مقاله پژوهشی، صفحات ۳۸۸-۳۷۲

تاثیر کودهای زیستی و پوترسین بر عملکرد، رنگدانه‌های فتوسنتزی و برخی صفات فیزیولوژیک تریتیکاله تحت شرایط محدودیت آبی

حامد نریمانی*، رئوف سیدشریفی و محمد صدقی

ایران اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۹

چکیده

به‌منظور بررسی تاثیر کودهای زیستی و پوترسین بر عملکرد، محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و برخی صفات فیزیولوژیک تریتیکاله تحت شرایط محدودیت آبی، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۹۹-۱۳۹۸ اجرا شد. فاکتورهای آزمایشی آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل به‌عنوان شاهد و قطع آبیاری در ۵۰ درصد مراحل آبستنی و سنبله‌دهی)، کاربرد کودهای زیستی در چهار سطح (عدم کاربرد به‌عنوان شاهد، کاربرد ورمی‌کمپوست، میکوریزا، کاربرد توام ورمی‌کمپوست و میکوریزا) و محلول‌پاشی پوترسین (محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد و محلول‌پاشی ۰/۴ و ۰/۸ میلی‌مولار) را شامل می‌شدند. نتایج نشان داد کاربرد توام ورمی‌کمپوست، میکوریزا و محلول‌پاشی ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی محتوای قندهای محلول و پرولین (به‌ترتیب ۴۷/۵۴ و ۵۱/۰۳ درصد) نسبت به شرایط عدم کاربرد کودهای زیستی و پوترسین در شرایط آبیاری کامل افزایش داد. کاربرد توام ورمی‌کمپوست، میکوریزا و محلول‌پاشی ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین در شرایط آبیاری کامل هدایت الکتریکی (۵۴/۰۱ درصد) و محتوای مالون‌دی‌آلدهید (۵۲/۱۷ درصد) کاهش داد ولی محتوای کلروفیل کل، کاروتنوئید، عملکرد کوانتومی، شاخص نیتروژن، هدایت روزنه‌ای و محتوای نسبی آب (به‌ترتیب ۶۰/۹۵، ۴۶/۰۳، ۴۲/۰۹، ۳۶/۰۷، ۴۷/۸۵ و ۵۷/۷ درصد)، محتوای پروتئین و عملکرد دانه (به‌ترتیب ۵۹/۰۴ و ۳۹/۶ درصد) را نسبت به شرایط عدم کاربرد کودهای زیستی و پوترسین تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی افزایش داد. به‌نظر می‌رسد کاربرد توام کودهای زیستی (ورمی‌کمپوست و میکوریزا) و محلول‌پاشی ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین، می‌تواند عملکرد دانه تریتیکاله را تحت شرایط محدودیت آبی به‌واسطه بهبود شاخص‌های فیزیولوژیک افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: آنتوسیانین، عملکرد کوانتومی، محتوای کلروفیل، میکوریزا، ورمی‌کمپوست.

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۴۶۸۲۲۷۵۵، پست الکترونیکی: hamed.narimani.72@gmail.com

مقدمه

تریتیکاله (*Triticosecale* Wittmack) گیاهی ساخته دست بشر و نتیجه تلاقی گندم و چاودار است که از خصوصیات مطلوب چاودار از جمله رشد سریع و قابلیت تولید در اراضی فقیر و کم بازده و از خصوصیات برتر کیفی و زراعی گندم برخوردار است. دانه‌های تریتیکاله درشت‌تر از گندم بوده و از لحاظ میزان لایسین، اسید آمینه‌های سولفوردار و میزان پروتئین در دانه بر گندم برتری دارد. همچنین این گیاه از عملکرد مطلوبی تحت شرایط محدودیت آبی برخوردار می‌باشد (۱). گیاهان در طول دوره زندگی خود در معرض عوامل تنش‌زای متعددی قرار می‌گیرند که موجب کاهش عملکرد و محدودشدن قابلیت تولید محصولات کشاورزی در سراسر جهان می‌شود (۶۰). این تنش با تغییر ساختار درونی کلروپلاست‌ها، میتوکندری‌ها، محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی موجب

تخریب کمپلکس آزادکننده اکسیژن و مرکز واکنش فتوسیستم II می‌شود و با ایجاد اختلال در تولید و استفاده از الکترون‌ها، فتوسنتز گیاهان را کاهش می‌دهد (۶۰). محدودیت آبی موجب اختلال در سیستم فتوسنتزی می‌شود و از روش‌های تعیین اختلال در سیستم فتوسنتزی، اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل می‌باشد (۱۶). مولفه‌های فلورسانس کلروفیل شامل فلورسانس حداقل (Minimum fluorescence)، فلورسانس‌متغیر (Variable fluorescence) و فلورسانس حداکثر (Maximum fluorescence) است (۱۶). در این راستا رهبریان و همکاران (۲۰۱۱) بیان کردند که محدودیت آبی با ایجاد خسارت به مرکز واکنش فتوسیستم II موجب تشدید فلورسانس اولیه (F_0) و کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌شود (۵۰). همچنین، محدودیت آبی از طریق برهم‌خوردن وضعیت آبی گیاه، تخریب ساختار غشاء، میزان نیتروژن برگ و کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی موجب افزایش فلورسانس حداقل (F_0) و کاهش فلورسانس متغیر (F_v) و فلورسانس حداکثر (F_m) برگ پرچم گندم می‌شود (۲۰).

استفاده از کودهای زیستی نظیر قارچ‌های میکوریزا و ورمی‌کمپوست از راه‌های مناسب برای تعدیل اثر ناشی از محدودیت آبی و بهبود عملکرد تحت چنین شرایطی است که می‌تواند از طریق افزایش فراهمی عناصر غذایی ضروری مورد نیاز گیاه، مقاومت گیاهان میزبان را در برابر تنش‌های محیطی مختلف از جمله گرما، شوری، خشکی و فلزات سنگین افزایش و در نتیجه رشد و عملکرد را تحت چنین شرایطی بهبود بخشد (۲۶) و نقش مفیدی در تجزیه مواد آلی خاک، معدنی شدن عناصر غذایی گیاهان و چرخه عناصر غذایی ایفا کند (۳۴). قارچ‌های میکوریزا با بهبود ساختار غشاء و محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، واکنش‌های نوری و انتقال الکترون در فتوسیستم II را از گیرنده اولیه به ثانویه افزایش می‌دهد که از این طریق اثر نامطلوب تنش‌های محیطی بر برداشت نور، ظرفیت تثبیت نیتروژن و انتقال الکترون به پلاستوکینون را افزایش و موجب بهبود شاخص‌های فلورسانس کلروفیل می‌شوند (۳۸). در این زمینه خیری‌زاده آروق و همکاران (۲۰۱۶) اظهار داشتند که کاربرد قارچ میکوریزا تحت شرایط محدودیت آبی با بهبود وضعیت آبی، موجب افزایش محتوای کلروفیل، عملکرد کوانتومی برگ و عملکرد دانه تریتیکاله شد (۴۰). یقینی و همکاران (۱۳۹۹) نیز افزایش عملکرد دانه گندم به‌واسطه کاربرد میکوریزا را، به افزایش محتوای کلروفیل و عملکرد کوانتومی نسبت دادند (۲۳).

ورمی‌کمپوست‌ها به‌دلیل برخورداری از ظرفیت بالای نگهداری آب و تبادل کاتیونی، افزایش جذب عناصر غذایی و سایر خواص مفید فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی می‌توانند پایداری دستگاه فتوسنتزی را در گیاهان بهبود بخشند (۴۲). در این راستا افتاده فدافن و همکاران (۱۳۹۶) اظهار داشتند که کاربرد ورمی‌کمپوست از طریق بهبود فعالیت‌های میکروبی خاک و کمک به جذب بیشتر عناصر غذایی، ضمن افزایش محتوای کلروفیل، در کاهش فلورسانس حداقل و افزایش فلورسانس متغیر، فلورسانس حداکثر و عملکرد کوانتومی موثر است (۴). یونس و همکاران (۲۰۲۱) نیز گزارش کردند که کاربرد ورمی‌کمپوست از طریق افزایش جذب عناصر غذایی از جمله نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن و روی، موجب بهبود محتوای کلروفیل و افزایش سرعت انتقال الکترون، عملکرد کوانتومی و فلورسانس برگ ذرت شد که در نهایت با بهبود فتوسنتز خالص، موجب افزایش عملکرد دانه ذرت می‌شود (۵۷). در بررسی نظری و همکاران (۱۴۰۰) نیز کاربرد قارچ میکوریزا و ورمی‌کمپوست از طریق بهبود شاخص نیتروژن برگ پرچم، موجب بهبود شاخص‌های فلورسانس کلروفیل (فلورسانس متغیر (F_v)، فلورسانس حداکثر (F_m) و عملکرد کوانتومی (F_v/F_m))، محتوای کلروفیل و در نهایت عملکرد دانه تریتیکاله تحت شرایط محدودیت آبی شد (۲۱).

مقاله پژوهشی، صفحات ۳۸۸-۳۷۲

پلی‌آمین‌ها، از دیگر تعدیل‌کننده‌های اثرات محدودیت آبی هستند که با افزایش تحمل گیاهان نسبت به شرایط تنش موجب بهبود عملکرد می‌شود. این ترکیبات آلی نیتروژن‌دار و پلی‌کاتیون‌های با وزن مولکولی کوچک، که به‌عنوان تنظیم‌کننده رشد گیاه هستند نقش حفاظتی در برابر آسیب غشاء و پراکسیداسیون لیپیدها دارند و در تنظیم بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی نقش دارند (۳۳). اسلام و همکاران (۲۰۲۲) بیان کردند که کاربرد پوترسین در شرایط محدودیت آبی از طریق افزایش رنگدانه‌های فلوسنتزی و بهبود عملکرد کوانتومی موجب افزایش سرعت فتوسنتز می‌شود (۳۵). قو و همکاران (۲۰۲۰) نیز بیان کردند کاربرد پوترسین موجب افزایش شاخص‌های فلورسانس کلروفیل و رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌شود (۴۹).

مواجه شدن بخشی از دوران رشد زایشی تریتیکاله با محدودیت آبی در بیشتر مناطق خشک و نیمه‌خشک و از طرفی اهمیت کودهای زیستی (ورمی‌کمپوست و میکوریزا) و پوترسین در تعدیل یا کاهش بخشی از اثر ناشی از محدودیت آبی و بررسی‌های محدود انجام شده در خصوص برهم‌کنش توام این عوامل، از جمله مواردی بودند که موجب شد تا اثر این عوامل بر عملکرد، محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و برخص صفات فیزیولوژیک تریتیکاله تحت شرایط محدودیت آبی مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روشها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی با مختصات جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ارتفاع ۱۳۵۰ متر از سطح دریا در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ اجرا شد. محل اجرای آزمایش دارای اقلیم نیمه‌خشک و سرد است. نتایج حاصل از تجزیه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکوشیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

مشخصه	pH	عصاره اشباع	آهک	رس	سیلت	شن	بافت	کربن آلی	نیتروژن کل	فسفر	پتاسیم	روی
			درصد				لومی	درصد		میلی‌گرم بر کیلوگرم		
مقادیر	۷/۸	۴۹	۱۴/۴	۲۳	۴۲	۳۵		۰/۶۲	۰/۰۶	۸/۲۹	۲۱۲	۱/۸

فاکتورهای مورد بررسی شامل آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل در طول دوره رشدی به‌عنوان شاهد و قطع آبیاری در ۵۰ درصد مراحل چکمه‌ای شدن (آبستنی) و سنبله‌دهی به‌ترتیب به‌عنوان محدودیت شدید و ملایم آبی براساس کد ۴۳ و ۵۵ مقیاس (Biologische Bundesanstalt, (BBCH Bundessortenamt and Chemical Industry)، کودهای زیستی در چهار سطح (عدم کاربرد کودهای زیستی به‌عنوان شاهد، کاربرد ورمی‌کمپوست، میکوریزا، کاربرد توام ورمی‌کمپوست و میکوریزا) و محلول‌پاشی پوترسین در سه سطح (محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد و محلول‌پاشی ۰/۴ و ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین) بود. مرحله چکمه‌ای شدن یا آبستنی حساس‌ترین مرحله به محدودیت آبی است که حدود دو هفته قبل از مرحله سنبله‌دهی ظاهر می‌شود. محلول‌پاشی پوترسین (محصول شرکت Sigma با خلوص ۹۹ درصد) در مراحل پنجه‌دهی و ساقه‌دهی (به‌ترتیب معادل با کد ۲۱ و ۳۰ از مقیاس BBCH) اعمال شد.

کاشت در ۱۶ آبان ۱۳۹۸ و برداشت ۵ مرداد ماه ۱۳۹۹ بود. از تریتیکاله رقم سناباد با تراکم ۴۰۰ بذر در مترمربع (که تراکم مطلوب و توصیه شده برای این رقم است) استفاده شد. این رقم دارای تیپ رشد بهاره، متوسطرس، با ارتفاع بوته ۱۱۲-۱۱۰ سانتی‌متر و وزن هزار دانه آن به‌طور متوسط ۴۵/۴۷ گرم می‌باشد که نسبت به خوابیدگی مقاوم است. هر واحد آزمایشی شامل پنج خط کاشت به طول دو متر و با فاصله بین ردیفی ۲۰ سانتی‌متر بود. به‌منظور جلوگیری از نشت آب به کرت‌های مجاور، فاصله بین هر واحد آزمایشی یک متر و نیم در نظر گرفته شد. اولین آبیاری بلافاصله بعد از کاشت و آبیاری‌های بعدی بسته به شرایط محیطی، نیاز گیاه زراعی و سطوح تیمار کم آبیاری انجام شد. قارچ میکوریزا مورد استفاده از گونه *Glomus intraradices* بود که از شرکت زیست فناوران توران تهیه و به میزان ۲۰ گرم در هر متر مربع خاک (۲۰۰ کیلوگرم در هر هکتار) بر اساس توصیه شرکت مذکور استفاده شد. تعداد اسپور زنده در هر گرم قارچ مورد استفاده حدود ۲۰۰ اسپور بود. مقدار ورمی‌کمپوست مصرفی در این آزمایش ۶ تن در هکتار در نظر گرفته شد که از شرکت گیلدا خریداری و مشخصات فیزیکوشیمیایی آن در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- نتایج تجزیه کود ورمی کمپوست

مشخصه	Cd	Pb	Zn	Cu	Mn	Fe	EC	pH
	($mg.kg^{-1}$)						$dS.m^{-1}$	
مقادیر	۱	۱۹	۱۱۰	۲۰	۲۷۵	۵۰۰۰	۱/۱۲	۷/۶۴
مشخصه	Mg	Ca	K	P	N	OC	OM	
				(٪)				
مقادیر	۰/۹۵	۲/۷۳	۰/۴	۰/۴	۱/۵۵	۳۲/۹	۵۶/۸	

اندازه‌گیری محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی از برگ پرچم دو هفته بعد از قطع آبیاری در مرحله سنبله‌دهی با استفاده از روش آرنون (۱۹۶۷) انجام شد (۲۴). ۰/۲ گرم از بافت برگ پرچم را با استون ۸۰ درصد به‌تدریج له کرده تا کلروفیل وارد محلول استونی شود و در نهایت حجم محلول با استون ۸۰ درصد به حجم ۲۰ میلی‌لیتر رسانده شد. محلول حاصل به مدت ۱۰ دقیقه در ۴۰۰۰ دور سانتریفوژ شد و سپس جذب نوری محلول رویی در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر قرائت شد. غلظت کلروفیل کل و کاروتنوئیدها بر اساس روابط ۱ تا ۴ برآورد شدند.

