	0.0042	0.0001	2.0384	1.9978	-

Means followed by similar letter (s) in each column are not significantly different based on LSD test.

† I_1, I_2, and I_3, Normal irrigation, irrigation withholding at heading and booting stages, respectively; B_1, B_2, B_3, and B_4, no-application of biofertilizers, application of vermicompost, application of Mycorrhiza, and joint application of vermicompost and Mycorrhiza, respectively; F_1, F_2, F_3, and F_4, no-foliar application, foliar application of putrescine, foliar application of Zn nanooxide, and joint foliar application of putrescine and Zn nanooxide, respectively.

کاربرد ورمی‌کمپوست به‌دلیل برخورداری از عناصر غذایی موجود در آن (جدول ۱)، ضمن رشد بهتر گیاه و تولید مواد فتوسنتزی بیش‌تر و انتقال این مواد به سمت دانه‌ها، می‌تواند با افزایش فراهمی رطوبت خاک، موجب افزایش طول دوره پر شدن دانه شود (Javanmard *et al*., 2015). بخشی از بهبود مولفه‌های پر شدن دانه جو نیز می‌تواند ناشی از افزایش محتوای کلروفیل (جدول ۴) به‌واسطه کاربرد مایکوریزا در شرایط محدودیت آبی باشد. یقینی و همکاران (Yaghini *et al*., 2020) اظهار داشتند که کاربرد مایکوریزا در شرایط خشکی با افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و بهبود شرایط فتوسنتزی گیاه، موجب افزایش سرعت و طول دوره موثر پرشدن دانه گندم شد. بخش دیگری از بهبود مولفه‌های پرشدن دانه را می‌توان به افزایش فتوسنتز جاری و محتوای کلروفیل (جدول‌های ۴ و ۶) به‌واسطه محلول‌پاشی پوترسین نسبت داد. در این زمینه نریمانی و همکاران (Narimani *et al*., 2022) بیان کردند که کاربرد ورمی‌کمپوست و پوترسین تحت شرایط محدودیت آبی با فراهمی بیش‌تر عناصر غذایی و افزایش فتوسنتز جاری، موجب بهبود مولفه‌های پرشدن دانه تریتیکاله شد. محسنی محمدجانلو و همکاران (Mohseni Mohammadjanlou *et al*., 2021) نیز افزایش سرعت و طول دوره پر شدن دانه گندم در شرایط محدودیت آبی را به بهبود محتوای کلروفیل نسبت دادند. کاربرد پوترسین نیز در شرایط تنش خشکی می‌تواند با بهبود سرعت پرشدن دانه، موجب افزایش عملکرد دانه شود (Mohseni Mohammadjanlou *et al*., 2021). مصرف نانواکسید روی نیز با افزایش سرعت پر شدن دانه می‌تواند منجر به افزایش وزن دانه‌ها و بهبود عملکرد دانه شود (Shojaei and Makarian, 2015).

انتقال ماده خشک و سهم آن در عملکرد دانه: برهم‌کنش تعدیل‌کننده‌های تنش و سطوح آبیاری بر انتقال ماده خشک از اندام هوایی و ساقه و سهم این فرآیندها در عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش تحت شرایط محدودیت شدید آبی (قطع آبیاری در مراحل آبستنی)، انتقال مجدد ماده خشک از اندام هوایی (۰/۵۵۱ گرم در بوته) و ساقه (۰/۳۸۲ گرم در بوته) و سهم این فرآیندها در عملکرد دانه را به‌ترتیب ۳۰/۲۳ و ۲۰/۹۸ درصد کاهش داد، و از کاهش به‌ترتیب ۲۲/۳۲، ۲۵/۶۵، ۲۵/۹۲ و ۵۶/۹۵ درصدی این صفات نسبت به عدم کاربرد کودهای زیستی و محلول‌پاشی تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی برخوردار بود (جدول ۶). به‌نظر می‌رسد کاربرد قارچ مایکوریزا در شرایط محدودیت آبی با بهبود محتوای کلروفیل برگ پرچم و فتوسنتز جاری (جدول ۶)، موجب کاهش انتقال ماده خشک از ساقه و اندام هوایی و سهم این فرآیندها در عملکرد دانه جو (جدول ۶) شود. عبادی و همکاران (Ebadi *et al*., 2019) نیز بیان کردند که کاربرد قارچ مایکوریزا تحت شرایط تنش خشکی با بهبود شاخص کلروفیل و فتوسنتز جاری منجر به کاهش انتقال ماده خشک از ساقه و اندام هوایی و سهم این فرآیندها در عملکرد دانه جو شد. نظری و همکاران (Nazari *et al*., 2021) نیز گزارش کردند که کاربرد توام ورمی‌کمپوست و مایکوریزا در شرایط محدودیت آبی با تامین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه از جمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم و افزایش فتوسنتز جاری، موجب کاهش انتقال ماده خشک و سهم این فرآیند در عملکرد دانه تریتیکاله شد. در آزمایش نریمانی و همکاران (Narimani *et al*., 2022) نیز کاربرد توام ورمی‌کمپوست و پوترسین با افزایش فراهمی عناصر غذایی و بهبود فتوسنتز جاری موجب کاهش انتقال ماده خشک از ساقه و اندام هوایی و سهم این فرآیندها در عملکرد دانه تریتیکاله تحت شرایط محدودیت آبی شد.

