نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی
سال چهاردهم / شماره سوم / پاییز ۱۴۰۳/ مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۸۵ تا ۱۰۰

اثر تلقیح با گونه‌های قارچ میکوریزا بر عملکرد، اجزای عملکرد، رنگیزه‌های فتوسنتزی و میزان پرولین در گندم زراعی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

فرشاد سرخی[۱]*، مجتبی فاتح[۱] و رامین رستمی[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴)

چکیده

جهت مطالعه تأثیرگونه‌های قارچ میکوریزا آربوسکولار بر عملکرد، اجزای عملکرد، رنگیزه‌های فتوسنتزی و میزان پرولین گندم زراعی (*Triticum aestivum* L.) در رژیم‌های مختلف آبیاری، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه آزاد اسلامی واحد میاندوآب در سال ۱۴۰۰ اجرا شد. فاکتورهای آزمایشی شامل کاربرد گونه‌های قارچ میکوریزا آربسکولار در سه سطح شاهد (بدون تلقیح)، تلقیح با گونه *Glomus mosseae* و تلقیح با گونه *Glomus intraradices* و رژیم‌های آبیاری با دور ۶، ۱۳ و ۲۰ روز بودند. نتایج نشان داد تعداد سنبله، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، شاخص سبزینگی، رنگیزه‌های فتوسنتزی و محتوای پرولین تحت تأثیر تیمارهای دور آبیاری و قارچ میکوریزا قرار گرفتند. گونه *G. mosseae* تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت و میزان کلروفیل b رادر مقایسه با گونه *G. intraradices* به‌ترتیب ۵/۲۱، ۹/۷۳، ۸/۸۶، ۶/۹۶ و ۴/۰۸ درصد و در مقایسه با شاهد به‌ترتیب ۲۹/۹، ۳۰/۳، ۳۹/۷، ۲۷/۹ و ۲۱/۴ درصد افزایش داد. بیشترین تعداد سنبله در بوته، عملکرد دانه، شاخص سبزینگی و میزان کلروفیل a در اثر متقابل دور آبیاری ۶ روز و تلقیح با گونه *G. mosseae* به‌ترتیب ۶/۳۴ عدد،۶۱۲ گرم در مترمربع، ۶۲/۹ واحد اسپد و ۰/۳۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بود که با اثر متقابل دور آبیاری ۱۳ روز و تلقیح با *G. mosseae* از لحاظ آماری تفاوتی معنی‌داری مشاهده نشد. طبق نتایج این تحقیق، استفاده از گونه *G. mosseae* در شرایط دور آبیاری ۱۳ روز برای رسیدن به عملکرد مطلوب و همچنین استفاده بهینه از آب مصرفی در زراعت گندم مناسب است.

واژه‌های کلیدی: تنش آبی، شاخص برداشت، وزن دانه، کلروفیل، کود

۱. استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد میاندوآب، دانشگاه آزاد اسلامی، میاندوآب، ایران.
۲. استادیار، گروه آبیاری، واحد میاندوآب، دانشگاه آزاد اسلامی، میاندوآب، ایران.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Email: fsrsorkh@gmail.com

مقدمه

راهکارهای زیادی جهت پایداری در کشاورزی وجود دارد که یکی از آنها استفاده از کودهای بیولوژیک است (۳۴). قارچ‌های میکوریزا یکی از انواع کودهای بیولوژیک محسوب می‌شوند و از با اهمیت‌ترین میکروارگانیسم‌های موجود در اغلب خاک‌های تخریب نشده هستند. به‌طوری که در برخی تخمین‌های موجود در ۷۰ درصد از توده زنده جامعه میکروبی خاک‌ها را ریسه این قارچ‌ها تشکیل می‌دهد (۷). گندم (*Triticum aestivum* L.) از قدیمی‌ترین و پرمصرف‌ترین گیاهان زراعی جهان بوده و مهمترین منبع غذایی انسان است که در محدوده وسیعی از شرایط آب و هوایی جهان رشد می‌کند و دارای بیشترین پراکندگی در دنیا است (۲۰). در مناطق خشک و نیمه خشک، آب محدودیت اصلی بوده و خشکی از جمله مهم‌ترین عوامل القا کننده تنش در گیاهان زراعی به حساب می‌آید. چنین تنشی بر روی عملکرد اثر گذاشته و اغلب باعث ایجاد افت آن می‌شود (۱۲ و ۳۸). ایران سرزمینی است خشک و نیمه خشک با نزولات جوی بسیار کم، درحالی که میانگین بارندگی سالانه در سطح کره زمین حدود ۸۶۰ میلی‌متر تخمین زده می‌شود، متوسط بارندگی سالانه در ایران حدود ۱۸۹ میلی‌متر است. بنابراین متوسط بارندگی درایران حتی کمتر از یک سوم متوسط بارندگی جهانی است. همچنین توزیع زمانی و مکانی بارندگی در ایران با نیاز بخش کشاورزی که مصرف کننده اصلی آب در این کشور است مطابقت ندارد (۳۶). محدودیت منابع آب موجب شده که آب به‌عنوان مهم‌ترین نهاده تولید تلقی شود. عدم دسترسی به منابع آب کافی و بالا بودن هزینه‌های آبیاری، تامین نیاز آبی کامل محصولات را طی دوره‌هایی از رشد با مشکل مواجه می‌کند (۱۹). در این راستا، کم آبیاری در جهت حداکثر استفاده از واحد حجم آب مصرفی، تولید پایدار و امنیت غذایی است. آب صرفه جویی شده می‌تواند برای افزایش سطح زیر کشت و کاربردهای دیگر، استفاده یا ذخیره شود. در نتیجه کاهش عملکرد ناشی از کم آبیاری می‌تواند با سود به دست آمده از کاهش آب مصرفی جبران شود (۲۹ و ۳۳).

مصرف کود باید علاوه برافزایش تولید، کیفیت محصولات کشاورزی را ارتقاء دهد و موجب آلودگی محیط زیست به‌خصوص آب‌های زیرزمینی و محصولات کشاورزی نشود (۱۶ و ۳۵). مجموعه این مسائل، ضرورت تجدید نظر در روش‌های افزایش تولید محصول و لزوم فراهم سازی شرایط برای استفاده بیشتر از فرآیندهای مفید طبیعی و تولید مواد و کودهای بیولوژیک را ایجاب می‌کند (۳۷). از جمله این کودهای زیستی، قارچ‌های میکوریزا هستند. رابطه هم‌زیستی بین قارچ میکوریزا آربسکولار و ریشه‌های گیاه میزبان به میزان قابل‌توجهی رشد و جذب عناصر غذایی گیاه را افزایش می‌دهد (۱۷). قارچ‌های میکوریزا از نظر اکولوژیک اهمیت زیادی دارند، زیرا این موجودات در داخل و روی ریشه‌های گیاهان میزبان روابط هم‌زیستی ایجاد می‌کنند. گیاه میزبان منابع کربن مورد نیاز قارچ را فراهم می‌کند و قارچ نیز سبب افزایش جذب آب و عناصر غذایی گیاه میزبان می‌شود (۲۱). حدود ۷۰ درصد از گیاهان از جمله گندم با این قارچ‌ها رابطه همزیستی دارند به‌طوری که در این گیاهان، میکوریزا و نه ریشه، اندام اصلی جذب آب و عناصر غذایی محسوب می‌شود (۷). قارچ میکوریزا تعرق برگی را افزایش داده و سبب سهولت انتقال آب در گیاه می‌شود. قارچ مایکوریزا ارتباط آب با گیاه میزبان را با افزایش هدایت هیدرولیکی خاک، افزایش نسبت تعرق، کاهش مقاومت روزنه‌ها و با تغییر در تعادل هورمون‌های گیاهی بهبود می‌بخشد. بنابراین از این طریق محدودیت‌های حاصل از کم‌آبی را می‌تواند برطرف کند و باعث افزایش عملکرد شود (۲۳). در کشاورزی نوین، هدف نه فقط افزایش کمی، بلکه افزایش کیفی از طریق همزیستی با این قارچ‌ها است (۳۴). در کشورهایی که دارای اقلیم خشک هستند، نزولات جوی کم و منابع آب محدود است از این نظر استفادهٔ