رابطه ۱:

$$\text{محتوای کلروفیل a} = (19/3\times A_{663}-0/86\times A_{645})V/100W$$

رابطه ۲:

$$\text{محتوای کلروفیل b} = (19/3\times A_{645}-3/6\times A_{663})V/100W$$

رابطه ۳:

$$\text{محتوای کلروفیل کل} = \text{کلروفیل a} + \text{کلروفیل b}$$

رابطه ۴:

$$\text{محتوای کاروتنوئید} = (100A_{470}-3/27C_a-104C_b)/227$$

در این روابط V حجم استون استفاده شده و W وزن نمونه گیاهی استفاده شده است.

برای اندازه‌گیری محتوای آنتوسیانین برگ پرچم، مقدار ۰/۰۵ گرم بافت گیاهی با چهار سی سی اسید کلریدریک یک درصد متانول در یک هاون چینی ساییده شد. محلول حاصل به مدت ۲۴ ساعت در یخچال نگهداری شد و

سپس، محلول به مدت ۱۰ دقیقه و در ۴۰۰۰ دور سانتریفیوژ شد. پس از برداشتن فاز رویی، جذب محلول‌ها در طول موج ۵۳۰ و ۶۵۷ نانومتر نسبت به شاهد اندازه‌گیری شد و با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (۴۵).

رابطه ۵: $A=A_{530}-(0.25\times A_{657})$

اندازه‌گیری برخی صفات فیزیولوژیک در ۲۴۲ روز پس از کاشت (اواسط مرحله شیری شدن معادل با کد ۷۵ از مقیاس BBCH) انجام گرفت. برای اندازه‌گیری عملکرد کوانتومی برگ پرچم، در ۲۴۲ روز پس از کاشت (اواسط مرحله شیری شدن معادل با کد ۷۵ از مقیاس BBCH) توسط دستگاه فلورسانس کلروفیل (OS-30p) از هر تیمار به‌طور تصادفی شش برگ پرچم توسعه یافته (در فاصله زمانی ساعت ۱۰-۸ صبح) انتخاب و بعداز ۱۵ دقیقه تاریکی توسط کلیپس‌های مخصوص، عملکرد کوانتومی برگ پرچم (F_v/F_m) اندازه‌گیری شد (۴۰). شاخص نیتروژن برگ پرچم نیز بر اساس رابطه زیر اندازه‌گیری شد (۵۱).

رابطه ۶: $N= ۰/۰۱۷۳۳۲+۰/۰۰۱۶۳۲۲ \times SPAD$

هدایت روزنه‌ای برگ، توسط دستگاه پرومتر (Porometer AP4, Delta-T Devices ltd., Cambridge, UK) از هر تیمار به‌طور تصادفی چهار برگ توسعه یافته انتخاب و اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری درصد محتوای نسبی آب برگ پرچم (RWC) بین ساعت ۱۲-۱۰ روز، از هر کرت چهار برگ پرچم توسعه‌یافته به‌طور تصادفی انتخاب و بعد از قرار دادن در فویل‌های آلومینیومی، داخل کیسه‌های پلاستیکی و روی یخ قرار داده و خیلی سریع به آزمایشگاه منتقل و با استفاده از رابطه پیشنهادی کوستوپولو و همکاران (۲۰۱۰) محاسبه شد (۴۱). به‌منظور اندازه‌گیری هدایت الکتریکی برگ پرچم در همان شرایط مربوط به اندازه‌گیری درصد محتوای نسبی آب برگ پرچم، نمونه-های برگ پرچم در بشرهای محتوای ۲۵ میلی لیتر آب مقطر (دارای EC مشخص) به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار داده و سپس هدایت الکتریکی توسط دستگاه EC متر (Mi 180 Bench Meter) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی برگ پرچم، سعی شد نمونه-های برگی از ابعاد یکسانی برخوردار باشد. بر روی برگ پرچم اندازه‌گیری محتوای مالون‌دی‌آلدهید از روش استوارت و بولی (۱۹۸۰)، محتوای قندهای محلول به روش دابویس و همکاران (۱۹۵۶)، محتوای پرولین از روش بیتز و همکاران (۱۹۷۳) و پروتئین برگ پرچم با استفاده از روش برادفورد (۱۹۷۶) اندازه‌گیری شد (۵۳، ۳۰، ۲۵ و ۲۸). عملکرد دانه از سطحی معادل ۰/۲ متر مربع از خطوط اصلی هر کرت بعد از حذف اثر حاشیه‌ای برآورد شد. تجزیه داده‌ها و رسم نمودارها از نرم‌افزارهای SAS (نسخه ۹/۱) و Excel (نسخه ۲۰۱۳) و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شدند.

نتایج

محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی برگ پرچم: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تاثیر کودهای زیستی (ورمی‌کمپوست و میکوریزا)، پوترسین، محدودیت آبی و برهم‌کنش توام این سه عامل بر محتوای کلروفیل کل و کاروتنوئید برگ پرچم در سطح احتمال یک و پنج معنی‌دار شد (جدول ۳). کاربرد توام ورمی‌کمپوست، میکوریزا و محلول‌پاشی ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین در شرایط آبیاری کامل از افزایش ۶۰/۹۵ درصدی محتوای کلروفیل کل برگ پرچم نسبت به شرایط عدم کاربرد کودهای زیستی و پوترسین تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی برخوردار بود (جدول ۴). بیش‌ترین محتوای کاروتنوئید برگ پرچم (۰/۳۹ میلی-گرم بر گرم وزن تر برگ) نیز در کاربرد توام ورمی‌کمپوست و میکوریزا و محلول‌پاشی ۰/۴ میلی‌مولار پوترسین تحت شرایط آبیاری کامل مشاهده شد (جدول ۴).

مقاله پژوهشی، صفحات ۳۸۸-۳۷۲

محتوای آنتوسیانین برگ پرچم: تاثیر کودهای زیستی (ورمی‌کمپوست و میکوریزا)، محلول‌پاشی پوترسین و محدودیت آبی بر محتوای آنتوسیانین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). بیش‌ترین محتوای انتوسیانین برگ پرچم در تیمارهای قطع آبیاری در مرحله آبستنی (۰/۶۱۹ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ)، کاربرد توام ورمی‌کمپوست با میکوریزا (۰/۶۱۵ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ) و محلول‌پاشی ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین (۰/۵۹۶ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ) مشاهده شد (جدول ۵).

عملکرد کوانتومی (F_v/F_m) برگ پرچم: براساس نتایج جدول تجزیه واریانس، تاثیر کودهای زیستی، پوترسین، محدودیت آبی و برهم‌کنش توام این سه عامل بر عملکرد کوانتومی برگ پرچم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیش‌ترین عملکرد کوانتومی برگ پرچم (۰/۷۱۹) در کاربرد توام ورمی‌کمپوست با میکوریزا و محلول‌پاشی ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین تحت شرایط آبیاری کامل مشاهده شد که از افزایش ۴۲/۰۹ درصدی نسبت به عدم کاربرد کودهای زیستی و پوترسین تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی برخوردار بود (جدول ۴).

شاخص نیتروژن برگ پرچم: برهم‌کنش توام سه عامل کودهای زیستی (ورمی‌کمپوست و میکوریزا)، محلول‌پاشی پوترسین و محدودیت آبی بر شاخص نیتروژن برگ پرچم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین مقدار این شاخص (۰/۰۸۶) در کاربرد توام ورمی‌کمپوست، میکوریزا و محلول‌پاشی ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین در شرایط آبیاری کامل و کم‌ترین مقدار آن (۰/۰۶۳۲) در عدم کاربرد کودهای زیستی و پوترسین در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی مشاهده شد (جدول ۴).

جدول ۳- تجزیه واریانس تاثیر کودهای زیستی و پوترسین بر محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، محتوای آنتوسیانین، عملکرد کوانتومی، شاخص نیتروژن، هدایت روزنه‌ای و محتوای نسبی آب برگ پرچم تریتیکاله تحت شرایط محدودیت آبی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		کلروفیل کل	کاروتنوئید	آنتوسیانین	عملکرد کوانتومی	شاخص نیتروژن	هدایت روزنه‌ای	محتوای نسبی آب
تکرار	۲	۱/۷۸**	۰/۲۰۲**	۰/۰۳۵**	۰/۰۰۹**	۰/۰۰۰۶**	۲۱/۶۵**	۹۳۲/۷**
محدودیت آبی (I)	۲	۹/۷۶**	۰/۰۲۴**	۰/۰۸۵**	۰/۰۹۳**	۰/۰۰۰۷**	۵۵/۸۲**	۶۲۵/۷**
کودهای زیستی (B)	۳	۶/۱۱**	۰/۰۱۶**	۰/۰۵۸**	۰/۰۳۶**	۰/۰۰۰۴**	۲۸/۳۳**	۴۲۳/۶**
پوترسین (P)	۲	۳/۲۴**	۰/۰۱۲**	۰/۰۳۴**	۰/۰۲۱**	۰/۰۰۰۴**	۱۷/۵۹**	۲۸۶/۵**
I×B	۶	۰/۱*	۰/۰۰۰۳^{ns}	۰/۰۰۲^{ns}	۰/۰۰۰۸^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۸^{ns}	۲/۹۹**	۳۲/۹**
I×P	۴	۰/۰۳^{ns}	۰/۰۰۰۶*	۰/۰۰۰۸^{ns}	۰/۰۱۶^{ns}	۰/۰۰۰۰۱^{ns}	۲/۷۲*	۳۱/۸**
B×P	۶	۰/۱۵**	۰/۰۰۰۳^{ns}	۰/۰۰۱^{ns}	۰/۰۰۱^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۹^{ns}	۳/۱۹**	۲۷/۲**
I×B×P	۱۲	۰/۱۱**	۰/۰۰۰۸**	۰/۰۰۲^{ns}	۰/۰۰۲**	۰/۰۰۰۰۲**	۳/۴۵**	۶۴/۷**
خطا	۷۰	۰/۰۴	۰/۰۰۰۲	۰/۱۲۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۸	۰/۸۷	۸/۹۶
ضریب تغییرات (٪)	–	۴/۰۳	۴/۴۹	۷/۵۱	۵/۲۶	۳/۹۳	۵/۲۵	۵/۳۷

ns، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

مقاله پژوهشی، صفحات ۳۸۸-۳۷۲

جدول ۴- مقایسه میانگین تاثیر کودهای زیستی و پوترسین بر محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، عملکرد کوانتومی، شاخص نیتروژن، هدایت روزنه‌ای و محتوای نسبی آب برگ پرچم تریتیکاله تحت شرایط محدودیت آبی