بخش دیگری از کاهش انتقال ماده خشک از ساقه و اندام هوایی به‌واسطه محلول‌پاشی پوترسین را می‌توان به جلوگیری از تولید آنزیم‌های لازم برای سنتز اتیلن و تاخیر در پیری برگ‌ها (به‌عنوان یک منبع با ثبات برای فتوسنتز جاری) و افزایش میزان فتوسنتز برگ نسبت داد. در چنین شرایطی، میزان تثبیت کربن بالا است و گیاه برای انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌ها، فرصت بیش‌تری دارد که نتیجه آن، افزایش طول دوره پر شدن دانه و کاهش انتقال ماده خشک است (Emadi *et al*., 2013). همچنین، تنش خشکی به‌دلیل کاهش سطح برگ موجب کاهش فتوسنتز جاری و سهم این فرایند در عملکرد دانه می‌شود که در چنین شرایطی در اغلب موارد، گیاه انتقال مجدد ماده خشک از ساقه و اندام هوایی به دانه را افزایش می‌دهد تا شاید بتواند از کاهش بیش‌تر عملکرد دانه جلوگیری کند. البته کاربرد تعدیل کننده‌های تنش (ورمی‌کمپوست و مایکوریزا) در شرایط محدودیت آبی، از طریق بهبود فتوسنتز جاری و سهم این فرآیند در عملکرد دانه، موجب

می‌شود سهم فرایند انتقال مجدد ماده خشک به عملکرد دانه کاهش یابد (Nazari *et al*., 2021). نریمانی و همکاران (Narimani *et al*., 2022) اظهار داشتند که کاربرد کودهای زیستی و محلول‌پاشی پوترسین در شرایط محدودیت آبی، از طریق بهبود ویژگی‌های ریشه و افزایش فتوسنتز جاری، موجب کاهش انتقال ماده خشک تریتیکاله در شرایط محدودیت آبی شد.

فتوسنتز جاری و سهم آن در عملکرد دانه: براساس نتایج تجزیه واریانس برهم‌کنش تعدیل‌کننده‌های تنش و سطوح آبیاری بر فتوسنتز جاری و سهم این فرآیند در عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کاربرد توام تعدیل‌کننده‌های تنش در شرایط آبیاری کامل به‌ترتیب موجب افزایش ۹۵/۵۳ و ۴۰/۷۱ درصدی میزان فتوسنتز جاری و سهم این فرآیند در عملکرد دانه نسبت به عدم کاربرد این تعدیل‌کننده‌های تنش در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی شد (جدول ۶).

خشکی اثر فیزیولوژیکی و بیولوژیکی گوناگونی در گیاه ایجاد می‌کند و می‌تواند منجر به ممانعت از فرآیندهای بیوشیمیایی مهمی نظیر فتوسنتز، تنفس و آسیمیلاسیون مواد غذایی گیاهی شود. یکی از مهم‌ترین تاثیرات فیزیولوژیک تنش آبی، محدودیت در فتوسنتز گیاه است (Si *et al*., 2020). عملکرد دانه در غلات تابع سه منبع فتوسنتز جاری، انتقال آسیمیلات‌های ذخیره شده قبل از گلدهی به دانه و آسیمیلات‌های ذخیره شده موقت در ساقه بعد از گلدهی است. ذخایر موجود در اندام‌های گیاهی در مرحله پرشدن دانه که فتوسنتز جاری قادر به تامین همه نیازهای مخزن نیست، می‌تواند مجدداً طی فرآیند انتقال مجدد به دانه منتقل شود (Modhej *et al*., 2013). افزایش عناصر غذایی در خاک تیمار شده با ورمی‌کمپوست، ضمن افزایش عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن، موجب تعدیل pH خاک و افزایش جذب بسیاری از ریزمغذی‌ها می‌شود که در ساختار کلروفیل، سیتوکروم‌ها و چرخه فتوسنتزی و در نهایت منجر به افزایش فعالیت آنزیم روبیسکو و بهبود فتوسنتز و کربوهیدرات‌ها در گیاه می‌شوند (Mohammadi Kalesarlou *et al*., 2021). بنابراین بخشی از افزایش سهم فتوسنتز جاری می‌تواند ناشی از وجود مقادیر قابل توجه و بالای عناصر غذایی در ورمی‌کمپوست مورد استفاده باشد (جدول ۲).

از طرف دیگر، به‌نظر می‌رسد بخشی از بهبود فرایند فتوسنتزی گیاه می‌تواند ناشی از همزیستی مایکوریزا با ریشه گیاه در جهت بهبود جذب فسفر باشد. زمانی که گیاهان در شرایط فسفر کافی رشد می‌کنند، فتوسنتز برگ، توسط ATP در دسترس یا فعالیت روبیسکو محدود نمی‌شوند. بنابراین با افزایش اندام‌های مخزن، سرعت خروج تریوز فسفات را تحریک می‌کند. این عمل چرخه مجدد ارتو فسفات را به‌سمت کلروپلاست تقویت می‌کند و فتوسنتز را بهبود می‌بخشد. مایکوریزا جذب عناصر غذایی از خاک را در شرایط کم‌آبی بهبود می‌بخشد و می‌تواند تولید متابولیت‌ها را تغییر دهد و موجب بهبود سیستم فتوسنتزی و انتقال مواد غذایی به گیاه شود (Nazari *et al*., 2021). همچنین مایکوریزا می‌تواند با افزایش ظرفیت جذب از طریق برقراری تعادل اسمزی مناسب، سبب حفظ روند فتوسنتز در گیاهان شود که نتیجه آن افزایش رشد گیاه و رقیق شدن املاح و کاهش سمیت یون‌های نمک است (Kumar *et al*., 2015).