بهینه از آب موجود کاملا ضروری است و باید از حداقل آب، حداکثر بهره‌برداری لازم شود تا سطح بیشتری به زیر کشت برده شود (۱۰ و ۳۶). در بین قارچ‌های *Glomus*، فراوانی *G. mosseae* از سایرین بیشتر است (۳). بهبود وضعیت ریزوسفر خاک در شرایط تنش، توسعه سیستم ریشه ها و بهبود جذب آب و عناصر غذایی توسط گیاه، افزایش سیستم دفاعی گیاه میزبان و کاهش خطرات اکسیداتیو ناشی از تنش کم‌آبی را می‌توان به اثرات مثبت قارچ میکوریزا آربوسکولار مرتبط دانست (۲۳). میرلناساری (۲۴) گزارش کرد که قارچ میکوریزا از طریق ایجاد شبکه گسترده هیف خود در داخل خاک و در محیط ریزوسفر سبب جذب عناصر فسفر، نیتروژن و انتقال این عناصر به گیاه میزبان می‌شود. کالواتی و همکاران (۱۷) گزارش کردند قارچ میکوریزا موجب افزایش میزان کلروفیل در گیاه جو زراعی (*Hordeum vulgare* L.) شد، به‌طوری که شاخص کلروفیل در تیمارهای تلقیح شده با قارچ میکوریزا ۲۳/۶ درصد نسبت به تیمار شاهد (عدم تلقیح با قارچ میکوریزا) افزایش نشان داد. در پژوهشی که در اتاقک‌های رشد انجام شده است هیف‌های قارچی میکوریزا توانستند بالغ بر ۸۰ درصد از فسفر، ۲۵ درصد از نیتروژن، ۱۰ درصد از پتاسیم، ۲۵ درصد از روی و ۶۰ درصد از مس مورد نیاز گیاه را تأمین کنند (۲۲). در ذرت (۱۸) و گندم (۳) پژوهش‌ها نشان دادند در حضور میکوریزا میزان عملکرد دانه افزایش معنی‌دار یافته است. پورسل و همکاران (۳۱) گزارش کردند که همزیستی بین سویا و قارچ آربوسکولار میکوریزا، راهکار بسیار موثری برای تعدیل اثر تنش خشکی است. گیاهان زراعی به‌طور پیوسته در معرض تنش کم‌آبی بوده و به روش‌های مختلف به تنش‌ها واکنش نشان می‌دهند. فهم و درک این واکنش‌ها کمک زیادی به تشریح نحوه رشد و میزان تولید آن‌ها در شرایط تنش‌زای محیطی خواهد کرد (۲۸). در تحقیق حاضر نیز هدف بررسی اثر گونه‌های قارچ میکوریزا آربسکولار بر بهبود عملکرد، اجزای عملکرد و شاخص کلروفیل گندم با اعمال تنش کم‌آبی از طریق افزایش فاصله دورهای آبیاری است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه آزاد اسلامی میاندوآب به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار در سال ۱۴۰۰ اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی در این تحقیق شامل دور آبیاری در سه سطح شامل ۶، ۱۳ و ۲۰ روز و کاربرد گونه‌های قارچ میکوریزا آربسکولار در سه سطح شامل شاهد (بدون تلقیح)، تلقیح با گونه *Glomus mosseae* و تلقیح با گونه *Glomus intraradices* بودند. اعمال تیمارهای آبیاری در فروردین ماه با آغاز طویل شدن ساقه انجام شد. قارچ‌های میکوریزا مورد استفاده در این پژوهش از بخش تحقیقات بیولوژی خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب کرج، تهیه شد. قبل از کشت، بذور گندم رقم الوند (با منشاء ایرانی، نیمه زمستانه و مناسب برای کشت در مناطق سرد) که از مرکز تحقیقات کشاورزی تبریز تهیه شده بودند با قارچ میکوریزا تلقیح شدند. همچنین مایه تلقیح باکتری دارای جمعیت تقریبی 10^7 (colony forming unite, cfu/ml) بود. پس از آغشته کردن بذور با قارچ میکوریزا، بذور به مدت چند دقیقه در داخل ظرف مورد نظر چرخانده شدند تا مایه تلقیح به کمک صمغ عربی به خوبی سطح بذر را پوشش دهد. سپس بذور تیمار شده به مدت ده دقیقه روی یک سطح تمیز در سایه قرار داده شدند تا خشک شوند. سپس بلافاصله بذور تلقیح شده در شیارهای ایجاد شده در بستر کاشت به عمق ۳ سانتی‌متر قرار داده شده و با خاک پوشانده شدند. کشت به‌صورت دستی در تاریخ ۱۵ آبان صورت پذیرفت. هر کرت آزمایش شامل ۸ خط کاشت به طول ۵ متر و فاصله خطوط کاشت ۲۰ سانتی‌متر و فاصله بین کرت‌ها ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. فاصله بین تکرارهای آزمایش یک متر بود. تراکم به مقدار ۵۰۰ بوته در مترمربع بود. آبیاری از نوع غرقابی بود و تا پر شدن کرت‌ها از آب ادامه داشت. مقدار آب مصرفی با استفاده

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری.

pH	هدایت الکتریکی EC ($ds\ m^{-1}$)	کربن آلی C (%)	فسفر قابل جذبP ($mg\ kg^{-1}$)	پتاسیم قابل جذبK ($mg\ kg^{-1}$)	نیتروژن کل (%)	شن(%)	رس(%)	سیلت(%)	بافت خاک
۷/۱۴	۱/۲۹	۰/۴۶	۵/۸۲	۱۷۱/۶۳	۰/۱۵	۲۳/۴	۳۶/۱	۴۰/۵	لوم رسی

جدول ۲. شرایط آب و هوایی در طی آزمایش.

ماه‌های سال	حداقل دما(°C)	حداکثر دما(°C)	حداقل رطوبت(%)	حداکثر رطوبت(%)	میزان بارندگی(mm)
مهر	۱۱/۲	۲۳/۷	۲۷	۷۱	۳۰/۳
آبان	۴	۱۲/۹	۵۰	۸۵	۳۵/۲
آذر	-۲/۳	۹/۸	۳۵	۷۸	۱/۷
دی	-۷/۶	۴/۲	۴۸	۸۲	۶/۴
بهمن	-۵/۱	۸/۵	۴۴	۸۵	۱۴/۲
اسفند	۰/۸	۱۰/۹	۳۵	۸۰	۴۸/۶
فروردین	۳/۴	۱۴	۳۱	۷۸	۲۷/۵
اردیبهشت	۹/۲	۲۱/۲	۲۴	۷۱	۷/۷
خرداد	۱۷/۴	۲۳/۶	۲۱	۶۲	۲۳/۴

از کنتور به‌دست آمد که برای هر کرت آزمایشی برابر ۱/۵ مترمکعب بود. قبل از عملیات کاشت برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه گیری از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک مزرعه انجام گرفت که نتایج آزمون خاک در جدول ۱ ارائه شده است. ویژگی‌های آب و هوایی منطقه مورد آزمایش در جدول ۲ آورده شده است.

همچنین قبل از کاشت معادل ۱۵ تن در هکتار کود دامی پوسیده و ۲۵ کیلوگرم کود نیتروژن به فرم اوره به‌صورت یکنواخت در زمین پخش شد. در طول فصل رشد ۵۰ کیلوگرم کود نیتروژن به فرم اوره طی دو مرحله ساقه رفتن و سنبله‌دهی مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به رویش محدود علف‌های هرز در مزرعه، کنترل آن‌ها طی فصل رشد به‌صورت دستی صورت گرفت.

برای سنجش اجزای عملکرد دانه گندم از ۱۰ بوته و برای تعیین عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک یک مترمربع از هر کرت برداشت شد. بدین صورت که بعد از حذف دو ردیف از هر طرف و نیم متر از ابتدا و انتهای تمام ردیف‌ها به‌عنوان حاشیه، نمونه برداری از واحدهای آزمایشی به عمل آمد (۱۰). صفات مورد ارزیابی نیز شامل تعداد سنبله در بوته، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و شاخص برداشت بودند. شاخص سبزینگی برگ پرچم در مرحله گلدهی و با استفاده از دستگاه SPAD-۵۰۲ اندازه‌گیری شد. نحوه اندازه‌گیری به این صورت بود که ده بوته از هر کرت به‌صورت تصادفی انتخاب و شاخص کلروفیل در سه نقطه (نوک، وسط و قاعده

جدول ۳. جدول تجزیه واریانس عملکرد و اجزای عملکرد در گندم.