ترکیب تیماری	کلروفیل کل	کاروتنوئید	عملکرد کوانتومی	شاخص نیتروژن	هدایت روزنه‌ای ($mmol.m^{-2}.s^{-1}$)	محتوای نسبی آب (٪)
	میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ					
$I_1 \times B_1 \times P_1$	۴/۷۷۵^{jk}	۰/۳۰۱^{klmnop}	۰/۵۷^{lmnop}	۰/۰۷۰۱^{mnopq}	۱۵/۹^{pqrst}	۵۰/۳۶^{rstuvw}
$I_1 \times B_2 \times P_1$	۵/۰۶۶^{hij}	۰/۳۱۴^{jklm}	۰/۶۱۵^{fghijkl}	۰/۰۷۲^{klmno}	۱۷/۹۳^{ghijklm}	۵۲/۱۳^{opqrstu}
$I_1 \times B_3 \times P_1$	۵/۳۸۱^{efgh}	۰/۳۳۴^{ghij}	۰/۶۵۷^{cdefg}	۰/۰۷۶۲^{ghijk}	۱۸/۶^{efghi}	۵۸/۶^{fghijklm}
$I_1 \times B_4 \times P_1$	۵/۹۹^{ab}	۰/۳۷۹^{abc}	۰/۶۹۹^{abc}	۰/۸۳۱^{abcd}	۱۹/۹^{abcde}	۶۳/۸^{abcde}
$I_1 \times B_1 \times P_2$	۵/۰۲^{ij}	۰/۳۱۱^{jklmn}	۰/۵۹۵^{hijklmn}	۰/۰۷۴۹^{hijklm}	۱۶/۳۳^{nopqrst}	۵۳/۴۳^{nopqrs}
$I_1 \times B_2 \times P_2$	۵/۵۳۳^{cdef}	۰/۳۴۳^{efgh}	۰/۶۶^{bcdefg}	۰/۰۸۲۲^{abcde}	۱۹^{cdefgh}	۶۱/۱۳^{bcdefghi}
$I_1 \times B_3 \times P_2$	۵/۸۱۲^{bc}	۰/۳۶۶^{bcde}	۰/۶۶۸^{abcdef}	۰/۰۸۲۶^{abcd}	۲۰/۵^{abc}	۶۳/۴۳^{abcdef}
$I_1 \times B_4 \times P_2$	۶/۱۱۳^{ab}	۰/۳۹^{a}	۰/۷۱^{ab}	۰/۰۸۴۴^{abc}	۲۰/۶۳^{ab}	۶۵/۰۶^{abc}
$I_1 \times B_1 \times P_3$	۵/۶۵۲^{cde}	۰/۳۷۵^{abc}	۰/۶۹^{abcd}	۰/۰۸۱۱^{bcdef}	۱۹/۷۶^{abcdef}	۵۶/۴۶^{ijklmnop}
$I_1 \times B_2 \times P_3$	۶/۰۱^{ab}	۰/۳۸۳^{ab}	۰/۷۰۷^{abc}	۰/۰۸۳۸^{abcd}	۲۰/۲^{abc}	۶۴/۶۳^{abcd}
$I_1 \times B_3 \times P_3$	۶/۰۹۹^{ab}	۰/۳۸۴^{ab}	۰/۷۱۲^{ab}	۰/۰۸۵۱^{ab}	۲۱^{a}	۶۵/۹۶^{ab}
$I_1 \times B_4 \times P_3$	۶/۱۵^{a}	۰/۳۸۷^{ab}	۰/۷۱۹^{a}	۰/۰۸۶^{a}	۲۰/۷^{ab}	۶۶/۹۶^{a}
$I_2 \times B_1 \times P_1$	۴/۴۶۳^{klmn}	۰/۳۰۵^{klmno}	۰/۵۶۸^{lmnop}	۰/۰۶۹۲^{nopq}	۱۷/۴۳^{ijklmno}	۵۵/۹^{jklmnopq}
$I_2 \times B_2 \times P_1$	۴/۳۳۴^{lmn}	۰/۲۸۸^{nopq}	۰/۵۷۴^{jklmnop}	۰/۰۶۷۹^{opqr}	۱۷/۹^{ghijklm}	۴۷/۴۶^{uvwx}
$I_2 \times B_3 \times P_1$	۴/۷۶۶^{ijk}	۰/۳۱۲^{jklm}	۰/۵۸۸^{ijklmno}	۰/۰۶۹۳^{nopq}	۱۵/۴^{stu}	۵۲/۶۶^{opqrst}
$I_2 \times B_4 \times P_1$	۵/۴۳۷^{efg}	۰/۳۴۹^{defg}	۰/۶۳^{efghi}	۰/۰۷۹۱^{defgh}	۱۸/۲۶^{fghijkl}	۵۷/۹۳^{ghijklmn}
$I_2 \times B_1 \times P_2$	۴/۲۳۴^{n}	۰/۲۸۵^{opq}	۰/۴۷۲^{klmnop}	۰/۰۶۵۸^{qr}	۱۷/۳^{ijklmnop}	۴۵/۳^{xy}
$I_2 \times B_2 \times P_2$	۲/۶۱۴^{kl}	۰/۲۹۶^{lmnop}	۰/۵۳۵^{opq}	۰/۰۷۲۷^{jklmno}	۱۶/۲^{opqrst}	۴۹/۸۶^{rstuvwx}
$I_2 \times B_3 \times P_2$	۴/۹۴۹^{ij}	۰/۳۳۹^{ghi}	۰/۵۹۷^{hijklmn}	۰/۰۷۳۸^{ijklmn}	۱۷/۰۳^{klmnopqr}	۵۴/۴^{lmnopqr}
$I_2 \times B_4 \times P_2$	۵/۷۸۵^{bcd}	۰/۳۷^{abcd}	۰/۶۶۵^{bcdef}	۰/۰۸۱۹^{abcdef}	۱۹/۳۶^{bcdefg}	۶۱/۸۳^{bcdefgh}
$I_2 \times B_1 \times P_3$	۴/۶۱۴^{kl}	۰/۳۱۷^{ijkl}	۰/۵۶^{mnop}	۰/۰۷۱۲^{lmnop}	۱۵/۶۶^{qrst}	۵۲/۰۶^{pqrstu}
$I_2 \times B_2 \times P_3$	۵/۲۵۶^{fghi}	۰/۳۴۱^{fghi}	۰/۶۲۴^{fghijk}	۰/۰۷۷۸^{efghi}	۱۷/۵^{hijklmno}	۵۹/۷۶^{defghijk}
$I_2 \times B_3 \times P_3$	۵/۶۰۳^{cde}	۰/۳۶۴^{bcdef}	۰/۶۳۹^{defghi}	۰/۰۷۹۷^{cdefgh}	۱۸/۸^{defghi}	۶۰/۵۳^{cdefghij}
$I_2 \times B_4 \times P_3$	۵/۸۵۱^{abc}	۰/۳۷۵^{abc}	۰/۶۷۸^{abcde}	۰/۰۸۲۴^{abcde}	۱۹/۶^{abcdef}	۶۲/۵^{abcdefg}
$I_3 \times B_1 \times P_1$	۳/۸۲۱^{o}	۰/۲۶۵^{q}	۰/۵۰۶^{q}	۰/۰۶۳۲^{r}	۱۴^{u}	۴۲/۴۶^{y}
$I_3 \times B_2 \times P_1$	۴/۳۶۸^{lmn}	۰/۳۰۳^{klmno}	۰/۵۷۷^{jklmnop}	۰/۰۷۰۷^{lmnop}	۱۷/۷۳^{hijklmn}	۵۶/۴۳^{ijklmnop}
$I_3 \times B_3 \times P_1$	۴/۲۷۳^{mn}	۰/۲۹۳^{mnop}	۰/۵۳۳^{pq}	۰/۰۶۷^{pqr}	۱۵/۳۶^{tu}	۴۷^{vwxy}
$I_3 \times B_4 \times P_1$	۵/۰۴۸^{hij}	۰/۳۱۸^{ijkl}	۰/۵۶۶^{lmnop}	۰/۰۷۲۲^{klmno}	۱۶/۹^{lmnopqrs}	۵۱/۳^{qrstuv}
$I_3 \times B_1 \times P_2$	۴/۲۰۳^{n}	۰/۲۹۸^{lmnop}	۰/۵۶۵^{lmnop}	۰/۰۷۰۳^{mnopq}	۱۷/۳^{ijklmnop}	۵۷^{hijklmno}
$I_3 \times B_2 \times P_2$	۴/۲۱^{n}	۰/۲۷۹^{pq}	۰/۵۳۹^{opq}	۰/۰۶۸۵^{opq}	۱۶/۴۶^{mnopqrst}	۴۷/۹۶^{tuvwx}
$I_3 \times B_3 \times P_2$	۴/۳۶۱^{lmn}	۰/۲۸۶^{opq}	۰/۵۴۶^{nopq}	۰/۰۷۰۴^{mnopq}	۱۶/۶۶^{mnopqrst}	۴۹/۱۶^{stuvwx}
$I_3 \times B_4 \times P_2$	۵/۳۸^{efgh}	۰/۳۳۲^{ghij}	۰/۶۲۵^{fghij}	۰/۰۷۷۳^{fghij}	۱۷/۹۶^{ghijklm}	۵۶/۹^{ijklmnop}
$I_3 \times B_1 \times P_3$	۴/۳۲۶^{lmn}	۰/۲۸۱^{opq}	۰/۵۲۹^{pq}	۰/۰۶۸^{opq}	۱۵/۵۶^{rst}	۴۶/۲^{wxy}
$I_3 \times B_2 \times P_3$	۴/۵۹^{klm}	۰/۳۰۵^{klmno}	۰/۵۵۴^{nopq}	۰/۰۷۰۸^{lmnop}	۱۷/۱۶^{jklmnopq}	۵۳/۸۶^{mnopqrs}
$I_3 \times B_3 \times P_3$	۵/۱۹۲^{ghi}	۰/۳۲۳^{hijk}	۰/۶۰۷^{ghijklm}	۰/۰۷۵۴^{ghijkl}	۱۷/۶^{hijklmno}	۵۵/۵۶^{klmnopq}
$I_3 \times B_4 \times P_3$	۵/۴۷۹^{defg}	۰/۳۵۵^{cdefg}	۰/۶۴۶^{defgh}	۰/۰۸۰۲^{cdefg}	۱۸/۵^{efghijk}	۵۹/۰۶^{efghijkl}
LSD	۰/۳۳۳۷	۰/۰۲۴۱	۰/۰۵۲۵	۰/۰۰۴۸	۱/۵۲۵	۴/۸۷۶

I_1، I_2 و I_3 به‌ترتیب آبیاری کامل و قطع آبیاری در مراحل سنبله‌دهی و آبستنی. B_1، B_2، B_3 و B_4 به‌ترتیب عدم کاربرد کودهای زیستی، کاربرد ورمی‌کمپوست، کاربرد میکوریزا، کاربرد توام ورمی‌کمپوست و میکوریزا. P_1، P_2 و P_3 به‌ترتیب عدم محلول‌پاشی پوترسین و محلول‌پاشی ۰/۴ و ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

هدایت روزنه‌ای برگ پرچم: براساس نتایج جدول تجزیه واریانس، تاثیر کودهای زیستی، پوترسین، محدودیت آبی و برهم‌کنش توام این سه عامل بر هدایت روزنه‌ای برگ پرچم در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که کاربرد میکوریزا و محلول‌پاشی ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین در شرایط آبیاری کامل موجب افزایش ۵۰ درصدی هدایت روزنه‌ای برگ پرچم نسبت به شرایط عدم کاربرد کودهای زیستی و پوترسین تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی شد (جدول ۴).

محتوای نسبی آب برگ پرچم: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تاثیر کودهای زیستی (ورمی‌کمپوست و میکوریزا)، پوترسین، محدودیت آبی و برهم‌کنش توام این سه عامل بر محتوای نسبی آب برگ پرچم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). کاربرد توام ورمی‌کمپوست، میکوریزا و محلول‌پاشی ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین در شرایط آبیاری کامل از بیش‌ترین محتوای نسبی آب برگ پرچم (۶۶/۹۶ درصد) برخوردار بود، طوری که این ترکیب تیماری از افزایش ۵۷/۷ درصدی محتوای نسبی آب برگ پرچم نسبت به شرایط عدم کاربرد کودهای زیستی و پوترسین تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی برخوردار بود (جدول ۴).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات اصلی کاربرد کودهای زیستی، پوترسین و محدودیت آبی بر محتوای آنتوسیانین تریتیکاله

تیمار	آنتوسیانین (میکروگرم بر گرم وزن تر برگ)
I_1	۰/۵۳۱^{b}
I_2	۰/۵۴^{a}
I_3	۰/۶۱۹^{a}
LSD	۰/۰۱۹۹
B_1	۰/۵۰۲^{c}
B_2	۰/۵۶۸^{b}
B_3	۰/۵۸۴^{b}
B_4	۰/۶۱۵^{a}
LSD	۰/۰۲۳
P_1	۰/۵۳۵^{c}
P_2	۰/۵۵۸^{b}
P_3	۰/۵۹۶^{a}
LSD	۰/۰۱۹۹

I_1، I_2 و I_3 به‌ترتیب آبیاری کامل و قطع آبیاری در مراحل سنبله‌دهی و آبستنی. B_1، B_2، B_3 و B_4 به‌ترتیب عدم کاربرد کودهای زیستی، کاربرد ورمی‌کمپوست، کاربرد میکوریزا، کاربرد توام ورمی‌کمپوست و میکوریزا. P_1، P_2 و P_3 به‌ترتیب عدم محلول‌پاشی پوترسین و محلول‌پاشی ۰/۴ و ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

هدایت الکتریکی و محتوای مالون‌دی‌آلدهید برگ پرچم: تاثیر کودهای زیستی، پوترسین، محدودیت آبی و برهم‌کنش توام این سه عامل بر هدایت الکتریکی و محتوای مالون‌دی‌آلدهید برگ پرچم در سطح احتمال یک

مقاله پژوهشی، صفحات ۳۸۸-۳۷۲

درصد معنی‌دار شد (جدول ۶). براساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیش‌ترین هدایت الکتریکی و محتوای مالون‌دی‌آلدهید برگ پرچم (به‌ترتیب ۲۳۹/۵ میکروزیمتس بر مترمربع و ۰/۲۸ میکرومول بر گرم وزن تر برگ) در ترکیب تیماری عدم کاربرد کودهای زیستی و پوترسین تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی مشاهده شد که از افزایش به‌ترتیب ۵۴/۰۱ و ۵۲/۱۷ درصدی هدایت الکتریکی و محتوای مالون‌دی‌آلدهید برگ پرچم نسبت به شرایط کاربرد توام ورمی‌کمپوست، میکوریزا و محلول‌پاشی ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین در شرایط آبیاری کامل برخوردار بود (جدول ۷).

محتوای قندهای محلول و پرولین برگ پرچم: براساس نتایج جدول تجزیه واریانس، تاثیر کودهای زیستی (ورمی‌کمپوست و میکوریزا)، پوترسین، محدودیت آبی و برهم‌کنش توام این سه عامل بر محتوای قندهای محلول و پرولین برگ پرچم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که کاربرد توام ورمی‌کمپوست، میکوریزا و محلول‌پاشی ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی موجب افزایش ۴۷/۵۴ و ۵۱/۰۳ درصدی محتوای قندهای محلول و پرولین برگ پرچم نسبت به شرایط عدم کاربرد کودهای زیستی و پوترسین در شرایط آبیاری کامل شد (جدول ۷).

درصد پروتئین برگ پرچم: کاربرد کودهای زیستی (ورمی‌کمپوست و میکوریزا)، محلول‌پاشی پوترسین، محدودیت آبی و برهم‌کنش توام این سه عامل بر درصد پروتئین برگ پرچم در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۶). بیش‌ترین درصد پروتئین برگ پرچم (۱۲/۶۶ درصد) در کاربرد توام ورمی‌کمپوست، میکوریزا و محلول‌پاشی ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین در شرایط آبیاری کامل مشاهده شد (جدول ۷) که از افزایش ۵۹/۰۴ درصدی درصدی نسبت به عدم کاربرد کودهای زیستی و پوترسین تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی برخوردار بود (جدول ۷).