کاربرد پوترسین نیز در شرایط محدودیت آبی می‌تواند سرعت فتوسنتز را در گیاهان افزایش دهد. گزارش‌های موجود نشان می‌دهند که استفاده از پوترسین در شرایط تنش کم‌آبی، با بهبود محتوای آب گیاه، افزایش محتوای کلروفیل، افزایش انتقال الکترون و بهبود فعالیت آنزیم روبیسکو سبب افزایش سرعت فتوسنتز در گیاه جو شد (Skowron and Trojak, 2021). همچنین پوترسین با جلوگیری از تولید آنزیم‌های لازم جهت سنتز اتیلن و تاخیر در پیری برگ‌ها، موجب افزایش میزان فتوسنتز برگ و بهبود انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌های تریتیکاله شد (Narimani *et al*., 2022). علاوه بر این، شجاعی و مکاریان (Shojaei and Makarian, 2015) اثر اکسید و نانواکسید روی را بر عملکرد و اجزای عملکرد لوبیا تحت شرایط تنش خشکی مطالعه و گزارش کردند که کاربرد نانواکسید روی تحت شرایط تنش خشکی از طریق بهبود فرآیندهای فتوسنتزی گیاه، سبب تجمع کربوهیدرات‌ها و افزایش وزن دانه و بهبود عملکرد گیاه لوبیا شد.

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر تعدیل کننده‌های تنش بر انتقال ماده خشک و عملکرد دانه جو در سطوح مختلف آبیاری

Table 5. Analysis of variance of the effect of stress modulators on dry matter remobilization and grain yield of barley in various irrigation levels

Source of variation	df	Dry matter remobilization from shoot	Contribution of shoots remobilization in grain yield	Dry matter remobilization from stem	Contribution of stem reserve in grain yield	Current photosynthesis	Contribution of current photosynthesis in grain yield	Grain yield
Replication	2	0.0339^{**}	5.5^{ns}	0.0397^{**}	39.3^{**}	0.279^{**}	5.56^{ns}	0.504^{**}
Irrigation (I)	2	0.0507^{**}	1076.8^{**}	0.0271^{**}	552.9^{**}	1.731^{**}	1076.83^{**}	1.19^{**}
Biofertilizer (B)	3	0.0117^{**}	200.2^{**}	0.0065^{**}	104.5^{**}	0.262^{**}	200.22^{**}	0.163^{**}
Foliar application (F)	3	0.0173^{**}	226.7^{**}	0.01^{**}	126.3^{**}	0.28^{**}	226.7^{**}	0.164^{**}
I×B	6	0.0009^{ns}	8.8^{ns}	0.0004^{ns}	4.24^{ns}	0.022^{ns}	8.82^{ns}	0.018^{*}
I×F	6	0.0017^{*}	17.5^{ns}	0.0012^{**}	15.1^{**}	0.023^{*}	17.51^{ns}	0.018^{*}
B×F	9	0.0016^{*}	7.9^{ns}	0.001^{**}	4ns	0.006^{ns}	7.95^{ns}	0.002^{ns}
I×B×F	18	0.0021^{*}	27.1^{**}	0.0012^{**}	11.3^{**}	0.028^{**}	27.19^{**}	0.018^{**}
Error	94	0.0006	8.2	0.0003	4	0.01	8.24	0.0072
CV (%)	-	4.45	8.47	4.55	8.41	8.79	4.34	4.83

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

عملکرد دانه: نتایج مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که بیش‌ترین عملکرد دانه (۲/۰۲۴ گرم در بوته) در کاربرد توام تعدیل‌کننده‌های تنش در شرایط آبیاری کامل مشاهده شد (جدول ۶)، به‌طوری که این ترکیب تیماری منجر به افزایش ۳۸/۹۱ درصدی عملکرد دانه نسبت به عدم کاربرد تعدیل‌کننده‌ها در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی شد (جدول ۶). بخشی از افزایش عملکرد دانه در کاربرد تعدیل کننده‌های تنش می‌تواند ناشی از اثر این عوامل بر بهبود مولفه‌های پرشدن دانه باشد (جدول ۴)، زیرا ترکیبات تیماری دارای مقادیر بیش‌تر مولفه‌های پرشدن دانه، از عملکرد دانه بیش‌تری نیز برخوردار بودند (جدول ۶). گزارش شده است که تنش خشکی در مرحله پرشدن دانه، به‌دلیل کاهش میزان فتوسنتز موجب کاهش مقدار مواد فتوسنتزی می‌شود که در نهایت با پر نشدن تعدادی از دانه‌ها و یا کوچک ماندن آن‌ها، موجب کاهش عملکرد دانه تریتیکاله می‌شود (Nazari *et al*., 2021). همچنین ایشان اظهار داشتند که کمبود آب در گیاه موجب کاهش فتوسنتز جاری و انتقال مواد به دانه‌ها و کاهش عملکرد دانه تریتیکاله شد. به‌نظر می‌رسد با مصرف ورمی‌کمپوست، ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک بهبود می‌یابد و بنابراین موجب رشد بهتر گیاه و تولید بیش‌تر مواد فتوسنتزی و انتقال آنها به‌سمت دانه‌ها می‌شود. همچنین با توجه به فراهمی بیش‌تر رطوبت خاک و افزایش طول دوره پرشدن دانه، عملکرد دانه غلات افزایش می‌یابد (Javanmard *et al*., 2015). محمدی کله‌سرلو و همکاران (Mohammadi Kalesarlou *et al*., 2021) اظهار داشتند که کاربرد ورمی‌کمپوست از طریق افزایش محتوای رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی و بهبود سرعت و طول دوره پر شدن دانه، موجب افزایش عملکرد و اجزای عملکرد تریتیکاله شد.

