Archive of SID
doi: 10.22124/c.2018.8272.1324

دانشگاه گیلان
دانشکده علوم کشاورزی

تحقیقات غلات

دوره هشتم/ شماره دوم/ تابستان ۱۳۹۷ (۲۷۶-۲۶۱)

تأثیر قارچ *Piriformospora indica* بر جذب و کارآیی مصرف نور و عملکرد دانه ارزن تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

گودرز احمدوند[1*] و سمیه حاجی‌نیا[2]

تاریخ دریافت: ۹۶/۷/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۹

چکیده

به‌منظور بررسی تأثیر قارچ *Piriformospora indica* بر جذب و کارآیی مصرف نور ارزن تحت شرایط تنش کم‌آبی، آزمایشی به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا همدان طی دو سال زراعی (۱۳۹۳ و ۱۳۹۴) اجرا شد. عامل اصلی، آبیاری در سه سطح (آبیاری پس از ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر آب از تشتک تبخیر کلاس A) و عامل فرعی، قارچ *P. indica* در دو سطح (تلقیح بذر با قارچ و شاهد) بود. در هر دو سال با اعمال تنش کم‌آبی، سطح برگ و تجمع ماده خشک کاهش یافت. کاربرد قارچ در سطوح مختلف آبیاری، سبب افزایش سطح برگ و تجمع ماده خشک شد. بیش‌ترین کارآیی مصرف نور (۲/۳۱ و ۲/۵۳ گرم بر مگاژول به‌ترتیب در سال اول و دوم) در گیاهان تلقیح‌شده با قارچ تحت شرایط بدون تنش کم‌آبی و کم‌ترین مقدار آن (۱/۹۶ و ۲/۰۸ گرم بر مگاژول به‌ترتیب در سال اول و دوم) در گیاهان تلقیح‌نشده با قارچ (شاهد) تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی به‌دست آمد. تنش شدید کم‌آبی، عملکرد دانه ارزن را ۵۷/۵۳ و ۴۶/۹۱ درصد به‌ترتیب در سال اول و دوم اجرای آزمایش کاهش داد. تلقیح با قارچ عملکرد دانه ارزن را تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی، ۳۵/۳۴ و ۳۲/۵۰ درصد نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب در سال اول و دوم افزایش داد. نتایج این تحقیق نشان داد که تلقیح بذر با قارچ *P. indica* تأثیر مثبتی بر جذب و کارآیی مصرف نور ارزن در سطوح مختلف آبیاری داشت و موجب کاهش آثار تنش کم‌آبی و بهبود عملکرد ارزن شد.

واژه‌های کلیدی: تجمع ماده خشک، تنش کم‌آبی، جذب تشعشع، عملکرد دانه، قارچ درون‌زی

۱- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۲- دانش‌آموخته دکتری، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
* نویسنده مسئول: gahmadvand@basu.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولیدات کشاورزی به‌شمار می‌رود که گیاه را از رسیدن به حداکثر توان محصول‌دهی باز می‌دارد. حدود ۴۰ درصد از اراضی کره زمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و متوسط کاهش عملکرد سالیانه به‌واسطه خشکی در جهان ۱۷ درصد است که می‌تواند تا بیش از ۷۰ درصد در هر سال افزایش یابد (Zakirullah *et al.*, 2000). حدود ۸۲ درصد از کشور ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک واقع شده است که متوسط بارندگی آن ۲۵۰ میلی‌متر و کم‌تر از یک سوم متوسط بارندگی جهان است (Amiri and Eslamian, 2010).

جایگزینی گیاهان دارای نیاز آبی پایین و کم‌توقع به‌جای گیاهان دارای نیاز آبی بالا می‌تواند یکی از راهکارهای مهم مقابله با تنش کم‌آبی باشد. ژنوتیپ‌های مختلف ارزن به‌دلیل کوتاه بودن فصل رشد و داشتن برخی ویژگی‌ها، به آب کم‌تری نیاز دارند و می‌توانند نسبت به سایر غلات، محصول بیش‌تری در شرایط مساعد محیطی تولید کنند (Kusaka *et al.*, 2005). بنابراین، ارزن معمولی (*Panicum miliaceum* L.) می‌تواند گیاه مناسبی برای کاشت در مناطق کم‌آب باشد، با این‌حال رشد و نمو آن نیز می‌تواند بر اثر تنش کم‌آبی کاهش یابد.