جدول ۶- تجزیه واریانس تاثیر کودهای زیستی و پوترسین بر هدایت الکتریکی، محتوای مالون‌دی‌آلدهید، قندهای محلول، پرولین، درصد پروتئین و عملکرد دانه تریتیکاله تحت شرایط محدودیت آبی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		هدایت الکتریکی	مالون‌دی‌آلدهید	قندهای محلول	پرولین	پروتئین	عملکرد دانه
تکرار	۲	۸۲۰/۶**	۰/۰۱۵**	۵۰۰۳/۲**	۶/۲۸**	۳/۷۹**	۴۸۴۴۶/۳**
محدودیت آبی (I)	۲	۷۷۱۷/۶**	۰/۰۱**	۱۹۲۳/۹**	۱۴**	۲۸/۷**	۶۱۲۷۴/۹**
کودهای زیستی (B)	۳	۴۳۰۱/۴**	۰/۰۱۱**	۱۶۶۹/۲**	۱۰/۴**	۲۰/۵**	۳۷۱۷۸/۳**
پوترسین (P)	۲	۵۳۷۰/۹**	۰/۰۰۵**	۸۳۰/۹**	۳/۵**	۱۲/۳**	۲۳۸۲۷/۸**
I×B	۶	۴۴۴**	۰/۰۰۰۱۸^{ns}	۱۰۷/۱**	۰/۰۸۵^{ns}	۰/۳۳^{ns}	۵۱۱۸**
I×P	۴	۱۱۳/۲^{ns}	۰/۰۰۰۱۸^{ns}	۳۰/۸^{ns}	۱/۱۵**	۱/۹*	۳۸/۳^{ns}
B×P	۶	۱۲۰/۲^{ns}	۰/۰۰۰۳**	۹۲/۶**	۰/۵۴**	۰/۴۶^{ns}	۵۶۰۵**
I×B×P	۱۲	۶۹۴/۸**	۰/۰۰۰۳۳**	۱۶۸/۶**	۰/۹۶**	۱/۷**	۱۸۶۱*
خطا	۷۰	۹۸/۴	۰/۰۰۰۰۹	۲۶/۷	۰/۱۷	۰/۶۹	۷۹۶
ضریب تغییرات (٪)	-	۵/۱۴	۴/۳	۴/۸۳	۵/۱۹	۸/۰۱	۵/۱۹

ns، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

مقاله پژوهشی، صفحات ۳۸۸-۳۷۲

جدول ۷- مقایسه میانگین تاثیر کودهای زیستی و پوترسین بر هدایت الکتریکی، محتوای مالون‌آلدهید، قندها محلول، پرولین، درصد پروتئین و عملکرد دانه تریتیکاله تحت شرایط محدودیت آبی

ترکیب تیماری	هدایت الکتریکی (میکروزیمتس بر مترمربع)	مالون‌دی‌آلدهید (میکرومول بر گرم وزن تر برگ)	قندهای محلول (میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ)	پرولین (میکروگرم بر گرم وزن تر برگ)	محتوای پروتئین (درصد)	عملکرد دانه (گرم در متر مربع)
$I_1 \times B_1 \times P_1$	۲۱۱^{cdefg}	۰/۲۴۸^{defgh}	۸۵/۶^{u}	۶/۵۴۳^{v}	۹/۱۸^{ghijkl}	۵۱۸/۴۲^{pqrs}
$I_1 \times B_2 \times P_1$	۱۹۷/۳^{fghijk}	۰/۲۳۱^{ijklm}	۹۲^{qrstu}	۶/۸۷۷^{stuv}	۹/۸۴^{efghij}	۵۳۹/۳۱^{lmno}
$I_1 \times B_3 \times P_1$	۱۸۱/۹^{klmno}	۰/۲۲۴^{klmno}	۹۳/۶^{pqrstu}	۷/۱۷۹^{qrstuv}	۱۱/۵۹^{cdef}	۵۶۶/۵۸^{ghij}
$I_1 \times B_4 \times P_1$	۱۶۶/۲^{opqrst}	۰/۱۹۴^{stuv}	۱۰۶/۸^{hijklm}	۷/۸۹۳^{klmnop}	۱۲/۳۸^{ab}	۶۱۰/۷۸^{bc}
$I_1 \times B_1 \times P_2$	۲۰۵/۵^{defgh}	۰/۲۳۶^{ghijk}	۸۶/۹^{tu}	۶/۷۳۹^{tuv}	۹/۴۶^{fghijk}	۵۲۹/۲۱^{nopq}
$I_1 \times B_2 \times P_2$	۱۷۸/۱^{lmnopq}	۰/۲۰۴^{pqrstu}	۹۵/۵^{opqrs}	۷/۴۰۲^{opqrst}	۱۱/۵۳^{abcd}	۵۷۸/۹۵^{efgh}
$I_1 \times B_3 \times P_2$	۱۶۴/۹^{pqrst}	۰/۱۹۸^{rstuv}	۱۰۱/۷^{klmnop}	۷/۶۱۹^{mnopqr}	۱۲/۰۹^{ab}	۵۹۷/۲۵^{cIe}
$I_1 \times B_4 \times P_2$	۱۵۸/۸st	۰/۱۸۸^{uv}	۱۱۴/۳^{cdefgh}	۸/۳۲۲^{ghijkl}	۱۲/۳۸^{ab}	۶۱۹/۴۹^{ab}
$I_1 \times B_1 \times P_3$	۱۷۱/۸^{nopqrs}	۰/۲۱۲^{opqr}	۸۹^{stu}	۷/۰۵۷^{rstuv}	۱۱/۸۱^{abc}	۵۸۶/۵۶^{Iefg}
$I_1 \times B_2 \times P_3$	۱۶۲/۴^{qrst}	۰/۱۹۲^{tuv}	۱۰۴/۷^{ijklmn}	۸/۱۶۲^{hijklmn}	۱۲/۱۹^{ab}	۶۱۲/۸۸^{abc}
$I_1 \times B_3 \times P_3$	۱۶۰/۷^{rst}	۰/۱۸۸^{uv}	۱۰۸/۹^{fghijk}	۸/۲۳^{hijklm}	۱۲/۵۷^{a}	۶۲۰/۱۱^{ab}
$I_1 \times B_4 \times P_3$	۱۵۵/۵^{t}	۰/۱۸۴^{v}	۱۱۶/۴^{bcdef}	۸/۷۹۶^{defghi}	۱۲/۶۶^{a}	۶۳۲/۵۹^{a}
$I_2 \times B_1 \times P_1$	۱۹۸/۷^{fghij}	۰/۲۷۴^{ab}	۱۰۵/۴^{ijklm}	۸/۲۰۲^{hijklmn}	۸/۴۳^{kl}	۴۶۶/۲۸^{xyz}
$I_2 \times B_2 \times P_1$	۲۲۳/۷^{abc}	۰/۲۲۹^{ijklmn}	۹۵/۱^{opqrst}	۶/۶۴۸^{uv}	۸/۷۱^{ijkl}	۴۶۹/۶۵^{wxyz}
$I_2 \times B_3 \times P_1$	۲۰۹/۳^{cdefg}	۰/۲۳۴^{ghijkl}	۹۸/۶^{mnopqr}	۷/۵۲۱^{nopqrs}	۹/۸۴^{efghij}	۵۱۲/۷۳^{qrs}
$I_2 \times B_4 \times P_1$	۱۸۷/۶^{ijklmn}	۰/۲۱۵^{nopq}	۱۱۰/۱^{efghij}	۸/۵۰۳^{efghijk}	۱۱/۰۶^{bcde}	۵۵۵/۹۴^{ijkl}
$I_2 \times B_1 \times P_2$	۲۳۰/۱^{ab}	۰/۲۵۸^{bcde}	۹۰/۸^{rstu}	۷/۰۰۸^{rstuv}	۹/۸۴^{efghij}	۴۸۳/۱۴^{uvwx}
$I_2 \times B_2 \times P_2$	۲۰۲/۸^{efghi}	۰/۲۵۳^{cdef}	۱۰۳/۳^{jklmno}	۷/۸۲۲^{klmnopq}	۱۰/۲۱^{defg}	۵۰۷/۸۷^{rst}
$I_2 \times B_3 \times P_2$	۲۰۰/۶^{efghij}	۰/۲۲۵^{jklmno}	۱۰۴/۳^{jklmn}	۷/۹۵^{klmnop}	۱۰/۲۱^{defg}	۵۳۳/۳۶^{mnop}
$I_2 \times B_4 \times P_2$	۱۷۲/۹^{nopqrs}	۰/۲۰۱^{qrstu}	۱۱۹/۵^{abcd}	۹/۱۰۳^{bcde}	۱۱/۶۲^{abc}	۵۸۹/۲^{Ief}
$I_2 \times B_1 \times P_3$	۲۱۵^{bcde}	۰/۲۶۱^{bcd}	۹۶/۸^{nopqrs}	۷/۳۰۵^{pqrstu}	۹/۵۵^{fghijk}	۴۹۲/۴۳^{tuv}
$I_2 \times B_2 \times P_3$	۱۸۹/۱^{ijklm}	۰/۲۰۸^{pqrs}	۱۱۴/۶^{cdefgh}	۸/۹۵۳^{cdefg}	۱۰/۶۸^{cdef}	۵۴۹/۷۷^{jklm}
$I_2 \times B_3 \times P_3$	۱۷۵^{mnopqr}	۰/۲۰۷^{qrst}	۱۲۰/۷^{abcd}	۹/۰۵۸^{cdef}	۱۱/۵۳^{abcd}	۵۶۵/۲۴^{hijk}
$I_2 \times B_4 \times P_3$	۱۶۸^{opqrst}	۰/۱۹۶^{stuv}	۱۲۲/۳^{abc}	۸/۹۶۷^{cdefg}	۱۱/۸۱^{abc}	۶۰۳/۵^{bcI}
$I_3 \times B_1 \times P_1$	۲۳۹/۵^{a}	۰/۲۸^{a}	۱۰۰^{lmnopq}	۷/۷۷۴^{lmnopq}	۷/۹۶^{l}	۴۵۳/۱۳^{z}
$I_3 \times B_2 \times P_1$	۱۹۸/۲^{fghij}	۰/۲۳^{ijklmn}	۱۱۰/۴^{efghi}	۸/۴۰۲^{fghijkl}	۱۰/۱۲^{efgh}	۴۵۸/۴۳^{yz}
$I_3 \times B_3 \times P_1$	۲۲۰/۱^{bcd}	۰/۲۵۶^{cde}	۱۱۲/۸^{defghi}	۸/۸۴۷^{cdefgh}	۱۰/۰۲^{efghi}	۴۷۷/۸۱^{vwxy}
$I_3 \times B_4 \times P_1$	۲۱۲/۳^{cdef}	۰/۲۳۳^{hijkl}	۱۲۳/۲^{ab}	۹/۴۴۱^{abcd}	۹/۸۴^{efghij}	۵۲۳/۹۱^{opqr}
$I_3 \times B_1 \times P_2$	۱۹۵/۸^{ghijk}	۰/۲۶۵^{abc}	۱۰۷/۳^{ghijk}	۸/۰۵۱^{jklmno}	۹/۸۴^{efghij}	۴۶۰/۷۳^{yz}
$I_3 \times B_2 \times P_2$	۲۲۱/۵^{bcd}	۰/۲۴۹^{defgh}	۱۱۸/۲^{abcde}	۹/۱۹۳^{abcde}	۸/۶۱^{jkl}	۴۹۹/۰۱^{stu}
$I_3 \times B_3 \times P_2$	۲۱۹/۱^{bcd}	۰/۲۴۴^{efghi}	۱۲۱/۱^{abcd}	۹/۴۹^{abc}	۹/۱۸^{ghijkl}	۵۰۰/۵۹^{stu}
$I_3 \times B_4 \times P_2$	۱۸۴/۹^{jklmn}	۰/۲۱۷^{mnop}	۱۰۵/۲^{ijklm}	۹/۷۷۶^{ab}	۱۰/۶۸^{cdef}	۵۵۴/۶۸^{ijkl}
$I_3 \times B_1 \times P_3$	۱۹۰^{hijklm}	۰/۲۵^{cdefg}	۱۱۵/۷^{bcdefg}	۸/۶۴۳^{efghij}	۸/۸^{hijkl}	۴۸۹/۲۴^{tuvw}
$I_3 \times B_2 \times P_3$	۱۹۶/۶^{fghijk}	۰/۲۴^{fghij}	۱۰۵/۳^{ijklm}	۸/۰۹۱^{jklmno}	۹/۳۷^{fghijk}	۵۱۵/۰۳^{pqrs}
$I_3 \times B_3 \times P_3$	۱۹۲/۲^{hijkl}	۰/۲۱۹^{lmnop}	۱۲۵/۳^{a}	۸/۱۵۵^{ijklmn}	۹/۹۳^{efghij}	۵۴۵/۳۶^{klmn}
$I_3 \times B_4 \times P_3$	۱۷۹^{lmnop}	۰/۲۱^{opqrs}	۱۲۶/۳^{a}	۹/۸۸۲^{a}	۱۱/۰۶^{bcde}	۵۷۱/۸۶^{fghi}
LSD	۱۶/۱۵۸	۰/۰۱۵۹	۸/۴۱۹	۰/۶۹	۳/۳۶۱	۲۰/۰۲۵

I_1، I_2 و I_3 به‌ترتیب آبیاری کامل و قطع آبیاری در مراحل سنبله‌دهی و آبستنی. B_1، B_2، B_3 و B_4 به‌ترتیب عدم کاربرد کودهای زیستی، کاربرد ورمی‌کمپوست، کاربرد میکوریزا، کاربرد توام ورمی‌کمپوست و میکوریزا. P_1، P_2 و P_3 به‌ترتیب عدم محلول‌پاشی پوترسین و محلول‌پاشی ۰/۴ و ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

عملکرد دانه: برهم‌کنش توام کودهای زیستی (ورمی‌کمپوست و میکوریزا)، محلول‌پاشی پوترسین و محدودیت آبی بر عملکرد دانه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۶). بیش‌ترین عملکرد دانه (۶۳۲/۵۹ گرم در مترمربع) در کاربرد توام ورمی‌کمپوست، میکوریزا و محلول‌پاشی پوترسین در شرایط آبیاری کامل مشاهده شد (جدول ۷)، که از افزایش ۳۹/۶ درصدی عملکرد دانه نسبت به شرایط عدم کاربرد کودهای زیستی و پوترسین تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی برخوردار بود (جدول ۷).