تغییرات منابع	درجه آزادی	تعداد سنبله در بوته	تعداد دانه در سنبله	وزن هزار دانه	عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیک	شاخص برداشت
تکرار	۳	۲/۹۳^{ns}	۸/۲۱^{ns}	۲۴/۳^{ns}	۲۶۰^{ns}	۱۴۳^{ns}	۶/۲۷^{ns}
دور آبیاری	۲	۱۰/۶*	۷۹/۴*	۸۱/۷*	۵۰۹*	۱۸۰۱**	۸۲/۳**
میکوریزا	۲	۱۵/۳*	۸۵/۱*	۱۵۱**	۶۸۷*	۱۵۷۳**	۳۹/۶*
دور آبیاری × قارچ میکوریزا	۴	۳۱/۹**	۲۴/۹^{ns}	۷/۶۳^{ns}	۱۳۰۱**	۹۷/۲^{ns}	۱۲/۲^{ns}
خطا	۲۴	۲/۸۳	۱۸/۵	۱۵/۸	۱۳۹	۱۶۵	۷/۴۹
ضریب تغییرات (%)		۴/۵۲	۷/۶۶	۶/۰۵	۹/۳۷	۱۱/۵	۵/۲۶

ns ، * و ** به ترتیب به مفهوم غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد است.

برگ) برگ پرچم تعیین و میانگین آن‌ها برای هر کرت ثبت شد (۳۵).

غلظت کلروفیل در مرحله گلدهی از طریق روابط زیر به دست آمد که در این روابط V حجم نمونه استخراج شده و W وزن تر نمونه است (۱۹).

(جذب نور در ۶۶۳ Chlorophyll a (mg g^{-1} FW) = [۱۲/ ۷ × W ×V/۱۰۰۰ × [(جذب نور در ۶۴۵ نانومتر) ۲/۶۹ – نانومتر)

(جذب نور در ۶۴۵ نانومتر) Chlorophyll b (mg g^{-1} FW) = [۲۲/۹ × W ×V/۱۰۰۰ × [(جذب نور در ۶۶۳ نانومتر) ۴/۶۹ –

میزان پرولین برگ در مرحله گلدهی به روش بیتس و همکاران (۴) اندازه‌گیری شد. بدین منظور ۰/۱ گرم از نمونه‌های تر برگ در ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوسالسیلیک ۳ درصد به‌وسیله هاون هموژن شده و عصاره حاصل با سرعت در سانتریفیوژ ۵۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شدند تا مواد اضافی از محلول جدا شوند. به ۲ میلی‌لیتر از عصاره صاف شده فوق ۲ میلی‌لیتر اسیداستیک و ۲ میلی‌لیتر نین‌هیدرین (شامل ۱/۲۵ گرم نین‌هیدرین، ۳۰ میلی‌لیتر اسیداستیک و ۲۰ میلی‌لیتر اسید فسفریک ۶ مولار) اضافه شد. محلول حاصل به مدت یک ساعت در حمام بن‌ماری و در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد، پس از آن برای پایان یافتن واکنش لوله‌های آزمایش در داخل بستر یخی قرار گرفتند و ۷ میلی‌لیتر تولوئن به هر لوله اضافه شد. غلظت پرولین نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (Model: V-530, Japan, JASCO) قرائت شد. شاخص برداشت از طریق رابطه زیر تعیین شد (۲۰):

شاخص برداشت = (عملکرد بیولوژیک / عملکرد دانه) × ۱۰۰

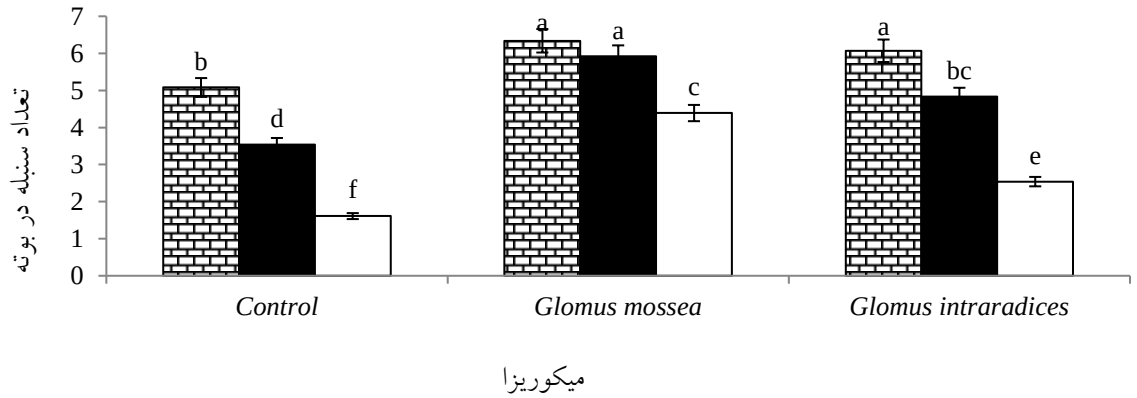
جهت تجزیه و تحلیل تیمارها از نرم افزار MSTATC و SPSS نسخه ۱۶، برای رسم نمودارها از نرم افزار EXCEL و جهت مقایسه میانگین ها از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

تعداد سنبله در بوته

اثر تیمارهای دور آبیاری و قارچ میکوریزا بر صفت تعداد سنبله در بوته در سطح احتمال پنج درصد و اثر متقابل آنها در سطح احتمال یک درصد بر این صفت معنی‌دار شد (جدول ۳).

مقایسه میانگین اثرات متقابل دور آبیاری در قارچ میکوریزا



شکل ۱. اثر متقابل گونه‌های قارچ میکوریزا و دور آبیاری بر تعداد سنبله در گندم. میانگین‌های دارای حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

نشان داد که بیشترین تعداد سنبله در بوته با مقدار ۶/۳۴ عدد در ترکیب تیماری دور آبیاری ۶ روز و گونه *G. mosseae* به‌دست آمد و کمترین میزان این صفت که برابر ۲/۵۴ و ۱/۶۱ عدد بود به‌ترتیب، به ترکیب تیماری دور آبیاری ۲۰ روز و گونه *G. intraradices* و ترکیب تیماری دور آبیاری ۲۰ روز و شاهد (عدم کاربرد قارچ) اختصاص داشت (شکل ۱). با افزایش فواصل آبیاری تعداد سنبله در گندم درتلقیح با هر دو گونه قارچ میکوریزا کاهش یافت. با افزایش دور آبیاری از ۶ به ۱۳ و ۲۰ روز تعداد سنبله گندم در تلقیح با گونه *G. mosseae* به‌ترتیب ۶/۶۳ و ۳۰/۷ درصد، در تلقیح با گونه *G. intraradices* به‌ترتیب ۲۰/۴ و ۵۸/۲ درصد و در شاهد (عدم تلقیح) به‌ترتیب ۳۰/۳ و ۶۸/۳ درصد کاهش یافت (شکل ۱).

کاتکار و همکاران (۱۶) معتقدند که وجود میکوریزا آربوسکولار در خاک باعث تولید تعداد پنجه بیشتر و بقاء آن‌ها می‌شود. افزایش تعداد سنبله در بوته بر اثر مصرف *G. mosseae* توسط محققانی نظیر نورینیا و همکاران (۲۶) و کانوال و همکاران (۱۳) به‌ترتیب در گیاهان جو و گندم گزارش شده است. تنش کمبود آب در مرحله رشد رویشی بر تعداد سنبله و همچنین تعداد پنجه‌های بارور گندم اثر منفی دارد و قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار با افزایش جذب آب در شرایط تنش بازده مصرف آب را به‌میزان قابل‌توجهی افزایش داده و از شدت تنش می‌کاهند (۱۴). نگواکو و ماشیگوا (۲۵) طی تحقیق روی گندم نشان دادند که در تنش کم‌آبی کلیه اجزای عملکرد کاهش می‌یابد و میزان کاهش تعداد سنبله در مترمربع ۶۰ درصد گزارش شد. بیلال و همکاران (۶) اظهار داشتند که تعداد سنبله متأثر از عوامل ژنتیکی و محیطی (تنش کم‌آبی) است و در عملکرد غلات مهم تلقی می‌شود. بدین صورت که کمبود آب از طریق تأثیر بر تعداد پنجه‌های بارور سهم آن را کاهش می‌دهد. تنش شدید کم آبی موجب عقیمی پنجه‌ها شده و تنش‌های ملایم، رشد و عملکرد آن‌ها را کاهش می‌دهد (۱۵).

تعداد دانه در سنبله

از نظر تعداد دانه در سنبله بین دورهای آبیاری اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد مشاهده شد (جدول ۳). به‌طوری که دور آبیاری ۶ روز بیشترین تعداد دانه را با ۴۵/۷ عدد داشت و کمترین مقدار این صفت به دور آبیاری ۲۰ روز با ۲۹/۲ عدد مشاهده شد. دور آبیاری ۲۰ روز تعداد دانه در سنبله را در مقایسه با تیمار دور آبیاری ۶ روز ۳۶/۱ درصد کاهش داد (جدول ۵).