در آزمایشی، کاربرد قارچ مایکوریزا در شرایط تنش خشکی از طریق بهبود محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و افزایش سرعت و طول دوره پرشدن دانه، موجب افزایش عملکرد دانه گندم شد (Yaghini *et al*., 2020). آقایی و همکاران (Aghaei *et al*., 2020) نیز افزایش عملکرد دانه گندم به‌واسطه کاربرد قارچ مایکوریزا در شرایط تنش خشکی را به افزایش محتوای کلروفیل و سرعت و طول دوره پرشدن دانه نسبت دادند. علاوه بر این، نتایج آزمایشات محسنی محمدجانلو و همکاران (Mohseni Mohammadjanlou *et al*., 2021) در گندم نشان داد که محلول‌پاشی پوترسین تحت شرایط محدودیت آبی، از طریق افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، ضمن بهبود سرعت و طول دوره پرشدن دانه، موجب افزایش عملکرد دانه گندم شد. نتایج آزمایش دیگری در برنج نشان داد که مصرف نانواکسید روی، علاوه بر اینکه موجب افزایش هورمون‌های تولیدی توسط گیاه شد، سبب بهبود متابولیسم عناصر غذایی اصلی و تحریک مولفه‌های پرشدن دانه و در نهایت افزایش عملکرد دانه در گیاه برنج شد (Wijebandara *et al*., 2009).

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر تعدیل کننده‌های تنش بر مولفه‌های پر شدن دانه جو در سطوح مختلف آبیاری

Table 6. Comparison of means of the effect of stress modulators on grain filling components of barley at various irrigation levels