بحث و نتیجه گیری

محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی برگ پرچم: به‌نظر می‌رسد محدودیت آبی، فلورسانس حداکثر و فلورسانس متغیر را به‌دلیل ممانعت از فتواکسیداسیون فتوسیستم II و ایجاد اختلال در انتقال الکترون به فتوسیستم I، کاهش می‌دهد که از این طریق با محدود کردن عملکرد کوانتومی گیاه موجب تخریب و کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌شود (جدول ۴) (۴۸). از طرفی میزان کاهش محتوای کلروفیل کل و کارتنوئید در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی به مراتب بیشتر از قطع آبیاری در مرحله سنبله‌دهی است زیرا مرحله آبستنی در مقایسه با مرحله سنبله‌دهی حساس به کمبود آب است از این رو قطع آبیاری در مرحله آبستنی نسبت به مرحله سنبله‌دهی، به‌دلیل محدودیت بیشتر و زودتر جذب عناصر غذایی از جمله نیتروژن و کاهش محتوای نسبی آب گیاه، با ایجاد اختلال در سیستم فتوسنتزی و عملکرد کوانتومی موجب تخریب بیشتر کلروفیل می‌شود (۲۱). بخشی از افزایش محتوای کلروفیل و کاروتنوئید تحت همزیستی ریشه گیاه با قارچ میکوریزا را می‌توان به اثر مثبت این قارچ در جذب عناصر غذایی مورد نیاز از قبیل نیتروژن و منیزیم نسبت داد (۲۶) که از عناصر اصلی ساختار کلروفیل به حساب می‌آیند. نتایج مشابهی نیز توسط هاشم و همکاران (۲۰۱۹) مبنی بر اینکه کاربرد میکوریزا تحت شرایط محدودیت آبی از طریق افزایش جذب نیتروژن و فسفر موجب بهبود محتوای کلروفیل و کاروتنوئید برگ نخود می‌شود گزارش شده است (۳۴). الجازع (۱۳۹۶) نیز افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی به‌واسطه کاربرد پوترسین را وجود نیتروژن در ساختار پلی‌آمین‌ها نست داد و اظهار داشت که پلی‌آمین‌ها با جلوگیری از تولید اتیلن و نقش حفاظتی که در برابر غشاء تیلاکوئید دارند مانع تجزیه کلروفیل و کاروتنوئید می‌شوند (۱۰). بخش دیگری از افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی به‌واسطه محلول‌پاشی پوترسین را می‌توان به بهبود عملکرد کوانتومی برگ پرچم نسبت داد (جدول ۴)، در این زمینه اسلام و همکاران (۲۰۲۲) اظهار داشتند کاربرد پوترسین با بهبود شاخص‌های فلورسانس کلروفیل (فلورسانس حداکثر، فلورسانس متغیر و عملکرد کوانتومی) موجب کاهش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی تحت شرایط محدودیت آبی شد (۳۵). همچنین گزارش شده است که کاربرد توام قارچ میکوریزا و پوترسین در شرایط محدودیت آبی، از طریق کاهش پراکسیداسیون لیپیدی و هدایت الکتریکی برگ، ضمن بهبود عملکرد کوانتومی موجب افزایش محتوای کلروفیل برگ ماشک گل خوشه‌ای شد (۱۴). بخشی از افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی با کاربرد ورمی‌کمپوست تحت شرایط تنش را می‌توان به بالا بودن غلظت آهن، روی و نیتروژن موجود در ورمی‌کمپوست (جدول ۲) نسبت دادن که از عناصر اساسی در سنتز کلروفیل محسوب می‌شود. نتایج مشابهی نیز توسط محمدی کله‌سرلو و همکاران (۱۴۰۰) مبنی بر افزایش محتوای کلروفیل با کاربرد ورمی‌کمپوست تحت شرایط تنش گزارش شده است (۱۹). بخشی از افزایش محتوای کلروفیل کل را در شرایط کاربرد ورمی‌کمپوست می‌توان به افزایش برخی اسمولیت‌های سازگار همچون پرولین و قندهای محلول و کاهش محتوای مالون دی‌الدئید (جدول ۷) نسبت داد. در این راستا برخی محققین نیز بیان کردند

که کاربرد ورمی‌کمپوست در شرایط محدودیت آبی، به‌دلیل بهبود جذب فسفر و نیتروژن و افزایش تولید قندهای محلول و پرولین، ضمن کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید و افزایش پایداری غشاء موجب افزایش محتوای کلروفیل برگ کلزا شد (۴۴). نظری و همکاران (۱۴۰۰) نیز افزایش محتوای کلروفیل به‌واسطه کاربرد توام قارچ میکوریزا و ورمی‌کمپوست در شرایط محدودیت آبی را به افزایش جذب نیتروژن، بهبود محتوای نسبی آب و عملکرد کوانتومی و کاهش هدایت الکتریکی برگ تریتیکاله نسبت دادند (۲۱).

محتوای آنتوسیانین برگ پرچم: در شرایط تنش، میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی و سنتز ترکیبات با خاصیت آنتی‌اکسیدانی برای محافظت از گیاه افزایش می‌یابد. آنتوسیانین‌ها ترکیباتی با خاصیت آنتی‌اکسیدانی هستند و افزایش محتوای آن‌ها منجر به افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی می‌شود (۵۸). فراهمی نیتروژن می‌تواند بر سنتز متابولیت‌های ثانویه از جمله آنتوسیانین از طریق افزایش فعالیت فنیل آلانین آمونیاک لیاز (PLA) تاثیر بگذارد (۵۸)، از آنجایی که پلی‌آمین‌ها ترکیباتی هستند که در ساختار خود نیتروژن دارند، احتمالا محلول‌پاشی پلی‌آمین‌ها با افزایش میزان نیتروژن و بهبود محتوای کربوهیدرات و همچنین ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه، موجب افزایش محتوای آنتوسیانین شده است (۵۸). به‌طور کلی پلی‌آمین‌ها از طریق تاثیر بر بیان ژن‌های دخیل در بیوسنتز ترکیبات فنلی و آنتوسیانین نظیر فنیل‌آلانین آمونیالیاز (Phenylalanin amonia lyase PAL) و چالکون ایزومراز (Chalcone isomerase) موجب افزایش محتوای آنتوسیانین می‌شوند (۵۵). همچنین پوترسین از طریق کاهش پیری و همچنین کاهش تنفس و تولید اتیلن موجب می‌شود که تجزیه ترکیبات فنلی از جمله آنتوسیانین کاهش یابد (۳۹). پوترسین با کاهش انسداد آوندی، کاهش سنتز اتیلن و افزایش فشار اسمزی موجب افزایش سنتز رنگدانه‌ها و در نتیجه بهبود محتوای آنتوسیانین می‌شود (۲۹).

بخشی از بهبود محتوای آنتوسیانین برگ پرچم به‌واسطه کاربرد ورمی‌کمپوست را می‌توان به افزایش فراهمی عناصر عذایی (جدول ۲) نسبت داد، در این راستا تئونیسن و همکاران (۲۰۱۰) اظهار داشتند که درصد بالای هیومیک اسید موجود در ورمی‌کمپوست و همچنین، افزایش محتوای عناصر غذایی از جمله نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، گوگرد، آهن، منگنز، روی و مس موجب بهبود محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و افزایش ساخت ترکیبات فنولیک همچون آنتوسیانین می‌شود (۵۴). همچنین گزارش شده است، ریشه تلقیح شده با ورمی‌کمپوست و میکوریزا توانایی ساخت و ترشح مواد زیستی فعال مانند ویتامین‌های گروه B، اسید نیکوتنیک، اسید پنتوتنیک، بیوتین، اکسین‌ها، جیبرلین‌ها و غیره را دارند که این مواد موجب افزایش محتوای ماده آلی و هیدرات‌های کربن گیاه و در نتیجه افزایش آنتوسیانین می‌شود (۲۲).

عملکرد کوانتومی (F_v/F_m) برگ پرچم: محدودیت آبی از طریق تخریب رنگدانه‌های فتوسنتزی، جلوگیری از فتواکسیداسیون فتوسیستم II و ایجاد اختلال در انتقال الکترون به فتوسیستم I منجر به افزایش فلورسانس حداقل (F_0) و کاهش فلورسانس حداکثر (F_m) می‌شود که در نهایت عملکرد کوانتومی را کاهش می‌دهد (۴۸). مرحله آبستنی در مقایسه با مرحله سنبله‌دهی حساس به کمبود آب است از این رو قطع آبیاری در مرحله آبستنی نسبت به مرحله سنبله‌دهی، به‌دلیل محدودیت بیشتر و زودتر در جذب آب و کاهش بیشتر محتوای نسبی آب گیاه، با ایجاد اختلال در سیستم فتوسنتزی موجب کاهش بیشتر عملکرد کوانتومی در مقایسه با قطع آبیاری در مرحله سنبله‌دهی شد. بخشی از بهبود عملکرد کوانتومی برگ پرچم تحت شرایط محدودیت آبی به‌واسطه کاربرد قارچ میکوریزا و

ورمی‌کمپوست را، می‌توان به افزایش شاخص نیتروژن و محتوای کلروفیل نسبت داد (جدول ۴). کاربرد قارچ میکوریزا، واکنش‌های نوری و انتقال الکترون در فتوسیستم IIرا از گیرنده اولیه به ثانویه افزایش می‌دهد که از این طریق اثرات نامطلوب تنش‌های محیطی بر برداشت نور، ظرفیت تثبیت نیتروژن و انتقال الکترون به پلاستوکینون را افزایش و همچنین با بهبود محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی موجب بهبود شاخص‌های فلورسانس کلروفیل و عملکرد کوانتومی می‌شوند (۳۸). ظفری و همکاران (۲۰۱۶) اظهار داشتند که کاربرد قارچ میکوریزا به‌دلیل بهبود جذب نیتروژن، موجب افزایش محتوای قندهای محلول و پرولین می‌شود که از طریق تنظیم پتانسیل اسمزی و افزایش محتوای نسبی آب، عملکرد کوانتومی برگ را افزایش می‌دهد (۵۹). به‌نظر می‌رسد کاربرد ورمی‌کمپوست در شرایط محدودیت آبی نیز به‌دلیل نقش موثر در جذب و نگهداری عناصر و بهبود رنگدانه‌های فتوسنتزی، موجب افزایش فلورسانس متغیر و فلورسانس حداکثر و در نهایت بهبود نسبت F_v/F_m می‌شود (۸). در این راستا افتاده فدافن و همکاران (۱۳۹۶) اظهار داشتند که کاربرد ورمی‌کمپوست از طریق بهبود فعالیت‌های میکروبی خاک و کمک به جذب بیشتر عناصر غذایی، ضمن افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی، در کاهش فلورسانس حداقل و افزایش فلورسانس متغیر، فلورسانس حداکثر و عملکرد کوانتومی تاثیر داشت (۴). همچنین گزارش شده است که کاربرد توام قارچ میکوریزا و ورمی‌کمپوست به‌دلیل افزایش جذب نیتروژن و بهبود محتوای نسبی آب، محتوای کلروفیل و کاهش هدایت الکتریکی برگ، موجب افزایش عملکرد کوانتومی برگ تریتیکاله در شرایط محدودیت آبی شد (۲۱). بخش دیگری از بهبود عملکرد کوانتومی برگ به‌واسطه کاربرد پوترسین را می‌توان به افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی نسبت داد (۴۹). در این راستا اسلام و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند، محلول‌پاشی پوترسین تحت شرایط محدودیت آبی از طریق بهبود سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه و جلوگیری از کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی به‌وسیله گونه‌های فعال اکسیژن، ضمن بهبود شاخص‌های فلورسانس کلروفیل (فلورسانس حداکثر و فلورسانس متغیر)، موجب افزایش عملکرد کوانتومی شد (۳۵). همچنین، سیدشریفی و همکاران (۱۳۹۹) بیان کردند که کاربرد توام قارچ میکوریزا و پوترسین در شرایط محدودیت آبی از طریق کاهش محتوای کلروفیل و افزایش هدایت الکتریکی و محتوای مالون‌دی‌آلدهید، موجب افزایش عملکرد کوانتومی برگ ماشک گل خوشه‌ای شد (۱۴). در این بررسی نیز به‌نظر می‌رسد کاربرد توام ورمی‌کمپوست و میکوریزا و محلول‌پاشی پوترسین با بهبود رنگدانه‌های فتوسنتزی (جدول ۴)، موجب افزایش عملکرد کوانتومی (F_v/F_m) برگ پرچم شد (جدول ۴).

شاخص نیتروژن برگ پرچم: نیتروژن عمدتا به‌صورت جریان توده‌ای توسط ریشه گیاه جذب می‌شود و در خاک‌هایی که با محدودیت آبی مواجه است، جذب آن به‌دلیل اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی از جمله کاهش میزان تعرق، کاهش می‌یابد. همچنین گزارش شده است که کاهش پتانسیل آب خاک موجب کاهش سطح تماس نیتروژن با ریشه و کاهش تحرک عناصر غذایی در خاک می‌شود که در نهایت موجب کاهش محتوای نیتروژن در اندام هوایی می‌شود (۵۲). در این راستا نیکبختایی و همکاران (۲۰۰۸) اظهار داشتند که تنش خشکی جذب مواد غذایی به‌وسیله ریشه‌ها و انتقال این مواد به ساقه را کاهش می‌دهد که این کاهش به‌دلیل محدود شدن سرعت تعرق، آسیب رساندن به انتقال فعال و کاهش قابلیت نفوذ غشایی است. زیرا جذب مواد غذایی از محلول خاک با وضعیت آب خاک ارتباط دارد و با کاهش رطوبت خاک، جریان انتشاری مواد غذایی به سطح ریشه کاهش می‌یابد (۴۷). ولی در چنین شرایطی کاربرد قارچ میکوریزا می‌تواند با افزایش سطح جذب ریشه از طریق تولید شبکه گسترده‌ای از هیف‌ها و همچنین ترشح اسیدهای عالی که منجر به افزایش محلولیت و دسترسی بیشتر به عناصر

غذایی در محیط اطراف ریشه (رایزوسفر) می‌شود، موجب افزایش جذب نیتروژن می‌شود (۲۶). در این راستا ساجدی و همکاران (۱۳۸۹) بیان کردند که قارچ میکوریزا در شرایط محدودیت آبی به‌دلیل بهبود روابط آبی گیاه و افزایش فشار تورگر و همچنین با افزایش سطح جذب ریشه از طریق انتشار میسلیوم‌های خارجی خود، به منافذ ریز خاک نفوذ می کند که امکان ورود ریشه‌های موئین برای جذب آب در شرایط عادی در چنین مناطقی وجود ندارد که با این نفوذ ضمن جذب آب و عناصر غذایی و انتقال آن به گیاه، در نهایت موجب افزایش محتوای نیتروژن می‌شود (۱۳). بالا بودن محتوای نیتروژن موجود در ورمی‌کمپوست مورد استفاده (جدول ۲) که از عناصر اساسی در سنتز کلروفیل محسوب می‌شوند از دیگر دلایل افزایش شاخص نیتروژن تحت چنین شرایطی است. با حضور نیتروژن در ورمی‌کمپوست، احتمالا میزان دسترسی گیاهان به نیتروژن خاک به شکل نیترات افزایش یافته (۳۶) و فعالیت نیترات ردوکتاز، نیتریت ردوکتاز، گلوتامین سنتتاز و گلوتامات سنتاز در مواجه با تنش نیز افزایش می‌یابد (۳۷). نظری و همکاران (۱۴۰۰) نیز اظهار داشتند که کاربرد توام قارچ میکوریزا و ورمی‌کمپوست با افزایش فراهمی و بهبود جذب نیتروژن، موجب افزایش شاخص نیتروژن برگ تریتیکاله در شرایط محدودیت آبی شد (۲۱). رضوانی‌پور (۱۳۹۴) اظهار داشت محلول‌پاشی پلی‌آمین‌ها موجب بهبود ساختار ریشه از طریق افزایش درصد ریشه‌های مویین و کاهش ریشه‌های ضخیم می‌شود، که این تغییرات موجب بهبود جذب عناصر و افزایش غلظت عناصر غذایی از جمله نیتروژن در گیاه می‌شود (۱۲). بخش دیگری از افزایش شاخص نیتروژن را می‌توان به وجود نیتروژن در ساختار پلی‌آمین‌ها نسبت داد که موجب افزایش محتوای نیتروژن در گیاه می‌شود (۱۰).