جدول ۴. جدول تجزیه واریانس شاخص کلروفیل، کلروفیل a، کلروفیل b و پرولین در گندم.

منابع تغییرات	درجه آزادی	شاخص سبزینگی	کلروفیل a	کلروفیل b	پرولین
تکرار	۳	۵۹/۲^{ns}	۰/۵۳^{ns}	۰/۱۱^{ns}	۲/۲۳^{ns}
دور آبیاری	۲	۲۴۵**	۲/۳۸**	۰/۲۸*	۷/۳۹*
میکوریزا	۲	۲۰۳**	۰/۹۵*	۰/۳۱*	۶/۸۴*
دور آبیاری× قارچ میکوریزا	۴	۱۰۶*	۱/۷۱**	۰/۰۹^{ns}	۹/۵۱ **
خطا	۲۴	۳۰/۹	۰/۲۵	۰/۰۶	۱/۸۳
ضریب تغییرات (%)		۷/۴۱	۴/۰۳	۲/۷۸	۵/۲۹

ns ، * و ** به ترتیب به مفهوم غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد است.

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر دور آبیاری بر تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت.

دور آبیاری (روز)	تعداد دانه در سنبله	وزن هزار دانه (g)	عملکرد بیولوژیک (g m^{-2})	شاخص برداشت (%)	کلروفیل b (mg g^{-1} FW)
۶	^{a}۴۵/۷	^{a}۴۷/۸	^{a}۱۱۰۵	^{a}۴۴/۶	^{a}۰/۱۹
۱۳	^{a}۴۱/۲	^{b}۴۰/۹	^{a}۱۰۲۵	^{b}۳۸/۹	^{b}۰/۱۵
۲۰	^{b}۲۹/۲	^{c}۳۲/۶	^{b}۷۱۷	^{c}۳۱/۲	^{c}۰/۰۷

میانگین های دارای حروف مشابه در هر ستون فاقد اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

نتایج بیانگر این است که گیاه گندم در دور آبیاری ۲۰ روز با شرایط کم‌آبی مواجه می‌شود که در واقع باعث کاهش تعداد گلچه‌هایی که موفق می‌شوند خود را به مرحله باروری برسانند، شده که در نهایت منجر به کاهش تعداد دانه در سنبله می‌شود. این نتایج با یافته‌های وانگ و همکاران (۳۹) هماهنگ است. در طی تنش کم‌آبی، پتانسیل آب در آوند آبکش کاهش و کاهش در پتانسیل آماس از انتقال مواد فتوسنتزی و در نهایت از مقدار مواد پرورده ذخیره‌ای می‌کاهد که این امر، آسیب پذیری تشکیل دانه را در شرایط کم‌آبی افزایش می‌دهد (۲). اثر قارچ میکوریزا نیز بر تعداد دانه در سنبله در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد ولی اثر متقابل آبیاری و قارچ میکوریزا بر این ویژگی معنی‌دار نشد (جدول ۳). بیشترین تعداد دانه در سنبله در گیاهان تیمار شده با *G. mosseae* با ۴۲/۷۴ عدد مشاهده شد که با تیمار *G. intraradices* اختلاف معنی‌دار نداشت. کمترین تعداد دلنه در سنبله در تیمار شاهد (بدون تلقیح) با ۳۲/۹ عددبه‌دست آمد. تلقیح با *G. mosseae* تعداد دانه در سنبله را به میزان ۲۹/۹ درصد نسبت به تیمارشاهد افزایش داد (جدول ۶). در گیاه ذرت کاربرد قارچ میکوریزا نسبت به عدم کاربرد آن تحت شرایط تنش کم‌آبی، تعداد دانه در بلال را افزایش داده است (۴۱).

وزن هزار دانه

از نظر وزن هزار دانه بین رژیم‌های آبیاری و گونه‌های قارچ میکوریزا اختلاف معنی‌داری وجود داشت، ولی اثر متقابل دور آبیاری در قارچ میکوریزا بر این صفت معنی‌دار نشد (جدول ۳). مقایسه میانگین دور آبیاری نشان داد، بیشترین مقدار وزن هزار دلنه به دور آبیاری ۶ روز با ۴۷/۸ گرم و کمترین وزن هزار دلنه به دور آبیاری ۲۰ روز با ۳۲/۶ گرم تعلق داشت و دور آبیاری ۲۰ روز نسبت به دور آبیاری ۶ روز، وزن هزار دانه را ۳۱/۷ درصد

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر گونه‌های قارچ میکوریزا بر تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت.

میکوریزا	تعداد دانه در سنبله	وزن هزار دانه (g)	عملکرد بیولوژیک ($g\ m^{-2}$)	شاخص برداشت (%)	کلروفیل b ($mg\ g^{-1}\ FW$)
Control	۳۲/۸ b	۳۴/۷ c	۷۷۴ b	۳۳/۱ b	۰/۱۲ b
G. mosseae	۴۲/۷ a	۴۵/۳ a	۱۰۸۱ a	۴۲/۲ a	۰/۱۵ a
G. intraradices	۴۰/۶ a	۴۱/۳ b	۹۹۳ a	۳۹/۵ a	۰/۱۴ a

میانگین های دارای حروف مشابه در هر ستون فاقد اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

کاهش داد (جدول ۵). نتایج نشان می‌دهد در رژیم آبیاری با فاصله ۲۰ روز، آب کافی برای پر شدن دانه‌ها وجود نداشته است،بنابراین مقصدهای فیزیولوژی به خوبی پر نشده و درنتیجه وزن دانه‌ها به شدت کاهش پیدا می‌کند. این نتایج با یافته‌های الکاراکی و همکاران (۳) در مورد گندم مطابقت داشت.

مقایسه میانگین اثر قارچ‌های میکوریزا حاکی از این است که گونه *G. mosseae* با ۴۵/۳۱ گرم و عدم تلقیح (شاهد) با ۳۴/۷۸ گرم به ترتیب بیشترین و کمترین وزن هزار دانه را به خود اختصاص دادند. گونه های *G. mosseae* و *G. intraradices* در مقایسه با شاهد (عدم تلقیح) وزن هزار دانه را به ترتیب ۳۰/۳ و ۱۸/۷درصد افزایش دادند (جدول ۶). افزایش عملکرد اندام هوایی با افزایش شاخ و برگ، افزایش عملکرد اندام زیرزمینی و افزایش جذب مواد همراه است، بنابراین تولید مواد فتوسنتزی افزایش یافته و انتقال این مواد به سمت مخازن (بذرها) افزایش می‌یابد که موجب افزایش وزن هزار دانه در شرایط کاربرد قارچ میکوریزا می‌شود (۱).

عملکرد دانه

عملکرد دانه در سطح احتمال پنج درصد تحت تاثیر تیمارهای دور آبیاری و قارچ میکوریزا قرار گرفت و اثر متقابل دور آبیاری در قارچ میکوریزا در سطح احتمال یک درصد بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین عملکرد دلنه به دور آبیاری ۶ روز به‌همراه تلقیح *G. mosseae* با ۶۱۲ گرم در مترمربع و کمترین عملکرد دانه به ترکیب تیماری دور آبیاری ۲۰ روز و عدم تلقیح با ۲۷۵ گرم در مترمربع تعلق داشت. قابل ذکر است که بین ترکیب تیماری دور آبیاری ۶ روز به‌ترتیب با گونه های *G. mosseae* و *G. intraradices* و ترکیب تیماری دور آبیاری ۱۳ روز و تلقیح با *G. mosseae* از لحاظ آماری تفاوتی معنی داری مشاهده نشد (شکل ۲). ترکیب تیماری دور آبیاری۲۰ روز و عدم تلقیح (شاهد)، عملکرد دانه گندم را ۵۴/۹ درصد نسبت به ترکیب تیماری دور آبیاری ۶ روز به‌همراه *G. mosseae* کاهش داد. قارچ *G. mosseae* نسبت به *G. intraradices* عملکرد دانه گندم را در هر سه دور آبیاری افزایش داد ولی فقط در تیمار دور آبیاری ۶ روز بین دو گونه از نظر آماری اختلاف معنی داری دیده نشد (شکل ۲). نتایج مطالعات دیگر نیز حاکی از این است که دور آبیاری بر عملکرد دانه گندم تأثیر معنی‌دار دارد و با کاهش فواصل آبیاری عملکرد دانه افزایش می‌یابد (۶ و ۲۵). همچنین اثر میکوریزا در شرایط رطوبتی مختلف بر رشد ذرت بررسی و نتایج نشان داد که در گیاهان تیمار شده با قارچ عملکرد دانه ذرت افزایش معنی‌داری یافت (۹).