Treatment†	Dry matter remobilization from shoot (g/plant)	Contribution of shoot remobilization in grain yield (%)	Dry matter remobilization from stem	Contribution of stem reserve in grain yield (%)	Current photosynthesis (g/plant)	Contribution of current photosynthesis in grain yield (%)	Grain yield (g/plant)
$I_1\times B_1\times F_1$	0.59^{f-p}	33.37^{j-p}	0.415^{f-o}	23.45^{j-r}	1.181^{g-n}	66.62^{h-n}	1.772^{h-o}
$I_1\times B_2\times F_1$	0.621^{b-h}	33.74^{j-p}	0.431^{c-k}	23.38^{k-r}	1.228^{g-k}	66.25^{h-n}	1.85^{d-j}
$I_1\times B_3\times F_1$	0.553^{p-y}	29.44^{p-v}	0.385^{p-y}	20.45^{r-v}	1.33^{c-g}	70.55^{b-h}	1.883^{b-h}
$I_1\times B_4\times F_1$	0.537^{t-z}	27.54^{r-w}	0.376^{s-y}	19.23^{t-w}	1.417^{a-f}	72.45^{a-f}	1.954^{a-e}
$I_1\times B_1\times F_2$	0.559^{n-w}	30.91^{m-t}	0.39^{o-w}	21.55^{o-u}	1.252^{f-j}	69.08^{d-k}	1.811^{f-l}
$I_1\times B_2\times F_2$	0.524^{w-a}	26.41^{t-w}	0.366^{v-z}	18.44^{u-w}	1.462^{a-d}	73.58^{a-d}	1.986^{a-d}
$I_1\times B_3\times F_2$	0.514^{x-a}	25.63^{u-w}	0.36^{w-z}	17.93^{vw}	1.494^{a-c}	74.36^{a-c}	2.009^{ab}
$I_1\times B_4\times F_2$	0.509^{za}	25.36^{vw}	0.356^{yz}	17.73^{vw}	1.497^{ab}	74.63^{ab}	2.006^{a-c}
$I_1\times B_1\times F_3$	0.619^{b-i}	38.97^{b-h}	0.438^{b-h}	27.52^{c-f}	1.03^{n-u}	61.02^{p-v}	1.649^{n-w}
$I_1\times B_2\times F_3$	0.543^{r-z}	27.64^{q-w}	0.381^{q-y}	19.35^{s-w}	1.426^{a-e}	72.35^{a-g}	1.97^{a-d}
$I_1\times B_3\times F_3$	0.612^{b-l}	31.94^{l-r}	0.436^{b-i}	22.75^{l-r}	1.318^{d-h}	68.05^{f-l}	1.93^{a-g}
$I_1\times B_4\times F_3$	0.527^{v-a}	26.72^{t-w}	0.369^{u-z}	18.7^{u-w}	1.448^{a-d}	73.27^{a-d}	1.976^{a-d}
$I_1\times B_1\times F_4$	0.54^{s-z}	27.85^{q-w}	0.378^{r-y}	19.48^{s-w}	1.402^{a-f}	72.14^{a-g}	1.943^{a-f}
$I_1\times B_2\times F_4$	0.517^{w-a}	25.93^{u-w}	0.364^{w-z}	18.23^{vw}	1.479^{a-d}	74.06^{a-c}	1.996^{a-c}
$I_1\times B_3\times F_4$	0.512^{y-a}	25.38^{vw}	0.358^{x-z}	17.74^{vw}	1.507^{a}	74.61^{ab}	2.02^{ab}
$I_1\times B_4\times F_4$	0.493^{a}	24.34^{w}	0.344^{z}	16.97^{w}	1.531^{a}	75.65^{a}	2.024^{a}
$I_2\times B_1\times F_1$	0.649^{ab}	41.28^{b-d}	0.457^{a-d}	29.07^{b-d}	0.923^{r-v}	58.71^{t-v}	1.571^{s-z}
$I_2\times B_2\times F_1$	0.617^{b-k}	37.92^{b-j}	0.433^{b-j}	26.65^{c-j}	1.01^{o-u}	62.07^{n-v}	1.627^{p-x}
$I_2\times B_3\times F_1$	0.607^{b-m}	36.71^{d-k}	0.427^{d-m}	25.85^{d-l}	1.046^{n-u}	63.28^{m-t}	1.654^{n-w}
$I_2\times B_4\times F_1$	0.609^{b-l}	35.47^{f-m}	0.427^{d-m}	24.87^{f-n}	1.11^{i-q}	64.53^{k-r}	1.719^{j-r}
$I_2\times B_1\times F_2$	0.623^{b-h}	38.8^{b-h}	0.439^{b-h}	27.34^{c-g}	0.983^{p-u}	61.19^{p-v}	1.606^{q-y}
$I_2\times B_2\times F_2$	0.581^{h-s}	35.42^{f-m}	0.407^{i-r}	24.77^{f-o}	1.067^{k-s}	64.58^{l-r}	1.648^{n-w}
$I_2\times B_3\times F_2$	0.584^{g-r}	33.54^{j-p}	0.409^{h-q}	23.5^{i-r}	1.16^{h-o}	66.45^{h-n}	1.744^{i-p}
$I_2\times B_4\times F_2$	0.566^{m-v}	29.81^{o-v}	0.395^{n-v}	20.77^{q-v}	1.336^{b-g}	70.18^{b-i}	1.902^{a-h}
$I_2\times B_1\times F_3$	0.605^{c-m}	36.39^{e-k}	0.425^{e-m}	25.57^{e-m}	1.059^{l-t}	63.6^{l-s}	1.664^{m-v}
$I_2\times B_2\times F_3$	0.587^{f-q}	33.97^{i-p}	0.413^{g-p}	23.87^{h-q}	1.143^{i-p}	66.02^{h-o}	1.731^{j-r}
$I_2\times B_3\times F_3$	0.617^{b-j}	38.61^{b-i}	0.432^{c-k}	26.94^{c-h}	1.017^{n-u}	61.38^{o-v}	1.635^{o-w}
$I_2\times B_4\times F_3$	0.575^{j-u}	32.29^{k-q}	0.402^{k-t}	22.58^{m-s}	1.208^{g-m}	67.7^{g-m}	1.784^{h-n}
$I_2\times B_1\times F_4$	0.598^{d-o}	35.42^{f-m}	0.42^{f-n}	24.88^{f-n}	1.091^{j-q}	64.57^{k-r}	1.69^{k-t}
$I_2\times B_2\times F_4$	0.556^{o-x}	29.79^{o-v}	0.387^{o-x}	20.72^{q-v}	1.315^{d-h}	70.2^{b-i}	1.871^{c-i}
$I_2\times B_3\times F_4$	0.572^{l-u}	31.86^{l-s}	0.399^{m-u}	22.25^{n-t}	1.225^{g-l}	68.13^{e-l}	1.797^{g-m}
$I_2\times B_4\times F_4$	0.534^{u-a}	27.27^{s-w}	0.374^{t-z}	19.06^{t-w}	1.426^{a-e}	72.72^{a-e}	1.96^{a-e}
$I_3\times B_1\times F_1$	0.674^{a}	46.23^{a}	0.48^{a}	32.93^{a}	0.783^{v}	53.76^{w}	1.457^{z}
$I_3\times B_2\times F_1$	0.575^{k-u}	38.53^{b-i}	0.4^{l-t}	26.82^{c-h}	0.912^{s-v}	61.46^{o-v}	1.487^{yz}
$I_3\times B_3\times F_1$	0.599^{d-n}	40.03^{b-f}	0.462^{ab}	30.92^{ab}	0.895^{t-v}	59.96^{r-v}	1.494^{y-z}
$I_3\times B_4\times F_1$	0.642^{a-c}	41.99^{ab}	0.455^{a-e}	29.73^{a-c}	0.887^{uv}	58^{vw}	1.529^{v-z}
$I_3\times B_1\times F_2$	0.626^{b-g}	39.28^{b-g}	0.441^{b-g}	27.69^{b-f}	0.968^{q-u}	60.71^{q-v}	1.594^{r-z}
$I_3\times B_2\times F_2$	0.593^{e-p}	35^{g-m}	0.46^{a-c}	27.1^{c-h}	1.119^{i-q}	64.99^{k-q}	1.712^{k-r}
$I_3\times B_3\times F_2$	0.635^{a-e}	40.8^{b-e}	0.415^{f-o}	26.63^{c-k}	0.922^{r-v}	59.19^{s-v}	1.558^{t-z}
$I_3\times B_4\times F_2$	0.602^{c-m}	37.27^{c-j}	0.423^{f-n}	26.17^{d-k}	1.014^{n-u}	62.72^{n-u}	1.617^{p-y}
$I_3\times B_1\times F_3$	0.588^{f-q}	34.4^{h-o}	0.41^{h-q}	24.06^{h-p}	1.151^{h-o}	65.6^{i-p}	1.74^{i-q}
$I_3\times B_2\times F_3$	0.639^{a-d}	41.41^{bc}	0.413^{g-p}	26.7^{1c-i}	0.905^{s-v}	58.58^{uv}	1.545^{u-z}
$I_3\times B_3\times F_3$	0.629^{b-f}	37.18^{c-j}	0.445^{b-f}	26.31^{d-k}	1.067^{k-s}	62.81^{n-u}	1.696^{k-s}
$I_3\times B_4\times F_3$	0.62^{b-i}	36.38^{e-l}	0.436^{b-i}	25.63^{e-m}	1.086^{j-r}	63.61^{l-s}	1.706^{k-s}
$I_3\times B_1\times F_4$	0.62^{b-i}	40.72^{b-e}	0.436^{b-i}	28.62^{b-e}	0.903^{s-v}	59.28^{s-v}	1.523^{w-z}
$I_3\times B_2\times F_4$	0.612^{b-l}	37.29^{c-j}	0.43^{d-l}	26.19^{d-k}	1.031^{n-u}	62.7^{n-u}	1.643^{o-w}
$I_3\times B_3\times F_4$	0.578^{i-t}	34.55^{h-n}	0.405^{j-s}	24.18^{g-p}	1.096^{j-q}	65.44^{j-p}	1.675^{l-u}
$I_3\times B_4\times F_4$	0.551^{q-z}	30.23^{n-u}	0.382^{q-y}	20.98^{p-v}	1.273^{e-i}	70.18^{b-i}	1.824^{e-k}
LSD	0.0422	4.6557	0.0303	3.2488	0.1668	4.6557	0.1376