هدایت روزنه‌ای برگ پرچم: به‌نظر می‌رسد محدودیت آبی با کاهش در محتوای نسبی آب برگ‌ها موجب کاهش پتانسیل آب برگ در شرایط محدودیت آبی می‌شود که در چنین شرایطی با بسته شدن روزنه‌ها موجب کاهش هدایت روزنه‌ای و در نهایت کاهش سرعت فتوسنتز و متعاقبا کاهش رشد گیاه می‌شود (۲۷). بخشی از افزایش هدایت روزنه‌ای برگ پرچم به‌واسطه کاربرد ورمی‌کمپوست را می‌توان به عناصر غذایی موجود در ورمی‌کمپوست مورد استفاده (جدول ۲) و افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، قندهای محلول و پرولین برگ پرچم (جدول ۴ و ۷) و کاهش هدایت الکتریکی و محتوای مالون‌دی‌آلدهید برگ پرچم (جدول ۷) نسبت داد، در این راستا گزارش شده است که کاربرد ورمی‌کمپوست در چنین شرایطی از طریق افزایش جذب نیتروژن و بهبود محتوای کلروفیل موجب افزایش تولید قندهای محلول و پرولین در گیاه می‌شود که ضمن بهبود پتانسیل آب برگ‌ها و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی و افزایش پایداری غشاء موجب افزایش محتوای نسبی آب و هدایت روزنه‌ای برگ کلزا شد (۴۴). همچنین برخی محققین، افزایش هدایت هیدرولیکی خاک، کاهش مقاومت روزنه‌ای به‌وسیله تغییر در تعادل هورمون‌های گیاهی و جذب بیش‌تر آب توسط گیاه را، از دلایل اصلی افزایش هدایت روزنه‌ای در کاربرد میکوریزا عنوان کردند (۱۵). بخش دیگری از افزایش هدایت روزنه‌ای برگ پرچم (جدول ۴) به‌واسطه کاربرد میکوریزا را می‌توان به افزایش محتوای نسبی آب، محتوای کلروفیل و عملکرد کوانتومی برگ پرچم (جدول ۴) نسبت داد که در این راستا خیری‌زاده آروق و همکاران (۱۳۹۷) بیان کردند که کاربرد میکوریزا در شرایط تنش با بهبود محتوای نسبی آب، محتوای کلروفیل و عملکرد کوانتومی برگ پرچم، موجب افزایش هدایت روزنه‌ای برگ پرچم تریتیکاله شد (۱۱). محسنی محمدجانلو و همکاران (۱۴۰۱) بیان کردند که کاربرد قارچ میکوریزا و پوترسین با افزایش محتوای نسبی آب و شاخص کلروفیل، عملکرد کوانتومی برگ را افزایش بخشید که با بهبود شرایط فتوسنتزی گیاه موجب افزایش هدایت روزنه‌ای گندم در شرایط محدودیت آبی شد (۱۸). همچنین، گزارش شده

است که کاربرد پلی‌آمین‌ها نیز از طریق افزایش جذب آب موجب تنظیم حرکات روزنه‌ای می‌شوند (۴۳).

محتوای نسبی آب برگ پرچم: به‌نظر می‌رسد محدودیت آبی با بستن روزنه‌ها، موجب کاهش هدایت روزنه‌ای می‌شود که در ادامه با کاهش پتانسیل آب، محتوای نسبی آب برگ‌ها را کاهش می‌دهد که در نهایت موجب کاهش سرعت فتوسنتز و متعاقبا کاهش رشد گیاه می‌شود (۲۷). بخشی از افزایش محتوای نسبی آب برگ پرچم به‌واسطه کاربرد قارچ میکوریزا و پوترسین را می‌توان به افزایش شاخص نیتروژن (جدول ۴)، محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی برگ پرچم (جدول ۴) نسبت داد که با بهبود فتوسنتز و تولید مواد فتوسنتزی بیشتر ضمن افزایش محتوای قندهای محلول و پرولین برگ پرچم (جدول ۷) و افزایش پتانسیل آب برگ‌ها موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ پرچم (جدول ۴) می‌شود. در این راستا رضوانی‌پور (۱۳۹۴) اظهار داشت که کاربرد قارچ میکوریزا و پوترسین از طریق گسترش هیف و جذب عناصر غذایی از جمله نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم، کلسیم، آهن و روی موجب افزایش تولید اسمولیت های سازگار و در نهایت افزایش جذب آب شد (۱۲). ظفری و همکاران (۲۰۱۶) نیز بیان کردند که کاربرد قارچ میکوریزا با افزایش جذب نیتروژن و افزایش تولید پرولین و قندهای محلول در گیاهان از طریق تنظیم پتانسیل اسمزی، موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ می‌شود (۵۹). همچنین، گزارش شده است که کاربرد پلی‌آمین‌ها نیز با تنظیم حرکات روزنه‌ای موجب افزایش جذب آب می‌شوند (۴۳).

کاربرد ورمی‌کمپوست نیز با بهبود جذب نیتروژن و افزایش محتوای کلروفیل، تولید قندهای محلول و پرولین را در گیاه افزایش می‌دهد که تحت چنین شرایطی با افزایش پتانسیل آب برگ‌ها و همچنین کاهش پراکسیداسیون لیپیدی و افزایش پایداری غشاء، محتوای نسبی آب برگ در کلزا افزایش یافت (۴۴). همچنین، گزارش شده است که کاربرد قارچ میکوریزا و ورمی‌کمپوست با افزایش فراهمی عناصر غذایی و بهبود عملکرد کوانتومی و شرایط فتوسنتزی گیاه، موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ پرچم تریتکاله می‌شود (۲۱)، که با یافته‌های این پژوهش هم‌خوانی دارد.

هدایت الکتریکی و محتوای مالوندی‌آلدهید برگ پرچم: حساسیت بیشتر مرحله آبستنی در مقایسه با مرحله سنبله-دهی به اثرات ناشی از محدودیت آبی موجب شد که اعمال محدودیت آبی در مرحله آبستنی نسبت به مرحله سنبله‌دهی، با تاثیر بیشتر در کاهش جذب عناصر عذایی از جمله نیتروژن و محتوای نسبی آب، موجب اختلال در سیستم فتوسنتزی و افزایش هدایت الکتریکی برگ شود (۲۱). تنش اکسیداتیو القا شده به‌وسیله انواع اکسیژن فعال در چنین شرایطی، به‌دلیل تخریب ساختار غشاء، محتوای مالوندی‌آلدهید را افزایش میدهد (۶)، که در چنین شرایطی کاربرد پلی‌آمین‌ها، سیالیت غشاء از طریق فعالیت حذفی رادیکال‌های آزاد، غشاهای سلولی را در برابر اکسید شدن حفظ می‌کنند که بدین ترتیب مقاومت غشاها را افزایش می‌دهند و می‌توانند موجب توقف سنتز اتیلن شده و غشاهای سلولی را پایدار نگه دارند (۲). در این راستا هاندا و ماتو (۲۰۱۰) بیان کردند که کاربرد پلی‌آمین‌ها از طریق اتصال به قسمت‌های آنیونی درشت مولکول‌ها و غشای پلاسمایی و هم افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی، موجب تاخیر پیری سلول و کاهش تولید مالوندی‌آلدهید در سلول می‌شوند (۳۲). گزارش شده است که کاربرد توام پوترسین و قارچ میکوریزا با افزایش محتوای کلروفیل و عملکرد کوانتومی ضمن افزایش تولید قندهای محلول در برگ، موجب کاهش پراکسیداسیون لیپیدی و هدایت الکتریکی برگ شد (۱۴). بخش دیگری از کاهش هدایت الکتریکی و محتوای مالوندی‌آلدهید برگ پرچم به‌واسطه کاربرد قارچ میکوریزا را می‌توان به بهبود محتوای پرولین برگ پرچم (جدول ۷) نسبت داد. که در این راستا اشرف و همکاران (۱۳۹۶) اظهار داشتند که کاربرد میکوریزا در

شرایط محدودیت آبی می‌تواند با افزایش محتوای پرولین، موجب کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید یا پراکسیداسیون لیپیدی غشاء شود (۳). همچنین مامنبی و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند که کاربرد ورمی‌کمپوست در شرایط محدودیت آبی با بهبود جذب نیتروژن، فعالیت آنزیم‌های آنتی-اکسیدانی و محتوای اسمولیت‌های سازگار (محتوای پرولین و قندهای محلول)، موجب افزایش پایداری غشاء و در نهایت کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید برگ کلزا شد (۴۴). به‌نظر می‌رسد در این بررسی نیز کاربرد ورمی‌کمپوست با افزایش شاخص نیتروژن و محتوای پرولین و قندهای محلول برگ پرچم (جدول ۷) موجب کاهش هدایت الکتریکی و محتوای مالون‌دی‌آلدهید (جدول ۷) برگ پرچم تریتیکاله شد.

محتوای قندهای محلول و پرولین برگ پرچم: از آنجایی که یکی از مسیرهای تولید پرولین گلوتامات می‌باشد. از این رو با افزایش تولید قندهای محلول، میزان تولید گلوتامات افزایش می‌یابد و سنتز پرولین نیز تشدید می‌شود (۱۴). در شرایط تنش قندهای محلول و پرولین اصلی‌ترین محلول‌های آلی هستند که در تنظیم اسمزی شرکت دارند. انباشت قندهای محلول و پرولین در شرایط محدودیت آبی، علاوه بر نقش فیزیولوژیک مهمی که از نظر تامین انرژی ایفا می‌کند، می‌تواند موجب کاهش پتانسیل اسمزی سلول شده و از طریق تنظیم اسمزی موجب بالاتر نگه‌داشتن میزان آب نسبی در گیاهان شود و به این ترتیب در سازوکار تحمل به محدودیت آبی نقش مهمی داشته باشد (۹). بخشی از افزایش محتوای قندهای محلول و پرولین برگ پرچم به‌واسطه کاربرد قارچ میکوریزا را می‌توان به افزایش جذب و بهبود محتوای نیتروژن برگ پرچم (جدول ۴) نسبت داد که در این راستا ظفری و همکاران (۲۰۱۶) بیان کردند که کاربرد قارچ میکوریزا با افزایش جذب عناصر غذایی به‌خصوص نیتروژن موجب افزایش تولید پرولین و قندهای محلول در گیاهان می‌شود (۵۹). محلول‌پاشی پوترسین موجب می‌شود نیاز گیاه به پلی‌آمین‌های درونی کاهش پیدار کرده و در نتیجه‌ی کاتابولیسم پلی‌آمین‌های درونی، میزان پرولین گیاه افزایش پیدار کند (۳۱). در این راستا رضوانی‌پور (۱۳۹۴) اظهار داشت که کاربرد قارچ میکوریزا و پوترسین از طریق گسترش هیف و جذب عناصر غذایی از جمله نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم، کلسیم، آهن و روی موجب افزایش محتوای کلروفیل، تولید قند و بهبود جذب آب شد (۱۲). بخش دیگری از افزایش محتوای قندهای محلول و پرولین به‌واسطه کاربرد ورمی‌کمپوست را می‌توان به افزایش شاخص نیتروژن و محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی برگ پرچم (جدول ۴) نسبت داد، که در این راستا مامنبی و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند که کاربرد ورمی‌کمپوست در شرایط محدودیت آبی با بهبود جذب نیتروژن و افزایش محتوای کلروفیل موجب افزایش تولید قندهای محلول و پرولین در برگ کلزا شد (۴۴). وانگ و همکاران (۲۰۱۱) نیز اظهار داشتند که کاربرد کودهای آلی از جمله ورمی‌کمپوست در شرایط محدودیت آبی، با افزایش اسید آمینه‌های ضروری به‌ویژه گلوتامات و آرژینین که از پیش-سازهای تولید پرولین می‌باشد موجب افزایش تجمع پرولین و در نهایت افزایش تحمل گیاه در مواجهه با تنش-های محیطی مثل شوری و خشکی می‌شود (۵۶).