عملکرد بیولوژیک

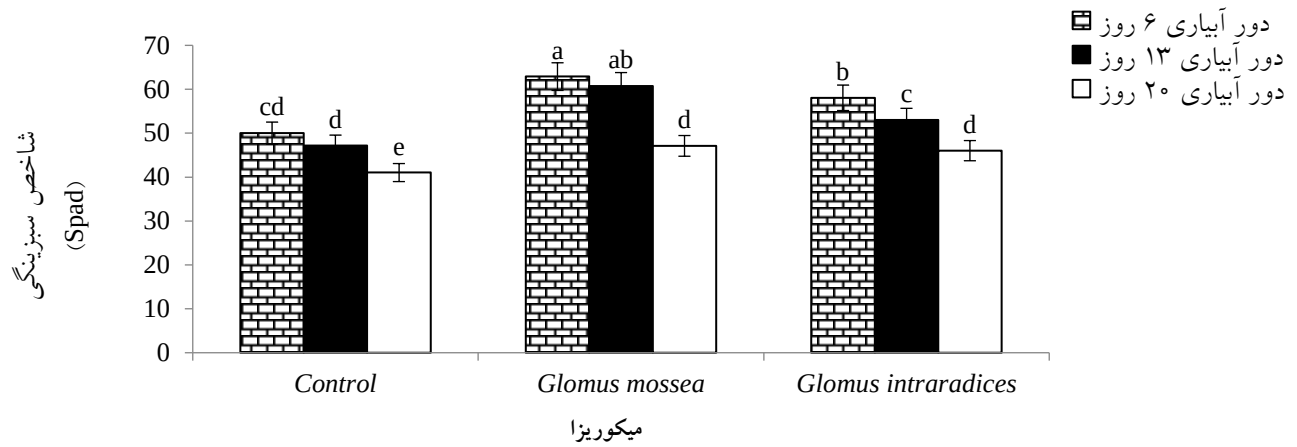
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر دور آبیاری و قارچ میکوریزا در سطح احتمال یک درصد بر عملکرد بیولوژیک معنی‌دار ولی اثر

شکل ۲. اثر متقابل گونه‌های قارچ میکوریزا و دور آبیاری بر عملکرد دانه گندم. میانگین‌های دارای حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

متقابل دور آبیاری در قارچ میکوریزا بر این صفت معنی‌داری نشد (جدول ۳). طبق نتایج با افزیش فواصل آبیاری، عملکرد بیولوژیک کاهش یافت. بیشترین و کمترین میزان عملکرد بیولوژیک به‌ترتیب به دورهای آبیاری ۶ و ۲۰ روز با مقادیر ۱۱۰۵ و ۷۱۷ گرم در مترمربع تعلق داشت ولی بین دورها ی آبیاری ۶ و ۱۳ روزاختلاف آماری معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۵). دور آبیاری ۱۳ و ۲۰ روز نسبت به دور آبیاری ۶ روز عملکرد بیولوژیک را به ترتیب ۷/۲۱ و ۳۵/۱ درصد کاهش دادند. حسین و اختر (۱۱) ضمن تحقیق خود روی عملکرد جو تحت تراکم‌های مختلف و مقادیر متفاوت آب قابل‌دسترس به این نتیجه رسیدند که با کاهش میزان آب قابل‌دسترس، کل ماده خشک تولیدی کاهش یافت. مقایسه میانگین اثر قارچ میکوریزا بر عملکرد بیولوژیک گندم نشان داد که *G. mosseae* و عدم تلقیح (شاهد) به‌ترتیب بیشترین و کمترین عملکرد بیولوژیک را به خود اختصاص دادند. *G. mosseae* در مقایسه با تیمار شاهد عملکرد بیولوژیک را به میزان ۳۹/۷ درصد افزایش داد (جدول ۶). با این وجود، بین گونه‌های قارچ میکوریزا از نظر عملکرد بیولوژیک تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. قربانیان و همکاران (۹) و عبدالمونعیم و همکاران (۱) گزارش کردند که قارچ میکوریزا با افزایش جذب عناصر غذایی، رشد و نمو و فعالیت های بیوشیمیایی گیاه را افزایش می‌دهد و این امر موجب افزایش عملکرد بیولوژیک می‌شود.

شاخص برداشت

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که اثرات ساده دور آبیاری و قارچ میکوریزا به‌ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد بر صفت شاخص برداشت معنی‌دار بود ولی اثر متقابل دور آبیاری در قارچ میکوریزا بر شاخص برداشت معنی‌دار نشد (جدول۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین مقدار شاخص برداشت به دور آبیاری ۶ روز با ۴۴/۶ درصد و کمترین میزان این شاخص به دور آبیاری ۲۰روز با ۳۱/۲ درصد اختصاص داشت. دور آبیاری ۲۰ روز شاخص برداشت را ۳۰/۱ درصد نسبت به دور آبیاری ۶ روز کاهش داد (جدول ۵). گونزالس و همکاران (۱۰) اثر تیمار آبیاری بر شاخص برداشت جو را آزمایش کردند و به این نتیجه دست یافتند که با اعمال تیمار تنش شدید کم‌آبی شاخص برداشت کاهش معنی‌داری یافت. آن‌ها دلیل کاهش شاخص

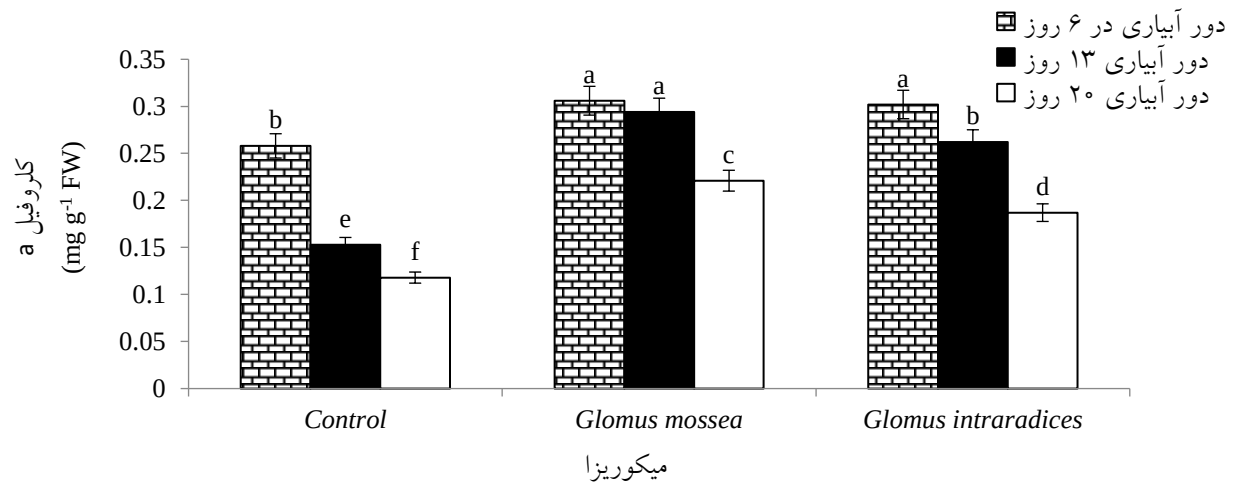


شکل ۳. اثر متقابل گونه‌های قارچ میکوریزا و دور آبیاری بر شاخص سبزینگی گندم. میانگین‌های دارای حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

برداشت در اثر تنش کم‌آبی را به افت عملکرد دانه نسبت دادند و دلیل کاهش عملکرد دانه را کاهش سطح برگ و تعداد سنبله بارور دانستند. مقایسه میانگین اثر قارچ میکوریزا نشان داد که *G. mosseae* با ۴۲/۲ درصد بیشترین شاخص برداشت و تیمار بدون تلقیح (شاهد) با ۳۳/۱ درصد کمترین شاخص برداشت را داشتند. *G. mosseae* شاخص برداشت را در مقایسه با شاهد (بدون تلقیح) ۲۷/۹ درصد افزایش داد. همچنین، *G. intraradices* شاخص برداشت را به میزان ۱۹/۶ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (جدول ۶). ایلوان (۸) نیز در پژوهش خود نشان داد که تلقیح با قارچ میکوریزا شاخص برداشت ذرت را به‌طور معنی‌دار افزایش داد. به نظر ایشان گونه های قارچ میکوریزا با افزایش عملکرد دانه باعث افزایش شاخص برداشت شدند.