Means followed by similar letter (s) in each column are not significantly different based on LSD test.

† I_1, I_2, and I_3, Normal irrigation, irrigation withholding at heading and booting stages, respectively; B_1, B_2, B_3, and B_4, no-application of biofertilizers, application of vermicompost, application of Mycorrhiza, and joint application of vermicompost and Mycorrhiza, respectively; F_1, F_2, F_3, and F_4, no-foliar application, foliar application of putrescine, foliar application of Zn nanooxide, and joint foliar application of putrescine and Zn nanooxide, respectively.

نتیجه گیری کلی

با توجه به نتایج این آزمایش، به‌نظر می‌رسد که کاربرد کودهای زیستی و محلول‌پاشی پوترسین و نانواکسید روی در شرایط محدودیت آبی، با تعدیل اثرات تنش و بهبود محتوای کلروفیل کل و فتوسنتز جاری، می‌تواند موجب افزایش عملکرد دانه جو شود. در مجموع نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که کاربرد تعدیل کننده‌های تنش (ورمی‌کمپوست و مایکوریزا) به‌همراه محلول‌پاشی پوترسین در شرایط محدودیت آبی موجب افزایش حداکثر وزن دانه (۴۸/۱ درصد)، طول دوره پر شدن دانه (۲۴/۴ درصد)، دوره موثر پر شدن دانه (۳۷/۱۳ درصد)، سهم فتوسنتز جاری در عملکرد دانه (۴۰/۷۱ درصد) و عملکرد دانه (۳۷/۹۱ درصد) نسبت به شرایط عدم کاربرد کودهای زیستی و محلول‌پاشی پوترسین و نانواکسید روی در تیمار قطع آبیاری در مرحله آبستنی در گیاه جو شد. بنابراین، کاربرد ورمی‌کمپوست و مایکوریزا و نیز محلول‌پاشی پوترسین و نانواکسید روی به‌منظور افزایش عملکرد دانه جو تحت شرایط محدودیت آبی پیشنهاد می‌شود.

تضاد منافع

نویسنده (گان) تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هر گونه روابط تجاری یا مالی که می‌تواتند به‌عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسنده (گان) اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده که تاکنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده است.

اجازه انتشار مقاله

نویسنده (گان) با چاپ این مقاله به‌صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

References

Abd Elbar, O.H., Farag, R.E. and Shehata, S.A. 2019. Effect of putrescine application on some growth, biochemical and anatomical characteristics of *Thymus vulgaris* L. under drought stress. *Annals of Agricultural Sciences*, 64(2), pp. 129-137. https://doi.org/10.1016/j.aoas.2019.10.001.

Aghaei, F., Seyed Sharifi, R. and Narimani, H. 2020. Evaluation of yield, chlorophyll content and grain filling components of wheat under salinity soil conditions and application of uniconazole and biofertilizers. *Journal of Crops Improvement*, 22(2), pp. 269-282. [In Persian]. https://doi.org/10.22059/jci.2020.286632.2252.

Arnon, D.I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Journal of Plant Physiology*, 24, pp. 1-15.

Bahrani, A., Heidari Sharif Abad, H., Tahmasebi Sarvestani, Z., Moafpourian, Gh. and Ayneh Band, A. 2011. Remobilization of dry matter in wheat: Effects of nitrogen application and post-anthesis water deficit during grain filling. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 39(4), pp. 279-293. https://doi.org/10.1080/01140671.2011.599397.