درصد پروتئین برگ پرچم: یکی از بارزترین اثرات محدودیت آبی تاثیر آن در متابولیسم پروتئین است، از آنجایی‌که نیتروژن در گیاهان به‌صورت پروتئین تکامل می-یابد، به‌نظر می‌رسد با توجه به تاثیر میکوریزا در افزایش جذب عناصر به‌ویژه نیتروژن و نقش ورمی‌کمپوست مورد استفاده در افزایش دسترسی به نیتروژن (جدول ۲) مورد نیاز برای تولید اسیدهای آمینه و کاهش تجزیه پروتئین‌ها (۱۷)، از دلایل دیگر افزایش محتوای پروتئین تحت چنین شرایطی باشد. در این راستا مایسین و همکاران (۲۰۱۰) افزایش پروتئین در کاربرد ورمی‌کمپوست را، به تامین مقادیر قابل توجهی از عناصر پیش‌نیاز برای تولید پروتئین از ورمی‌کمپوست نسبت دادند (۴۶). ظفری و همکاران

(۲۰۱۶) نیز افزایش محتوای پروتئین برگ به‌واسطه کاربرد قارچ میکوریزا را به بهبود جذب نیتروژن و افزایش محتوای نسبی آب برگ نسبت دادند (۵۹). همچنین، ساجدی و همکاران (۱۳۸۹) بیان کردند که قارچ میکوریزا در شرایط محدودیت آبی به‌دلیل بهبود روابط آبی گیاه و افزایش فشار تورگر، و همچنین با افزایش سطح جذب ریشه از طریق انتشار میسلیوم‌های خارجی به منافذ ریز خاک که امکان ورود ریشه‌های موئین برای جذب آب وجود ندارد، آب و عناصر غذایی را جذب و به گیاه منتقل می‌کند، که در نهایت با افزایش میزان نیتروژن، موجب بهبود محتوای پروتئین می‌شود (۱۳). پلی‌آمین‌ها به‌دلیل خاصیت چسبندگی به RNA، DNA و پروتئین‌ها، و همچنین از طریق باز داشتن فعالیت RNAse و پروتئاز، از تخریب پروتئین‌ها جلوگیری می‌کند (۲). امرائی تبار و همکاران (۱۳۹۵) اظهار داشتند که محلول‌پاشی پوترسین با نابودی گونه‌های فعال اکسیژن، از تخریب پروتئین‌ها به‌وسیله رادیکال‌های آزاد اکسیژن جلوگیری کرده و موجب افزایش سنتز پروتئین‌ها در گیاه می‌شود (۵). سیدشریفی و همکاران (۱۳۹۹) نیز افزایش درصد پروتئین برگ به‌واسطه کاربرد توام قارچ میکوریزا و پوترسین را به افزایش محتوای کلروفیل و عملکرد کوانتومی برگ نسبت دادند (۱۴).

عملکرد دانه: اصولا میزان فلورسانس زمانی که پذیرنده الکترون در حالت احیا باشد، زیاد بوده و به این دلیل میزان فلورسانس متغیر (F_v) نیز در این شرایط زیاد می‌گردد، ولی موقعی که کینون در حالت اکسیداسیون باشد میزان فلورسانس کلروفیل کم شده و در نتیجه میزان فلورسانس متغیر کاهش پیدا می‌کند (۴۸). کاهش عملکرد دانه در شرایط محدودیت آبی می‌تواند ناشی از ممانعت از فتواکسیداسیون فتوسیستم II و اختلال در انتقال الکترون به فتوسیستم I باشد که در چنین شرایطی فلورسانس حداکثر، فلورسانس متغیر و عملکرد کوانتومی کاهش می‌یابد که در ادامه با تخریب و کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی موجب کاهش عملکرد دانه می‌شود (۴۸)، که با یافته‌های این پژوهش هم‌خوانی دارد. همچنین، به‌نظر می‌رسد قطع آبیاری در مرحله آبستنی نسبت به مرحله سنبله‌دهی به‌دلیل حساسیت بیشتر مرحله آبستنی به کمبود آب، از طریق محدودیت بیشتر در جذب عناصر غذایی از جمله نیتروژن و کاهش محتوای نسبی آب گیاه، و با ایجاد اختلال در سیستم فتوسنتزی، کاهش کلروفیل و عملکرد کوانتومی موجب کاهش عملکرد دانه تریتیکاله می‌شود (۲۱). بخش دیگری از افزایش عملکرد دانه به‌واسطه کاربرد ورمی‌کمپوست را می‌توان به فراهمی عناصر غذایی (جدول ۲) و بهبود محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و آنتوسیانین (جدول ۴ و ۵) نسب داد، در این راستا تئونیسن و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که درصد بالای هیومیک اسید موجود در ورمی‌کمپوست و همچنین، افزایش محتوای عناصر غذایی از جمله نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، گوگرد، آهن، منگنز، روی و مس، ضمن افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و آنتوسیانین موجب بهبود فتوسنتز و در نهایت عملکرد گیاه شد (۵۴). بخش دیگری از بهبود عملکرد دانه در شرایط محدودیت آبی به‌واسطه کاربرد قارچ میکوریزا را می‌توان به افزایش جذب نیتروژن (جدول ۴) گیاه نسبت داد که در بررسی ساجدی و همکاران (۱۳۸۹) نیز کاربرد قارچ میکوریزا در شرایط محدودیت آبی به‌دلیل بهبود روابط آبی گیاه و افزایش فشار تورگر و همچنین با افزایش سطح جذب ریشه از طریق انتشار میسلیوم‌های خارجی خود به منافذ ریز خاک که امکان ورود ریشه‌های موئین برای جذب آب وجود ندارد، آب و عناصر غذایی را جذب و به گیاه منتقل می‌کند، که در نهایت با افزایش محتوای نیتروژن و بهبود رنگدانه های فتوسنتزی، به تدوام فرآیند فتوسنتز و ماده‌سازی و افزایش عملکرد دانه کمک می‌کند (۱۳). همچنین، آقایی و همکاران (۱۴۰۱) بیان کردند که کاربرد میکوریزا در شرایط تنش از طریق کاهش هدایت الکتریکی برگ و بهبود محتوای نسبی آب، شاخص نیتروژن و

شاخص کلروفل موجب افزایش عملکرد دانه گندم شد (۷)، که با یافته‌های این پژوهش هم‌خوانی دارد. گزارش شده است که کاربرد ورمی‌کمپوست در شرایط محدودیت آبی، محتوای مالون‌دی‌آلدهید را از طریق بهبود جذب فسفر و نیتروژن و افزایش تولید قندهای محلول و پرولین، کاهش می‌دهد که ضمن بهبود محتوای کلروفیل برگ و پایداری غشاء موجب افزایش عملکرد دانه می‌شود (۴۴). نظری و همکاران (۱۴۰۰) نیز افزایش عملکرد دانه در شرایط محدودیت آبی به‌واسطه کاربرد میکوریزا و ورمی‌کمپوست را به افزایش محتوای نیتروژن و کلروفیل و همچنین بهبود عملکرد کوانتومی نسبت دادند (۲۱). همچنین با توجه به وجود نیتروژن در ساختار پلی‌آمین‌ها (۱۰) و تاثیر این ترکیبات در بهبود شاخص‌های فلورسانس کلروفیل (۳۵) زمینه را برای افزایش سنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی و آنتوسیانین فراهم می‌شود (۲۹) که در نهایت موجب افزایش عملکرد دانه می‌شود. سیدشریفی و همکاران (۱۳۹۹) اظهار داشتند که کاربرد توام قارچ میکوریزا و پوترسین از طریق بهبود محتوای اسمولیت‌های سازگار (محتوای پرولین و قندهای محلول) ضمن کاهش پراکسیداسیون لیپیدی و هدایت الکتریکی برگ، موجب افزایش محتوای کلروفیل شد که در چنین شرایطی با افزایش عملکرد کوانتومی، موجب افزایش تولید گیاه در شرایط محدودیت آبی شد (۱۴). در این بررسی نیز به‌نظر می‌رسد محلول‌پاشی پوترسین از طریق بهبود محتوای نیتروژن (جدول ۴)، عملکرد کوانتومی برگ پرچم (جدول ۴)، موجب بهبود محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و آنتوسیانین و در نهایت عملکرد دانه (جدول ۴، ۵ و ۷) شد.

کاربرد توام ورمی‌کمپوست با میکوریزا و محلول‌پاشی پوترسین در شرایط آبیاری کامل موجب بهبود شاخص نیتروژن و عملکرد کوانتومی و کاهش هدایت الکتریکی و محتوای مالون‌دی‌آلدهید برگ پرچم نسبت به شرایط عدم کاربرد کودهای زیستی و پوترسین تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی شد. کاربرد توام ورمی‌کمپوست، میکوریزا و محلول‌پاشی ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی نیز از بیش‌ترین محتوای قندهای محلول و پرولین برگ پرچم برخوردار بود. همچنین کاربرد ورمی‌کمپوست و میکوریزا و محلول‌پاشی ۰/۸ میلی‌مولار پوترسین در شرایط آبیاری کامل از بیش‌ترین محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، هدایت روزنه‌ای و محتوای نسبی آب برخوردار بود، که با افزایش ۵۹/۰۴ درصدی میزان پروتئین، موجب افزایش ۳۹/۶ درصدی عملکرد دانه ترتیکاله نسبت به شرایط عدم کاربرد کودهای زیستی و پوترسین تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی شد. به‌نظر می‌رسد کاربرد کودهای زیستی و پوترسین در شرایط محدودیت آبی می‌تواند با بهبود شاخص‌های فیزیولوژیک و رنگدانه‌های فتوسنتزی، عملکرد دانه تریتیکاله را حتی در شرایط محدودیت آبی افزایش دهد.

سپاسگزاری

مقاله مستخرج از بخشی از پایان‌نامه دکتری نویسنده اول می‌باشد. نویسندگان مراتب سپاس و قدرشناسی خود را از یکایک همکاران ارجمند در دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی که همکاری‌های ارزشمندی را در تمامی مراحل اجرای طرح معطوف داشته‌اند اعلام می‌دارند.

منابع

۱- ابطحی، س. م و باقرزاده، ک. (۱۳۹۳). بررسی مقایسه‌ای تولید علوفه و دانه چاودار، جو، تریتیکاله و ماشک در شرایط دیم. مجله زراعت دیم ایران، ۲(۲): ۱۰۵-۱۱۴.

۲- اسماعیل‌خان زندی، م و دانائی، ا. (۱۳۹۳). تاثیر محلول‌پاشی پیش از برداشت پوترسین، اسپرمین و اسپرمیدین بر برخی صفات، آنزیمی و ماندگاری گل رز رقم ***black baccarat*** روز

بوته. مجله زیست‌شناسی سلولی مولکولی گیاهی، ۹(۱-۲): ۱۱-۲۱.

۳- اشرف، ح؛ زکی‌زاده، ه؛ احتشامی، س. م و بیگلوئی، م. ح. (۱۳۹۶). ارزیابی همزیستی سه گونه قارچ میکوریزا بر ویژگی‌های بیوشیمیایی چمن‌های اگروپیرون (*Agropyron elongatum*) و پو آی چندساله (*Poa pratensis*) تحت تنش خشکی. پژوهش‌های تولید گیاهی، ۲۴(۳): ۲۷-۴۶.

۴- افتاده فدافن، ع؛ امینی فرد، م. ح؛ بهدانی، م. ع و مرادی‌نژاد، ف. (۱۳۹۶). اثر سطوح مختلف نیتروکسین و ورمی‌کمپوست بر عملکرد و رنگیزه‌های فتوسنتزی زعفران (*Crocus sativus* L.). مجله پژوهش‌های زعفران، ۵(۲): ۱۶۳-۱۷۹.

۵- امرایی تبار، س؛ ارشادی، ا و رباطی، ت. (۱۳۹۵). تاثیر پوترسین و اسپرمین بر تحمل به خشکی بادام و هلو. مجله به‌زراعی کشاورزی، ۱۸(۱): ۲۰۳-۱۸.

۶- امیری‌نژاد، م؛ اکبری، غ. ع؛ باقی‌زاده، ا؛ اله‌دادی، ا؛ شهبازی، م و نعیمی، م. (۱۳۹۴). اثر تنش خشکی و محلول‌پاشی آهن و روی بر برخی صفات بیوشیمیایی گیاه دارویی زیره سبز. به‌زراعی کشاورزی، ۱۷(۴): ۸۵۵-۸۶۶.

۷- آقایی، ف؛ سیدشریفی، ر و نریمانی، ح. (۱۴۰۱). تاثیر یونیکونازول و کودهای بیولوژیک بر عملکرد، شاخص‌های فلورسانس کلروفیل و برخی صفات فیزیولوژیک گندم تحت شرایط شوری خاک. پژوهش‌های گیاهی، ۳۵(۱): ۱۱۲-۱۲۴.

۸- باغبانی آرانی، ا؛ مدرس ثانوی، س. ع. م؛ مشهدی اکبر بوجار، م؛ اداوی، ظ و دهقان‌زاده جزی، ح. (۱۳۹۸). اثر تنش کم‌آبی بر شاخص‌های فلورسانس کلروفیل، رنگدانه‌های فتوسنتزی، تریگونلین و عملکرد دانه شنبلیله در واکنش به زئولیت و نیتروژن. مجله یافته‌های نوین در علوم زیستی، ۶(۲): ۲۲۹-۲۴۰.

۹- برزگر، ز؛ قاسمیان، ع؛ رئیسی ساداتی، س. ی و اسدی، ا. (۱۳۹۹). بررسی اثرات نانوکلات پتاسیم بر میزان قند محلول، پرولین، پروتئین کل و فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت تنش کم‌آبی. فرآیند و کارکرد گیاهی، ۹(۳۶): ۴۹-۶۲.

۱۰- الجازع، ح. م. (۱۳۹۶). بررسی اثر محلول‌پاشی پلی‌آمین (پوترسین) و عصاره مخمر بر رشد و عملکرد و درصد اسانس گیاه نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) تحت شرایط تنش شوری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی. دانشگاه فردوسی مشهد.

۱۱- خیری‌زاده آروق، ی؛ سیدشریفی، ر و خلیل‌زاده، ر. (۱۳۹۷). کاهش اثرات تنش شوری در تریتیکاله (Triticosecale ×) با کاربرد کودهای زیستی و روی. پژوهش‌های گیاهی، ۳۱(۴): ۸۰۱-۸۲۱.

۱۲- رضوانی‌پور، ش. (۱۳۹۴). تاثیر پلی‌آمین‌ها و همزیستی میکوریزائی بر رشد و گلدهی فریزیا (*Freesia* × *hybrid*). رساله دکتری. گروه علوم باغبانی. دانشگاه گیلان.

۱۳- ساجدی، ن؛ اردکانی، م، ساجدی، ع و بهرامی، ع. (۱۳۸۹). جذب برخی عناصر غذایی تحت تاثیر میکوریزا، سطوح مختلف روی و تنش خشکی در ذرت. مجله پژوهش‌های زراعی ایران، ۸(۵): ۷۸۴-۷۹۱.