شاخص سبزینگی

بر اساس تجزیه داده ها، دور آبیاری و قارچ میکوریزا، شاخص سبزینگی را در سطح احتمال یک درصد تحت تاثیر قرار دادند. همچنین، اثر متقابل دور آبیاری در قارچ میکوریزا در سطح احتمال پنج درصد بر این صفت معنی‌دار شد (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر متقابل دور آبیاری در قارچ میکوریزا حاکی از آن است که بیشترین شاخص سبزینگی به ترکیب تیماری دورآبیاری ۶ روز و گونه *G. mosseae* با مقدار ۶۲/۹ واحد اسپد و کمترین شاخص کلروفیل به دور آبیاری ۲۰ روز و عدم تلقیح با ۴۱/۱ واحد اسپد تعلق داشت (شکل ۳). ترکیب تیماری هر یک از تیمارهای دور آبیاری ۶ و ۱۳ روز با گونه *G. mosseae* از لحاظ آماری در یک سطح قرار داشتند و غلظت کلروفیل را به‌ترتیب ۵۳/۳ و ۴۸/۱ درصد نسبت به ترکیب تیماری دور آبیاری ۲۰ روز و عدم تلقیح (شاهد) افزایش دادند. با افزایش فواصل آبیاری شاخص سبزینگی در حالت کاربرد و عدم کاربرد قارچ میکوریزا کاهش یافت. تلقیح با گونه‌های قارچ میکوریزا، غلظت کلروفیل را نسبت به عدم تلقیح (شاهد) در هر سه دور آبیاری افزایش داد. در تیمار دور آبیاری ۲۰ روز بین دو گونه قارچ میکوریزا اختلاف معنی‌داری دیده نشد. ولی در دورهای آبیاری ۶ و ۱۳ روز اختلاف بین این دو گونه قارچ از نظر آماری معنی‌دار بود (شکل ۳). کاهش میزان کلروفیل در شرایط تنش کم‌آبی توسط اوراکی و همکاران (۲۷) در گیاه آفتابگردان گزارش شده است. تنش کم‌آبی از طریق فعالیت آنزیم‌های کلروفیلاز و پراکسیداز در گیاه باعث تخریب



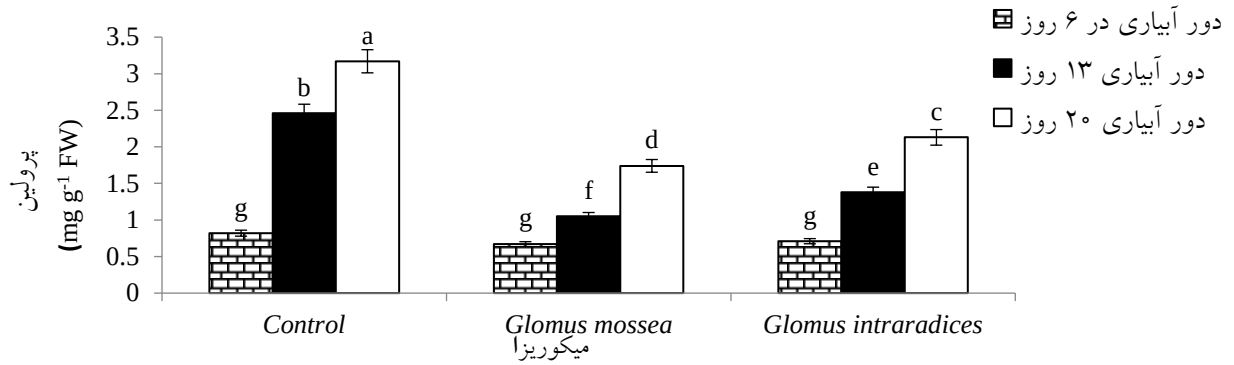
شکل ۴. اثر متقابل گونه‌های قارچ میکوریزا و دور آبیاری بر کلروفیل a گندم. میانگین‌های دارای حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

کلروپلاست و کاهش میزان کلروفیل می‌شود (۱) . در ذرت (۴۱) و در نخودفرنگی (۳۴) گزارش کردند که مایه‌زنی با *G. mosseae*، تحت تنش کم‌آبی، کلروفیل در گیاه را بهبود بخشید و فتوسنتز گیاه را افزایش داد. آنها علت این امر را به افزایش جذب عناصر غذایی از جمله نیتروژن توسط گیاهان میکوریزایی نسبت دادند.

محتوای کلروفیل

طبق نتایج تجزیه واریانس اثر دور آبیاری، قارچ میکوریزا و اثر متقابل دور آبیاری در قارچ میکریزا بر مقدار کلروفیل a معنی‌دار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد گونه‌های قارچ میکوریزا باعث افزایش معنی‌دار مقدار کلروفیل a تحت تنش کم‌آبی شد. به‌طوری که با کاربرد قارچ میکوریزا در دورهای آبیاری ۱۳ و ۲۰ روز نسبت به عدم کاربرد قارچ میکوریزا در همان شرایط، محتوای کلروفیل a به‌ترتیب ۹۲/۱ و ۸۷/۳ درصد در تلقیح با قارچ *G. mosseae* و به‌تریب ۷۱/۲ و ۵۸/۴۵ درصد در تلقیح با قارچ *G. intraradices* افزایش یافت (شکل ۴). محتوای کلروفیل a در ترکیب تیماری دور آبیاری ۱۳ روز و تلقیح با قارچ میکوریزا *G. mosseae* اختلاف معنی‌داری با تیمار دور آبیاری ۶ روز و تلقیح با هر کدام از قارچ‌های میکوریزا نداشت (شکل ۴). اثرات ساده دور آبیاری و قارچ میکوریزا بر کلروفیل b معنی‌دار بود ولی اثر متقابل دور آبیاری در قارچ میکوریزا غیر معنی‌دار به‌دست آمد (جدول ۳). با افزایش فاصله آبیاری میزان کلروفیل b به‌طور معنی‌دار در برگ کاهش یافت و حداکثر مقدار کلروفیل b به‌مقدار ۰/۱۹ mg g^{-1} FW در تیمار دور آبیاری ۶ روز حاصل شد. کمترین میزان کلروفیل b نیز در گیاهان رشد یافته درتیمار دور آبیاری ۲۰ روز به‌مقدار ۰/۰۷ mg g^{-1} FW به‌دست آمد. (جدول ۴). در تیمار تلقیح با گونه‌های قارچ میکوریزا بیشترین و کمترین میزان کلروفیل b به‌ترتیب در تیمار کاربرد قارچ *G. mosseae* به‌مقدار ۰/۱۵ mg g^{-1} FW و تیمار بدون تلقیح با قارچ میکوریزا به‌مقدار ۰/۱۲ mg g^{-1} FW به‌دست آمد (جدول ۵).

صالحی استاد و همکاران (۳۲) اظهار داشتند که تنش آبی اثر معنی‌داری بر مقدار کلروفیل ریحان داشت به‌طوری‌که با کاهش مقدار آب خاک، مقدار کلروفیل a و b کاهش یافت. زهو و همکاران (۴۱) گزارش کردند که محتوای کلروفیل در ذرت آمیخته شده با قارچ میکوریزا تحت شرایط آبیاری کامل



شکل ۵. اثر متقابل گونه‌های قارچ میکوریزا و دور آبیاری بر پرولین گندم. میانگین‌های دارای حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

تفاوت معنی‌داری با محتوای کلروفیل در ذرت‌های بدون تلقیح با قارچ داشت و در شرایط بدون تنش کمبود آب مقدار کلروفیل در گیاهان کلونیزه شده با قارچ میکوریزا ۲۳ درصد بیشتر از گیاهان بدون تلقیح با قارچ بود.

پرولین

بر اساس تجزیه واریانس مشخص شد اثرات دور آبیاری و قارچ میکوریزا در سطح احتمال ۵ درصد و اثر متقابل دور آبیاری در قارچ میکوریزا در سطح احتمال یک درصد بر پرولین برگ معنی‌دار بود (جدول ۴). میکوریزا در دورهای آبیاری ۱۳ و ۲۰ روز مقدار انباشت پرولین را به مقدار زیادی در مقایسه با گیاهان تلقیح نشده کاهش داد. نتایج نشان داد بیشترین میزان پرولین در ترکیب تیماری دور آبیاری ۲۰ روز و بدون تلقیح با قارچ میکوریزا به میزان ۳/۱۷ mg g^{-1} FW حاصل شد. کاربرد گونه‌های قارچ میکوریزا در مقایسه با عدم کاربرد آن‌ها در فواصل آبیاری ۱۳ و ۲۰ روز به‌ترتیب ۵۷/۳ و ۴۵/۱ درصد در گونه *G. mosseae* و ۴۳/۹ و ۳۲/۸ درصد در گونه *G. intraradices* مقدار پرولین را کاهش دادند (شکل ۵).