Barnett, K.H. and Pearce, P.B. 1983. Source-sink ratio alteration and its effect on physiological parameters in maize. *Crop Science*, 23(2), pp. 101-109. https://doi.org/10.2135/cropsci1983.0011183X002300020028x.

Begum, N., Qin, C., Ahanger, M.A., Raza, S., Khan, M.I., Ashraf, M., Ahmed, N. and 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.

Buba, T. and Muhammad, S.Y. 2020. Combine effects of soil nutrient levels and mycorrhiza inoculums from soils under parkia biglobosa and tamarindus indica on chlorophyll content of some cereal and legume crops. *Scientific African*, 8, e00369. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00369.

Chen, D., Shao, Q., Yin, L., Younis, A. and Zheng, B. 2019. Polyamine function in plants: Metabolism, regulation on development, and roles in abiotic stress responses. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1945. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01945.

Ebadi, N., Seyed Sharifi, R. and Narimani, H., 2019. Effects of supplementary irrigation and biofertilizers on grain yield, dry matter remobilization and some physiological traits of barley (*Hordeum vulgare* L.) under rainfed condition. *Journal of Crop Production and Processing*, 10(2), pp. 123-135. [In Persian]. https://doi.org/10.47176/jcpp.10.2.25857.

Ehdaie, B. and Waines, J.G. 1993. Variation in water use efficiency and its components in wheat. I. Well-watered pot experiments. *Crop Science*, 33(2), pp. 1617-1626. https://doi.org/10.2135/cropsci1993.0011183X003300020016x.

Ellis, R.H. and Pieta-Filho, C. 1992. The development of seed quality in spring and winter cultivars of barley and wheat. *Seed Science Research*, 2(1), pp. 9-15. https://doi.org/10.1017/S0960258500001057.

Emadi, M.S., Hasibi, P. and Azimi, A. 2013. Effect of foliar application of putrescine and nutrient elements on grain yield and quality of two bread wheat cultivars. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 15(3), pp. 247-261. [In Persian]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1392.15.3.5.7.

Feizi Asl, V., Valizadeh, G.R., Toshih, V., Talie, A.A. and Vellis, B. 2004. Determination of critical levels of soil micronutrients for dryland wheat in the North West of Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 5(4), pp. 236-249. [In Persian]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1382.5.4.1.5.

Javanmard, A., Nazari, B., Jalilian, A. and Dashti, Sh. 2015. Response of wheat to vermicompost and chemical fertilizer residual in soil. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 25(4), pp. 87-103. [In Persian].

Kaya, C., Akram, N., Ashraf, M. and Sonmez, O. 2018. Exogenous application of humic acid mitigates salinitystress in maize (*Zea mays* L) plants by improving some key physicobiochemical attributes. *Cereal Research Communications*, 46, pp. 67-78. https://doi.org/10.1556/0806.45.2017.064.

Kheirizadeh Arough, Y., Seyed Sharifi, R., Sedghi, M. and Barmaki, M. 2017. Effect of stabilizer water deficit (biofertilizers and nano zinc oxide) on effective traits at accumulative assimilate of grain of *triticale* under withholding. *Journal of Plant Ecophysiology*, 9(28), pp. 31-47. [In Persian]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085958.1396.9.28.4.4.

Kumar, A., Sharma, S., Mishra, S. and Dames, J.F. 2015. *Arbuscular mycorrhizal* inoculation improves growth and antioxidative response of *Jatropha curcas* (L.) under Na_2SO_4 salt stress. *Plant Biosystems*, 149(2), pp. 260-269. https://doi.org/10.1080/11263504.2013.845268.

Malakouti, M., Bybodi, A., Ranjbar, R. and Nouri, A. 2005. The effect of different levels of phosphorus and zinc on cadmium content of two potato varieties in Sarab, East Azarbayjan. *Iranian Journal of Soil and Water Sciences*, 15(1), pp. 25-38.

Mantri, N., Patade, V., Penna, S., Ford, R. and Pang, E., 2012. Abiotic Stress Responses in Plants: Present and Future. In: Ahmad, P. and Prasad, M.N.V. (Eds.). Abiotic Stress Responses in Plants: Metabolism, Productivity and Sustainability. Springer, NewYork, NY. pp. 1-19. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0634-1.

Modhej, A., Naderi, A., Emam, Y., Aynehband, A., Noormohammadi, G., Kaivan, E. 2013. Evaluation of the effect of post-anthesis heat stress and nitrogen levels on grain yield and grain growth of wheat genotypes under Khuzestan conditions. *Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi)*, 92, pp. 9-17. [In Persian].

Mohammadi Kalesarlou, S., Seyed Sharifi, R., Sedghi, M., Narimani, H. and Khalilzadeh, R. 2021. Effects of salinity, vermicompost, humic acid and seed inoculation with flavobacterim on grain filling of triticale. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(2), pp. 251-269. [In Persian]. https://doi.org/10.22034/SAPS.2021.13108.

Mohseni Mohammadjanlou, A., Seyed Sharifi, R. and Khomari, S. 2021. Effects of holding irrigation at reproductive stages and putrescine and biofertilizers application on grain filling period, chlorophyll content and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 19(2), pp. 153-167. [In Persian]. https://doi.org/10.22067/JCESC.2021.67402.1000.