یکی از بارزترین آثار کاهش رشد گیاه، کاهش سطح برگ است. از آن‌جا که برگ‌ها اندام اصلی فتوسنتز کننده در گیاه هستند، از این‌رو کاهش شاخص سطح برگ در اثر تنش سبب عدم ایجاد منبع فیزیولوژیک کافی جهت استفاده از نور دریافتی و تامین آسیمیلات‌های لازم برای پر کردن دانه و در نتیجه کاهش عملکرد می‌شود (Sarmadnia and Koochaky, 1989). بررسی اثر تنش خشکی در مراحل مختلف رشد، بر عملکرد و بازده استفاده از آب در پنج ژنوتیپ ارزن معمولی نشان داد که در شرایط تنش، عملکرد ژنوتیپ‌های ارزن کاهش می‌یابد، اما کاهش عملکرد در شرایط اعمال تنش در مرحله ظهور خوشه شدیدتر از اعمال تنش در مرحله رشد رویشی بود (Saghatoleslami *et al.*, 2007).

کارآیی استفاده از نور بیانگر مقدار ماده خشک تولید شده به ازای هر واحد نور جذب شده و واحد آن گرم ماده خشک تولید شده بر مگاژول تشعشع جذب شده است. اگرچه قبلاً اعتقاد بر این بود که کارآیی مصرف نور ثابت و بیش‌تر از طریق ژنتیکی کنترل می‌شود (Monteith, 1977)، اما عوامل محیطی و عملیات مدیریتی نظیر تاریخ کاشت، تراکم و فاصله بوته‌ها، رقم، تغییرات آب و هوایی و حاصل‌خیزی خاک به‌ویژه نیتروژن قابل دسترس به‌سبب نقش ویژه‌ای که در فتوسنتز دارد، این عامل را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Akmal and Janssens, 2004). تسفایه و همکاران (Tesfaye *et al.*, 2006) کاهش کارآیی مصرف نور در گیاهان زراعی را تحت شرایط تنش کم‌آبی در مرحله رشد رویشی گزارش کردند. از جمله دلایل کاهش کارآیی مصرف نور در گیاهان تحت تنش کم‌آبی، کاهش جذب تشعشع فعال فتوسنتزی گزارش شده است (Garofalo and Rinaldi, 2015; Tesfaye *et al.*, 2006). تحت تنش کم‌آبی، سطح برگ گیاه به‌علت پژمردگی و جمع‌شدن پهنک، کاهش می‌یابد، با کاهش سطح برگ، جذب تشعشع فعال فتوسنتزی نیز کاهش می‌یابد (Ngugi *et al.*, 2013). هان و همکاران (Han *et al.*, 2008) گزارش کردند که اعمال تنش خشکی از طریق کاهش نرخ فتوسنتز و کاهش سطح برگ منجر به کاهش مقادیر کارآیی مصرف نور گندم (*Triticum aestivum* L.) می‌شود.

بنابراین، دست‌یابی به راهبردهایی برای کاهش آثار منفی تنش خشکی بر گیاهان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کاربرد فن‌آوری‌های زیستی مبتنی بر استفاده از پتانسیل میکروارگانیسم‌های مفید خاکزی در برقراری روابط همزیستی با گیاهان، نقش موثری در افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی دارند (Qiang *et al.*, 2012). قارچ *Piriformospora indica* دارای رابطه همزیستی با ریشه اغلب گیاهان زراعی است و از طریق افزایش جذب عناصر غذایی مانند فسفر و برخی عناصر کم‌مصرف، باعث افزایش رشد و عملکرد گیاهان می‌شود (Oelmuller *et al.*, 2009). از سوی دیگر، در پژوهش‌های مختلف گزارش شده است که همزیستی قارچ *P. indica* نیز با گیاهان موجب تحریک رشد، افزایش عملکرد و تحمل گیاه به تنش‌های شوری و خشکی شده است (Rahimi *et al.*, 2014; Bagheri *et al.*, 2013). گزیو و همکاران (Xu *et al.*, 2017) نشان دادند که تلقیح ریشه گیاه ذرت (*Zea mayes* L.) با قارچ *P. indica* در شرایط تنش خشکی سبب افزایش سطح برگ به‌میزان ۱۷ درصد نسبت به گیاهان تلقیح‌نشده شد. در پژوهشی دیگر نشان داده شد که قارچ *P. indica* باعث تغییر پروتئوم گیاهان تلقیح‌شده و افزایش بیان برخی از پروتئین‌های مقاومت به تنش خشکی شد (Ghabooli *et al.*, 2013). نتایج تحقیقات یعقوبیان

www.SID.ir

Archive of SID

و همکاران (Yaghoubian *et al.*, 2014) نیز گویای آن بود که تحت شرایط خشکی می‌توان از قارچ *P. indica* جهت افزایش رشد و عملکرد گندم استفاده کرد. باقری و همکاران (Bagheri *et al.*, 2013) با بررسی قارچ *P. indica* در برنج (*Oryza sativa* L.) بیان کردند که گیاهان تیمارشده با قارچ تحت شرایط شوری نسبت به گیاهان شاهد، رشد بهتری را نشان دادند. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که در اندام‌های هوایی و ریشه، میزان پروتئین محلول، محتوی آب نسبی، غلظت پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گیاهان تیمارشده با قارچ نسبت به گیاهان شاهد افزایش یافت. کوش (Ghosh, 2004) ضمن بررسی اثر کودهای زیستی بر تولید کنجد (*Sesamum indicum* L.)، گزارش کرد که کارآیی جذب انرژی تابشی به‌میزان سطح برگ و توزیع برگ‌ها در داخل سایه‌انداز بستگی داشت.