پورسل و رویزلوزانو (۳۰) تجمع پرولین کمتر را در گیاه سویای آمیخته شده با قارچ میکوریزا در مقایسه با گیاهان بدون تلقیح با قارچ میکوریزا تحت شرایط تنش کم‌آبس گزارش کردند. وو و همکاران (۴۰) گزارش کردند که برگ‌ها در گیاه نارنج تلقیح شده با قارچ میکوریزا پرولین کمتری نسبت به برگ‌های گیاهان تلقیح نشده با قارچ میکوریزا تحت شرایط تنش خشکی داشتند که به‌دلیل مقاومت بیشتر نهال‌های تلقیح شده با قارچ میکوریزا به خشکی یا آسیب کمتر آنها تحت تنش خشکی است. گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریزا آربسکولار با استفاده از روابط آبی و تغذیه بهتر نسبت به گیاهان بدون کلونیزه شده، تحت تنش خشکی کمتر دچار خسارت شده و در نتیجه میزان پرولین و قندهای محلول نسبت به گیاهان بدون کلونیزه شده با قارچ میکوریزا افزایش کمتری دارد (۴).

نتیجه‌گیری کلی

به‌نظر می‌رسد که دور آبیاری ۱۳ و ۲۰ روز به‌دلیل ایجاد شرایط تنش کم‌آبی سبب کاهش شاخص سبزینگی، رنگیزه‌های فتوسنتزی، عملکرد و اجزای عملکرد و در مقابل باعث افزایش میزان پرولین گندم شدند، البته اثر دور آبیاری ۲۰ روز در افت صفات مورد ارزیابی و افزایش محتوای پرولین به مراتب شدیدتر از دور آبیاری ۱۳ روز بود. قارچ میکوریزا با بهبود جذب آب و عناصر غذایی تحت تنش کم‌آبی سبب افزایش مقاومت گیاه به

تنش رطوبتی شد. قارچ *G. mosseae* در مقایسه با *G. intraradices* از نظر افزایش مقاومت گندم به تنش کم آبی کارآمدتر بوده و درنتیجه عملکرد، اجزای عملکرد و شاخص کلروفیل و میزان کلروفیل گندم را به میزان بیشتری افزایش داد. به‌طور کلی، بین تیمار دور آبیاری ۱۳ روز و تلقیح با *G. mosseae* و دور آبیاری ۶ روز و تلقیح با هر دو گونه *G. mosseae* و *G. intraradices* از نظر عملکرد دانه تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. بنابراین، به‌منظور استفاده بهینه از منابع آب وعناصر غذایی خاک، می توان با دور آبیاری ۱۳ روز و تلقیح با قارچ *G. mosseae* نیاز آبی گیاه را فراهم و به محصول قابل قبولی دست یافت.

منابع مورد استفاده

1. Abdelmoneim, T. S., A. A. Tarek, O. A. Almaghrabi, S. Hassan and I. Abdelbagi. 2014. Increasing plant tolerance to drought stress by inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi. *Life Science Journal* 11: 10-17.
2. Alijatoi, W., M. J. Baloch, M. Buxkumbhar, N. Ullahkhan and M. I. Kerio. 2011. Effect of water stress on physiological and yield parameters at anthesis stage in eltte spring wheat cultivars. *Sarhad Journal of Agriculture* 27: 59-65.
3. Al-Karaki, G., N. B. Michael and J. Zak. 2004. Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. *Mycorrhiza* 14: 263-269.
4. Bates, L. S., R. P. Waldren and I. D. Teare. 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil* 39: 205-208.
5. Behrooz, A., K. Vahdati, F. Rejali, M. Lotfi, S. Sarikhani and C. Leslie. 2019. Arbuscular mycorrhiza and plant growth-promoting bacteria alleviate drought stress in walnut. *Hortcultural Science* 54 :1087-1092.
6. Bilal, M., I. Iqbal, R. M. Rana, S. U. Rehman, Q. Haidery, F. Ahmad, A. Ijaz and H. M. Imran. 2015. A comprehensive review of effects of water stress and tolerance in wheat (*Triticuma estivum* L.). *Tropical Plant Journal* 2: 271-275.
7. Castillo, C. G., F. Puccio, D. Morales, F. Borie and E. Sieverd. 2012. Early arbuscular mycorrhiza colonization of wheat, barley and oats in Andosols of southern Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 12: 511-524.
8. Elwan, L. M. 2001. Effect of soil water regimes and inoculation with mycorrhizae on growth and nutrients content of maize plants. *Journal of Agriculture Reseach* 28: 163-172.
9. Ghorbanian, D., S. Harutyunyan, D. Mazaheri and F. Rejali, F. 2011. Effects of mycorrhizal symbiosis and different levels of phosphorus on yield, macro and micro elements of *Zea mays* L. under water stress condition. *African Journal of Agricultural Research* 6: 5481-5489.
10. Gonzalez, A., V. Bermejo and B. S. Gimeno. 2010. Effect of different physiological traits on grain yield in barley grown under irrigated and terminal water deficit conditions. *Journal of Agricultural Science* 148: 319-328.
11. Hossain, B. and M. Akhtar. 2014. Growth and yield of barley (*Hordeum vulgare* L.) as affected by irrigation, sowing method and phosphorus level. *Academia Journal of Agricultural Research* 2: 30-35.
12. Ivanova, A. and N. Tsenov. 2011. Winter wheat productivity under favorable and drought environments. I. An overall effect. *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 17: 777-782.
13. Kanwal, S., A. Bano and R. N. Malik. 2015. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on wheat growth, physiology, nutrition and cadmium uptake under increasing cadmium stress. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research* 7: 30-42.
14. Karaki, J. A. 2009. Field response of wheat to arbuscular mycorrhiza fungi and drought stress. *Mycorrhiza* 14: 263-269.
15. Karam, F., R. Kabalan, J. Breidi, Y. Rouphae and T. Oweis. 2009. Yield and water-production functions of two durum wheat cultivars grown under different irrigation and nitrogen regimes. *Agricultural Water Management* 96: 603-615.
16. Katkar, R. N., B. A. Sonune and P. R. Kadu. 2011. Long term effect of fertilization on soil chemical and biological characteristics and productivity under sorghum-wheat system in vertisols. *Annals of plant and soil research* 2: 32-34.
17. Khalvati, M. A., A. Mozafar and V. Schmidhalter. 2005. Quantification of water uptake by arbuscular mycorrhizal hyphae and its significance for leaf growth water relations and gas exchange of barley subjected to drought stress. *Journal of Plant Biology Stuttgart* 7: 706-712.
18. Khanam, D., M. A. U. Mridha and A. R. M. Solaiman. 2006. Comparative study of arbuscular mycorrhizal association with different agricultural crops among four areas of Bangladesh. *Journal of Agricultur* 44: 147-159.
19. Khayatnezhad, M. and R. Gholamin. 2012. The effect of drought stress on leaf chlorophyll content and stress resistance in maize cultivars (*Zea mays*). *African Journal of Microbiology Research* 6: 2844-2848.