۱۴- سیدشریفی، ر؛ سیدشریفی، ر و نریمانی، ح. (۱۳۹۹). تاثیر کودهای زیستی و پوترسین بر بیوماس، گره‌زایی و برخی صفات مورفولوژیکی و بیوشیمیایی ماشک گل خوشه‌ای تحت شرایط دیم. به‌زراعی کشاورزی، ۲۲(۴): ۵۱۳-۵۲۹.

۱۵- صالحی، ف؛ مرادی قهدریجانی، م؛ میرابوالفتحی، م و اصغرزاده، ن. ع. (۱۳۸۷). تاثیر کلونیزیاسون قارچ‌های میکوریزی (VA) و سطوح مختلف فسفر بر جذب فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و روی و صفات رویشی نهال پسته. پژوهش و سازندگی در زراعت و باغبانی، ۷۸: ۴۸-۵۶.

۱۶- عبادی، ن؛ سیدشریفی، ر و صدقی، م. (۱۳۹۹). اثر آبیاری تکمیلی و کودهای زیستی بر محتوای مالون‌دی‌آلدیی، آنتوسیانین و شاخص‌های فلورسانس کلروفیل جو دیم. مجله فیزیولوژی گیاهان زراعی، ۱۳(۴۹): ۴۵-۶۹.

۱۷- علیخانی، س و محمودی زرندی، م. (۱۳۹۸). اثر مایه‌زنی توام اندومیکوریز و باکتری‌های ریزوبیوم ملیلوتی و سودوموناس آئروژینوزا بر گیاه یونجه (*Medicago sativa*) در شرایط تنش آبی. مجله پژوهش‌های گیاهی، ۳۲(۱): ۱۳۹۸.

۱۸- محسنی محمدجانلو، ع؛ سیدشریفی، ر و خماری، س. (۱۴۰۱). تاثیر کودهای زیستی و پوترسین بر عملکرد دانه و برخی شاخص‌های فیزیولوژیکی گندم در سطوح مختلف آبیاری. به‌زراعی کشاورزی، ۲۴(۱): ۶۷-۸۳.

۱۹- محمدی کله‌سرلو، س؛ سیدشریفی، ر؛ صدقی، م؛ نریمانی، ح و خلیل‌زاده، ر. (۱۴۰۰). اثر شوری، ورمی‌کمپوست، هیومیک اسید و تلقیح بذر با فلاوباکتریوم بر پر شدن دانه چاندم. مجله دانش کشاورزی و تولید پایدار، ۳۱(۲): ۲۵۰-۲۶۹.

۲۰- نریمانی، ح؛ سیدشریفی، ر، خلیل‌زاده، ر و امین‌زاده، غ. ۱۳۹۷. تاثیر نانواکسید آهن در عملکرد، شاخص‌های فلورسانس کلروفیل و برخی صفات فیزیولوژیک گندم (*Triticum aestivum* L.) در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی. مجله زیست‌شناسی گیاهی ایران، ۱۰(۳۷): ۲۱-۴۰.

۲۱- نظری، ژ؛ سیدشریفی، ر و نریمانی، ح. (۱۴۰۰). اثر مایکوریزا، ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون بر صفات زراعی و فیزیولوژیکی تریتیکاله تحت شدت‌های مختلف تنش خشکی. مجله تولید گیاهان زراعی، ۱۴(۴): ۲۱-۴۶.

۲۲- ولی‌نژاد، ز؛ قلی‌زاده، ع؛ نعیمی، م؛ غلامعلی‌پور علمداری، ا و زارعی، م. (۱۳۹۸). تاثیر ورمی‌کمپوست و قارچ میکوریزا بر خصوصیات کمی و کیفی گیاه دارویی استویا (*Stevia rebaudiana* Bertoni). مجله تحقیقات گیاهان دارویی و معطر، ۳۵(۳): ۴۸۴-۵۰۰.

۲۳- یقینی، ف؛ سیدشریفی، ر، خماری، س و قاسمی، م. (۱۳۹۹). تاثیر آبیاری تکمیلی و تلقیح بذر با کودهای زیستی بر عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیک گندم دیم رقم رصد. مجله فرآیند و کارکرد گیاهی، ۹(۳۹): ۱۴۷-۱۶۳.

24- Arnon AN (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23: 112-121.

25- Bates LS, Walderen RD, Taere ID (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil*, 39: 205-207.

26- Begum N, Qin C, Ahanger MA, Raza S, Khan MI, Ashraf M, Ahmed N, Zhang L (2019). Role of *Arbuscular mycorrhizal* fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10: 1-15.

27- Bota J, Flexas J, Medrano H (2004). Is photosynthesis limited by decreased Rubisco activity and RuBP content under progressive water stress?. *Journal of New Phytolgist*, 162(3): 671-681.

28- Bradford MM (1976). A rapid and sensitive for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72: 248.

29- Danaee E, Abdossi V (2018). Effect of different concentrations and application methods of polyamines (Putrescine, Spermine, Spermidine) on some morphological, physiological, and enzymatic characteristics and vase life of *Rosa hybrida* cv. 'Dolce Vita' cut flower. *Journal of Ornamental Plants*, 8(3): 171-182.

30- Dubios M, Gilles KA, Hamilton JK, Roberts PA, Smith F (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Justus Liebigs Annalen der Chemie*, 28: 350-356.

31- Farooq M, Basra SMA, Wahid A, Cheema ZA, Cheema MA, Khaliq A (2008). Physiological role of exogenously applied glycinebetaine in improving drought tolerance of fine grain aromatic rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 194(5): 325 -333.

32- Handa AK, Mattoo, AK (2010). Differential and functional interactions emphasize the multiple roles of polyamines in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 487: 540-546.

33- Hasanuzzaman M, Alhaithloul HAS, Parvin K, Bhuyan MB, Tanveer M, Mohsin SM, Nahar K, Soliman MH, Mahmud JA, Fujita M (2019). Polyamine action under metal/metalloid stress: regulation of biosynthesis, metabolism, and molecular interactions. *International Journal of Molecular Sciences*, 20: 3215.

34- Hashem A, Kumar A, Al-Dbass AM, Alqarawi AA, Al-Arjani ABF, Singh G, Farooq M, Abd-Allah EF (2019). *Arbuscular mycorrhizal* fungi and biochar improves drought tolerance in chickpea. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26: 614-624.

35- Islam MJ, Uddin MJ, Hossain MA, Henry R, Begum MK, Sohel MAT, Mou MA, Ahn J, Cheong EJ, Lim YS (2022). Exogenous putrescine attenuates the negative impact of drought stress by modulating physiobiochemical traits and gene expression in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *PLOS ONE*, 17(1): e0262099.

36- Islam MR, Rahman SME, Rahman MM, Oh DH, Ra CS (2010). The effects of biogas slurry on the production and quality of maize fodder. *Turkish Journal of Agricultural and Forestry*, 34: 91-99.

37- Jabeen N, Ahmad R (2016). Growth response and nitrogen metabolism of sunflower (*Helianthus annuus* L.) to vermicompost and biogas slurry under salinity stress. *Journal of Plant Nutrition*, 40(1): 104-114.

38- Khalvandi M, Amerian M, Pirdashti H, Keramati S (2021). Does co-inoculation of mycorrhiza and *Piriformospora indica* fungi enhance the efficiency of chlorophyll fluorescence and essential oil composition in peppermint under irrigation with saline water from the Caspian Sea? *PLOS ONE*, 16(7): e0254076.

39- Khan AS, Singh Z, Abbasi NA (2007). Prestorage putrescine application suppresses ethylene biosynthesis and retards fruit softening during low temperature storage in 'Angelino' plum. *Postharvest Biology and Technology*, 46(1): 36-46.

40- Kheirizadeh Arough Y, Seyed Sharifi R, Sedghi M, Barmaki M (2016). Effect of Zinc and Bio Fertilizers on Antioxidant Enzymes Activity, Chlorophyll Content, Soluble Sugars and Proline in Triticale under Salinity Condition. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 44(1): 116-124.

41- Kostopoulou P, Barbayiannis N, Basile N (2010). Water relations of yellow sweet clover under the synergy of drought and selenium addition. *Plant Soil*, 330(1-2): 65-71.

42- Lakhdar A, Rabhi M, Ghnaya T, Montemurro F, Jedidi N, Abdelly C (2009). Effectiveness of compost use in salt-affected soil. *Journal of Hazardous Materials*, 171: 29-37.

43- Liu JH, Honda C, Morigiguchi, T (2006). Involvement of polyamine in floral and fruit development. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 40: 51-58.

44- Mamnabi SS, Nasrollahzadeh K, Ghassemi-Golezani, Raei Y (2020). Improving yield-related physiological characteristics of spring rapeseed by integrated fertilizer management under water deficit conditions. *Saudi Journal of Biology Science*, 27(3): 797-804.

45- Mita S, Murano N, Akaike M, Nakamura K (1997). Mutants of Arabidopsis thaliana with pleiotropic effects on the expression of the gene for beta-amylase and on the accumulation of anthocyanin those are inducible by sugars. *Plant Journal*, 11: 841-851.

46- Mycin TR, Lenin M, Selvakumar G, Thangadurai R (2010). Growth and nutrient content variation of groundnut *Arachis hypogaea* L. under vermicompost application. *Journal of Experimental Science*, 1(8): 12-16.

47- Nikbakhtai M, Babalar M, Walp Luo I, Etemadi N (2008). Effect of commercial humic acid on plant growth, nutrients uptake and postharvest life of gerbera. *Journal of Plant Nutrition*, 31: 2155- 2167.

48- Paknejad F, Nasri M, Tohidi Moghadam HR, Zahedi H, Jami Alahmad M (2007). Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters chlorophyll content and grain yield of wheat cultivars. *Journal of Biological Sciences*, 7(6): 841-847.

49- Qu Y, Jiang L, Wuyun T, Mu S, Xie F, Chen Y, Zhang L (2020). Effects of exogenous putrescine on delaying Senescence of cut foliage of *Nephrolepis cordifolia*. *Frontiers in Plant Science*, 11: 566824.

50- Rahbarian R, Khavari-Nejad R, Ganjeali A, Bagheri A, Najafi F (2011). Drought stress effects on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and water relations in tolerant and susceptible chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotyps. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 53: 47-56.

51- Scharf PC, Brouder SM, Hoeft RG (2006). Chlorophyll meter reading can predict nitrogen need and yield response of corn in the north-central USA. *Agronomy Journal*, 98: 655-665.

52- Silva TR, Cazetta JO, Carlin SD, Telles BR (2017). Drought-induced alterations in the uptake of nitrogen, phosphorus and potassium, and the relation with drought tolerance in sugar cane. *Ciência e Agrotecnologia*, 41: 117-127.

53- Stewart RC, Beweley JD (1980). Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. *Plant Physiology*, 65: 245-248.

54- Theunissen J, Ndakidemi PA, Laubscher CP (2010). Potential of vermicompost produced from plant west on the growth and nutrient status in vegetable production International. *Physical Sciences*, 5: 964-1973.

55- Vicente AR, Repice B, Martiinez GA, Chaves AR, Civello PM, Sozzi GO (2004). Maintenance of fresh boysenberry fruit quality with UV-C light and heat treatments combined with low storage temperature. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 79(5): 246-251.

56- Wang Y, Ma F, Li M, Liang D, Zou J (2011). Physiological responses of kiwifruit plants to exogenous ABA under drought conditions. *Plant Growth Regulation*, 64: 63-74.

57- Younas M, Zou H, Laraib T, Abbas W, Akhtar MW, Aslam MN, Amrao L, Hayat S, Abdul Hamid T, Hameed A, Kachelo GA, Elseehy M, El-Shehawi AM, Zuan AT, Li Y, Arif M (2021). The influence of vermicomposting on photosynthetic activity and productivity of maize (*Zea mays* L.) crop under semi-arid climate. *PLOS ONE*, 16(8): e0256450.

58- Yousefi F, Jabbarzadeh Z, Amiri J, Rasouli-Sadaghiani MH, Shaygan A (2021). Foliar application of polyamines improves some morphological and physiological characteristics of rose. *Folia Horticulture*, 33(1): 1-10.

59- Zafari M, Ebadi A, Jahanbakhsh Gode Kahriz S (2016). Synergistic effects of *Glomus mosseae* and *Sinorhizobium meliloti* on compatibility metabolites of alfalfa. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 26(3): 43-56.

60- Zahoor A., Ejaz AW, Sajjad A, Shazia A, Tanveer A, Wajid M, Osama BA, Terence T, Maryke L, Muhammad R (2018). Physiological responses of wheat to drought stress and its mitigation approaches. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40(80): 1-13

Effect of biofertilizers and putrescine on yield, photosynthetic pigments and some physiological traits of triticale under water limitation conditions

Narimani H.*, Seyed Sharifi R. and Sedghi M.

Dept. of Plant production and genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, I.R. of Iran.

Abstract

In order to study the effect of biofertilizers and putrescine on yield, photosynthetic pigments and some physiological traits of triticale under water limitation conditions, an experiment as factorial was conducted based on randomized complete block design with three replications at the research farm of University of Mohaghegh Ardabil during 2020. The experimental factors were included irrigation in three levels (full irrigation as control; irrigation withholding at 50% of heading stage and booting stage), application of biofertilizers (no application of biofertilizers as control, application of vermicompost, *Mycorrhiza*, both application vermicompost and *Mycorrhiza*), foliar application of putrescine (foliar application with water as control, foliar application of 0.4 and 0.8 mM). The results showed that both application of vermicompost with mycorrhiza and foliar application of 0.8 mM putrescine under irrigation withholding in booting stage increased soluble sugars and proline content (47.54 and 51.03%, respectively) in comparison with no application of biofertilizers and putrescine under full irrigation. Both application biofertilizers and foliar application of 0.8 mM putrescine under full irrigation decreased EC (54.01%) and malondialdehyde (52.17%) but increased total chlorophyll content, carotenoid, quantum yield, nitrogen index, stomatal conductivity and RWC (60.95, 46.03, 42.09, 36.07, 47.85, 57.7% respectively) protein content and grain yield (59.04 and 39.6% respectively) in comparison with no application of biofertilizers and putrescine under irrigation withholding in booting stage. It seems that both application of biofertilizers (vermicompost with mycorrhiza) and foliar application of 0.8 mM putrescine can increase the grain yield of triticale under water limitation conditions by improving the physiological indices.

Key words: Anthocyanin, chlorophyll content, mycorrhiza, quantum yield, vermicompost.