Movahhedi Dehnavi, M., Modarres Sanavi, A.M., Soroushzadeh, A. and Jalali, M. 2004. Changes of proline, total soluble sugars, chlorophyll (SPAD) content and chlorophyll fluorescence in safflower varieties under drought stress and foliar application of zinc and manganese. *Biaban*, 9(1), pp. 93-110. [In Persian].

Nardi S., Pizzeghello D., Muscolo, A. and Vianello, A. 2002. Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(11), pp. 1527-1536. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00174-8.

Narimani, H., Seyed Sharifi, R., Sedghi, M., 2022. Effect of biofertilizer and putrescine application on grain filling components and dry matter remobilization of triticale (*Triticosecale Wittmack*) under water limitation conditions. *Cereal Research*, 11(4), pp. 359-373. [In Persian]. https://doi.org/10.22124/CR.2022.22374.1726.

Naseri, R., Barary, M., Zarea, M.J., Khavazi, K. and Tahmasebi, Z. 2017. Effect of plant growth promoting bacteria and Mycorrhizal fungi on growth and yield of wheat under dryland conditions. *Journal of Soil Biology*, 5(1), pp. 49-66. [In Persian]. https://doi.org/10.22092/SBJ.2017.113121.

Nazari, Z., Seyed Sharifi, R. and Narimani, H. 2021. Effect of Biofertilizers, nanosilicon and water limitation on current photosynthesis and dry matter transfer of triticale. *Crop Physiology Journal*, 13(51), pp. 5-24. [In Persian].

Rehman, H.U., Aziz, T., Farooq, M., Wakeel, A. and Rengel, Z. 2012. Zinc nutrition in rice production systems: A review. *Plant and Soil*, 361(1-2), pp. 203-226. https://doi.org/10.1007/s11104-012-1346-9.

Ronanini, D., Savin, R. and Hal, A.J. 2004. Dynamic of fruit growth and oil quality of sunflower (*Helianthus annuus* L.) exposed to brief interval of high temperature during grain filling. *Field Crops Research*, 83(1), pp. 79-90. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00064-9.

Saadati, S., Moallemi, N., Mortazavi, S.M.H. and Seyyednejad, S.M. 2013. Effects of zinc and boron foliar application on soluble carbohydrate and oil contents of three olive cultivars during fruit ripening. *Scientia Horticulturae*, 164, pp. 30-34. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.08.033.

Seyed Sharifi, R., Babaei, Kh. and Pirzad, A. 2018. Effect of biofertilizers and foliar application of nano zinc oxide on chlorophyll content, grain filling period and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under water limitation. *Journal of Plant Ecophysiology*, 9(31), pp. 68-75. [In Persian]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085958.1396.9.31.8.4.

Shahbazi, Sh., Fateh, E. and Aynehband, A. 2014. Evaluation of the effect of humic acid and vermicompost on yield and yield components of three wheat cultivars in tropical regions. *Plant Productions*, 38(2), pp. 99-110. https://doi.org/10.22055/ppd.2015.11323.

Sharafizadeh, M., Jazayeri, M.R., Nikkhah, H.R. and Roostaei, M. 2020. Agronomic and Morphological Characteristics of Barley. Publication of Seed and Plant Certification and Registration Institute, Karaj, Iran. pp. 91-98. [In Persian]. https://press.areeo.ac.ir/book_2450.pdf.

Shojaei, H. and Makarian, H. 2015. The effect of nano and non-nano zinc oxide particles foliar application on yield and yield components of mungbean (*Vigna radiate*) under drought stress. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 12(4), pp. 727-737. http://doi.org/10.22067/GSC.V1214.24603.

Si, Z., Zain, M., Mehmood, F., Wang, G., Gao, Y. and Duan, A. 2020. Effect of nitrogen application rate and irrigation regime on growth, yield, and water-nitrogen use efficiency of drip-irrigated winter wheat in the North China Plain. *Journal of Agricultural Water Management*, 231, 106002. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106002.

Skowron, E. and Trojak, M. 2021. Effect of exogenously-applied abscisic acid, putrescine and hydrogen peroxide on drought tolerance of barley. *Biologia*, 76, pp. 453-468. https://doi.org/10.2478/s11756-020-00644-2.

Sohrabi, Y., Heidari, G., Weisany, W., Golezani, K.G. and Mohammadi, K. 2012. Changes of antioxidative enzymes, lipid peroxidation and chlorophyll content in chickpea types colonized by different *Glomus* species under drought stress. *Symbiosis*, 56, pp. 5-18. https://doi.org/10.1007/s13199-012-0152-8.

Wijebandara, D.M.D.I., Dasog, G.S., Patil, P.L. and Hebbar, M. 2009. Effect of nutrient levels and biofertilizer on growth and yield of paddy under System of Rice Intensification (SRI) and conventional methods of cultivation. *Tropical Agricultural Research*, 20, pp. 343-353.

Yaghini, F., Seyed Sharifi, R. and Narimani, H. 2020. Effects of supplemental irrigation and biofertilizers on yield, chlorophyll content, rate and period of grain filling of rainfed wheat. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 18(1), pp. 101-109. [In Persian]. https://doi.org/10.22067/GSC.V18I1.81264.

Yang, G., Liu, N., Lu, W., Wang, S., Kan, H., Zhang, Y., Xu, L. and Chen, Y. 2014. The interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and soil phosphorus availability influences plant community productivity and ecosystem stability. *Journal of Ecology*, 102, pp. 1072-1082. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12249.