20. Kilic, H. and T. Yagbasanlar. 2010. The effect of drought stress on grain yield, yield components and some quality traits of durum wheat (*Triticum turgidum*) cultivars. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 38: 164-170.
21. Li, H., S. E. Smith, R. E. Holloway, Y. Zhu and F. A. Smith. 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi contribute to phosphorus uptake by wheat grown in a phosphorus-fixing soil even in the absence of positive growth responses. *New Phytologist* 172: 536-543.
22. Marulanda, A., R. Azcon Rviz and J. M. Lazano. 2003. Contribution of six mycorrhizal fungal isolates to water uptake by (*Lactuca Sativa*) under drought stress. *Physiologia Plantarum* 119: 1-8.
23. Medina, A. and R. Azcon. 2010. Effectiveness of the application of arbuscular mycorrhiza fungi and organic amendments to improve soil quality and plant performance under stress conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 10: 354-372.
24. Miransari, M. 2010. Contribution of arbuscular mycorrhizal symbiosis to plant growth under different types of soil stresses. *Journal of Plant Biology* 12: 563-569.
25. Ngwako, S. and P. K. Mashiqa. 2013. The effect of irrigation on the growth and yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* 5: 976-982.
26. Nurinia, A. A., E. Faghani, F. Rejali, A. Safarnejad and M. R. Abbasi. 2007. Evaluation effect of symbiosis of mycorrhiza on yield component and some physiological parameters of barley genotypes under salinity stress. *Asian Journal of Plant Sciences* 6: 1108- 1112.
27. Oraki, H., F. P. khajani and M. Aghaalikhana. 2012. Effect of water deficit stress on proline contents, soluble sugars, chlorophyll and grain yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids. *African Journal of Biotechnology* 11: 164-168.
28. Paunescu, G. and O. Boghic. 2008. Performance of several wheat cultivars under contrasting conditions of water stress in central part of oltenia. *Romanian Agricultural Research* 25: 13-18.
29. Pepo, P. and V. Kovacevic. 2011. Regional analysis of winter wheat yields under different ecological conditions in Hungary and Croatia. *Acta Agronomica Hungarica* 59: 23-33.
30. Porcel, R. and J. M. Ruiz-Lozano. 2004. Arbuscular mycorrhizal influence on leaf water potential, solute accumulation, and oxidative stress in soybean plants subjected to drought stress. *Journal of Experimental Botany* 55: 1743-1750.
31. Porcel, R., R. Azcon and J. M. Ruiz-Lozano. 2005. Evaluation of the role of genes encoding for dehydrin proteins (LEA D-11) during drought stress in arbuscular mycorrhizal *Glycine max* and *Lactuca sativa* plants. *Journal of Experimental Botany* 56: 1933-1942.
32. Salahiostad, M., B. Abedi and Y. Selahvarzi. 2022. The effect of *Trichoderma harzianum* on the biochemical properties and photosynthetic pigments of basil under drought stress. *Iranian Journal of Horticultural Science* 52: 999-1009. (In Farsi).
33. Shahryari, R., E. Gurbanov, A. Gadinov and D. Hassanpanah. 2008. Tolerance of 42 bread wheat genotypes to drought stress after anthesis. *Pakistan Journal Biological Sciences* 11: 1330-1335.
34. Shinde, B. P. and J. Thakur. 2015. Influence of Arbuscular mycorrhizal fungi on chlorophyll, proteins, proline and total carbohydrates content of the pea plant under water stress condition. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 4: 809-821.
35. Sorkhi, F. 2015. Effect of irrigation and nitrogen fertilizer levels on physiological characteristics of four varieties of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Crop Ecophysiology* 9: 401-416. (In Farsi).
36. Sorkhi, F. 2020. Effect of irrigation intervals and humic acid on physiological and biochemical characteristic on medicinal plant of *Thymus vulgaris*. *Iranian Journal of Plant Physiology* 10: 3367-3378. (In Farsi).
37. Sorkhi, F. 2021. Effect of vermicompost fertilizer on antioxidant enzymes and chlorophyll contents of *Borago officinalis* under salinity stress. *Iranian Journal of Plant Physiology* 11: 3589-3598. (In Farsi).
38. Sorkhi, F. and S. Khomari. 2021. Effect of different levels of water deficit on yield and amount of osmotic regulator in tetraploid and hexaploid wheat genotypes. *Agricultural Engineering International* 23: 12-16.
39. Wang, O., F. Li, E. Zhang, E. Li and M. Vance. 2012. The effects of irrigation and nitrogen application rates on yield of spring wheat (longfu-920), and water use efficiency and nitrate nitrogen accumulation in soil. *Australian Crop Science* 6: 662-672.
40. Wu, Q. S., R. X. Xia, Y. N. Zou and G. Y. Wang. 2007. Osmotic solute responses of mycorrhizal citrus (*Poncitrus trifoliate*) seedlings to drought stress. *Acta physiologica Plantarum* 29: 543-549.
41. Zhu, X. C., F. B. Song, S. Q. Liu, T. D. Liu and X. Zhou. 2012. Arbuscular mycorrhizae improves photosynthesis and water status of *Zea mays* L. under drought stress. *Plant Soil and Environment* 58: 186-191.

Journal of Crop Production and Processing
Vol. 14, No. 3, Fall 2024, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Effect of Mycorrhizal Fungi Species Inoculation on Yield, Yield Components, Photosynthetic Pigments and Proline Content in Wheat under Different Irrigation Regimes

F. Sorkhi[1]*, M. Fateh[1] and R. Rostami[2]

1. Assistant professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Miandoab Branch, Islamic Azad University, Miandoab, Iran.
2. Assistant professor, Department of Irrigation, Miandoab Branch, Islamic Azad University, Miandoab, Iran.

*: Corresponding author: fsrsorkh@gmail.com

(Received: Jaunary 24-2023; Accepted: July 24-2024)

Extended Abstract:

Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the oldest and most widely used crops in the world and is the most important source of human food that grows in a wide range of climatic conditions in the world. In arid and semi-arid regions, water is the main limitation. Iran is a dry and semi-arid country with limited precipitations. Therefore, the mean annual rainfall in Iran is even less than one third of the global average. There are many solutions for sustainability in agriculture, one of which is the use of biological fertilizers. Among these biofertilizers are mycorrhizal fungi. The symbiotic relationship between the arbuscular mycorrhizal fungus and the roots of the host plant significantly increases the growth and absorption of plant nutrients. In this research, the aim is to investigate the effect of arbuscular mycorrhizal fungus on improving the yield, yield components, and chlorophyll index of wheat by applying water deficit stress through increasing the interval of irrigation cycles.

Materials and Methods

This factorial experiment was conducted based on a randomized complete block design in four replications in the research farm of the Azad Islamic University of Miandoab, northwestern Iran in 2021. The experimental factors included the application of arbuscular mycorrhiza fungus species in three levels, control (without inoculation), inoculation with *Glomus mosseae* and inoculation with *Glomus intraradices* and three levels of irrigation regimes (i.e. irrigation after every 6, 13 and 20 days). Seeds of Elvand wheat cultivar were inoculated with mycorrhizal fungus, then the inoculated seeds were immediately planted into a depth of 3. Before planting, 15 tons/ha of manure and 25 kig of nitrogen fertilizer in the form of urea were uniformly applied to the soil. During the growing season, 50 kg of nitrogen fertilizer in the form of urea was used during the two stages of stem growth and spike formation. To measure wheat grain yield components, 10 plants were harvested and to determine grain yield and plant above-ground dry mass, 0.25 m^{-2} was taken from each plot. In this way, after removing two rows from each side and half a meter from the beginning and end of all rows as a margin, sampling of experimental units was done. The evaluated traits included the spikes/plant, grains/spike, the thousand-grain weight, plant aboveground dry mass, grain yield, harvest index, and greenness index.

Results and Discussion

Results indicated that the effect of irrigation intervals and mycorrhiza fungus were significant for grains/spike, thousand-grain weight, grain yield, above-ground dry mass, harvest index, chlorophyll index, photosynthetic pigments and proline concentrations. *G. mosseae* species increased the grains/spike, thousand-grain weight, above-ground dry mass, harvest index, and chlorophyll concentration compared to *G. intraradices* species by 5.21, 9.73, 8.86, 6.96 and 4.08% and increased the above-mentioned attributes compared to the control by 29.94, 30.28, 39.68, 27.90 and 21.43%, respectively. The highest spikes/plant, grain yield, chlorophyll index and concentration of chlorophyll a belonged to irrigation interval of 6 days and inoculation with *G. mosseae* species with 6.34, 612.45 g m^{-2}, 62.89 SPAD unit, and 0.306 mg g^{-1} FW, respectively. Prolongation of irrigation interval by creating water deficit stress caused the sterility of the spikes and significantly reduced the grains/spikes. The irrigation regime had a significant effect on the grain yield and by reducing the irrigation intervals, the grain yield was increased. The drought-induced decrease in grain yield stemmed from the decrease in green index, chlorophyll concentration, spikes/plant and grains/spike, leading to decrease in the harvest index. With increase in the irrigation interval, the concentration of chlorophyll a and b decreased, but the mycorrhizal inoculation led to significant increase in the concentration of chlorophyll a and b under water deficit stress. The plants inoculated with mycorrhizal fungus suffered less from water deficit stress than the non-colonized plants, and as a result, the concentration of proline increased less compared to the plants deprived from mycorrhizal fungus. According to these results, irrigation of wheat plants every 13 days and application of *G. mosseae* can produce the desirable grain yield, while decreasing water consumption for wheat production.

Conclusions

Mycorrhizal fungus increased the plant's resistance to drought stress by improving the absorption of water and nutrients under water stress deficit. *G. mosseae* was more effective in increasing the resistance of wheat against water deficit stress and as a result, it increased the grain yield, yield components, chlorophyll index and chlorophyll concentration of wheat to a greater extent compared to *G. intraradices*. In order to make the best use of water resources and soil nutrients, irrigation of wheat should be done every 13 days and must be accompanied by inoculation with *G. mosseae* to achieve an acceptable grain yield.

Keywords

Chlorophyll, Fertilizer, Harvest index, grain weight, Water stress