با توجه به این‌که بخش عمده مناطق کشور دارای آب و هوای خشک و نیمه‌خشک و شدت تشعشع بالا است، در این شرایط کاربرد قارچ‌های همزیست می‌تواند به‌عنوان یک راهکار به‌منظور حداکثر استفاده از تشعشع بالای خورشیدی و منابع محدود آب به‌کار رود. بنابراین، این تحقیق با هدف ارزیابی تأثیر قارچ درون‌زی ریشه *P. indica* بر شاخص سطح برگ، جذب تشعشع، کارآیی مصرف نور و عملکرد دانه ارزن در سطوح مختلف آبیاری اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان واقع در روستای دستجرد با عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۱ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۶۹۰ متر از سطح دریا، طی دو سال (۱۳۹۳ و ۱۳۹۴) اجرا شد. منطقه از نظر اقلیمی بر اساس اقلیم‌نمای دومارتن جزء مناطق نیمه‌خشک و سرد با میانگین بارندگی سالیانه ۳۳۰ میلی‌لیتر است (Zare Abyaneh *et al.*, 2011).

مجموع بارندگی سال اول و دوم طی طول دوره رشد به‌ترتیب ۹/۷ و ۱۹/۱ میلی‌متر و میانگین دمای متوسط طی طول دوره رشد، در سال اول آزمایش ۲۴/۱ و در سال دوم ۲۴/۶ درجه سلسیوس بود (جدول ۱). میزان تبخیر روزانه از تشتک تبخیر کلاس A طی دوره رشد در سال اول از ۳/۸ تا ۱۶/۴ میلی‌متر و در سال دوم از ۴/۱ تا ۱۴/۸ میلی‌متر متغیر بود (شکل ۱). بافت خاک مزرعه آزمایشی، لومی و مزرعه در سال قبل از اجرای آزمایش به‌صورت آیش بود. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه در جدول ۲ ارایه شده است. آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. رژیم آبیاری در سه سطح (آبیاری پس از ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی آب از تشتک تبخیر کلاس A (به‌ترتیب به‌عنوان بدون‌تنش، تنش متوسط و تنش شدید کم‌آبی) در کرت‌های اصلی و قارچ *P. indica* در دو سطح (بدون تلقیح و تلقیح بذر با قارچ) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند.

جدایه قارچ *P. indica* در ارلن‌های حاوی ۵۰۰ میلی‌لیتر محیط کشت مایع اختصاصی (Hill and Kafer, 2001)، کشت و روی شیکر با سرعت 100 دور در دقیقه قرار گرفت و پس از ۲۰ روز اقدام به جمع‌آوری میسلیوم‌ها شد. سپس ۱۰ گرم قارچ (میسلیوم‌ها و اسپور) با ۱۰۰ گرم ماسه بادی استریل مخلوط و به‌عنوان مایه تلقیح استفاده شد (Tripathi *et al.*, 2015). تکثیر قارچ در آزمایشگاه‌های گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا صورت گرفت. جهت اعمال تیمار قارچ، بذرها با مایه تلقیح (به‌میزان ۱۰۰ گرم مایه تلقیح به‌ازای هر کیلوگرم بذر) آغشته و بلافاصله اقدام به کشت شد (Tripathi *et al.*, 2015).

عملیات کاشت ارزن در سال اول و دوم به‌ترتیب در دهم و اول خرداد ماه در کرت‌های شش ردیفه به طول چهار متر و فاصله بین ردیف‌های ۵۰ سانتی‌متر انجام شد. فاصله نهایی بوته‌ها روی خطوط کاشت، پنج سانتی‌متر بود. بذر مورد استفاده ارزن رقم پیشاهنگ بود که از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی همدان تهیه شد. کاشت بذر با تراکم بیش‌تر از حد مورد نظر انجام و برای دست‌یابی به تراکم مطلوب (۴۰ بوته در مترمربع)، گیاهان در مرحله دو تا سه برگی تنک شدند. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت بذر انجام شد و سپس گیاهان تا مرحله سه برگی به‌طور منظم و یکنواخت آبیاری شدند. بعد از این مرحله، اعمال تیمارهای آبیاری بر اساس تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A صورت گرفت. میزان تبخیر به‌طور روزانه با نصب تشتک تبخیر در مزرعه اندازه‌گیری و آبیاری هر تیمار، پس از رسیدن میزان تبخیر تجمعی به مقدار مورد نظر انجام شد. آبیاری به‌صورت جوی و پشته‌ای و با لوله‌های پلی‌اتیلنی انجام و مقدار آب مصرفی در هر بار آبیاری با استفاده از کنتور کنترل شد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- حداقل، حداکثر و متوسط دمای محیط و میزان بارندگی طی دوره رشد ارزن در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴

Table 1. Minimum (Min. T), maximum (Max. T) and average temperature (Ave. T) and rainfall during growing season of millet at 2014 and 2015

Days after planting	2014				2015			
	Min. T (◦C)	Max. T (◦C)	Ave. T (◦C)	Rainfall (mm)	Min. T (◦C)	Max. T (◦C)	Ave. T (◦C)	Rainfall (mm)
0-10	8.9	27.0	18.8	8.8	10.5	29.6	21.0	0.2
10-20	10.0	28.8	20.5	0.1	12.5	34.2	24.2	0.0
20.30	11.4	30.3	22.3	0.3	11.1	33.1	23.4	0.0
30-40	15.2	35.1	26.0	0.0	13.3	35.4	25.2	0.0
40-50	14.9	33.6	25.1	0.3	19.1	37.8	29.6	0.0
50-60	17.3	36.9	28.7	0.0	17.6	35.9	27.3	4.0
60-70	15.7	35.3	26.2	0.0	13.6	33.9	24.6	0.0
70-80	14.4	36.6	26.3	0.0	14.4	35.4	26.2	0.0
80-90	15.3	35.5	25.9	0.2	14.9	36.9	26.9	0.0
90-100	14.6	34.2	25.2	0.0	13.4	36.4	24.8	0.0
100-110	12.2	33.0	23.5	0.0	11.9	30.5	21.1	13.5

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی (عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری)

Table 2. Physical and chemical characteristics of the experimental field soil (depth of 0-30 cm)

Year	Soil texture	EC ($dS.m^{-1}$)	pH	Organic matter (%)	Absorbable P (ppm)	Absorbable K (ppm)	Total N (%)
2014	Loam	0.38	7.50	1.10	20.00	456.00	0.08
2015	Loam	0.18	8.00	1.00	11.00	326.00	0.02

نیاز آبی گیاه، با تعیین تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش فائو پنمن مونتیث و ضرایب گیاهی در منطقه مورد آزمایش از روابط ۱ و ۲ تعیین شد (Allen *et al.*, 1998). برای تعیین تبخیر و تعرق مرجع از داده‌های تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A و ضرایب تشتک استفاده شد (Allen *et al.*, 1998):

$$ET_0 = K_P \times E_{Pan} \quad (۱)$$

که در آن، E_{Pan}، K_P و ET_0 به‌ترتیب تبخیر از تشتک، ضریب تشتک و تبخیر و تعرق مرجع است. در این تحقیق، ضریب تشت از روش پیشنهاد شده در نشریه فائو ۵۶، با توجه به موقعیت و محل استقرار آن به‌طور میانگین ۰/۶۵ منظور شد (Allen *et al.*, 1998):

$$ET_{Crop} = K_C \times ET_0 \quad (۲)$$

که در آن، ET_{Crop} تبخیر و تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر در روز) و K_C ضریب گیاهی است (Allen *et al.*, 1998). برای تعیین ضرایب گیاهی ارزن در مراحل مختلف نمو از دستورالعمل فائو استفاده شد (Allen *et al.*, 1998). حجم آب مورد نیاز در هر بار آبیاری با در نظر گرفتن بارندگی موثر، مساحت هر کرت و راندمان آبیاری (۸۰ درصد) برآورد شد (Doorenbos and Kassam, 1979). میزان آب مصرفی طی دوره رشد در جدول ۳ ارایه شده است.

به‌منظور تعیین وزن خشک کل و سطح برگ، نمونه‌برداری تخریبی از سه بوته تصادفی از هر کرت با در نظر گرفتن حاشیه، از ۳۰ روز پس از کاشت و هر ۱۵ روز یک بار تا انتهای دوره رشد، انتخاب و به آزمایشگاه منتقل شد. برای تعیین شاخص سطح برگ طول و عرض (پهن‌ترین قسمت برگ) برگ‌ها اندازه‌گیری و در ضریب ۰/۵ ضرب شد (Sobhani and Shirani, 2000):

$$A = L \times W \times 0.5 \quad (۳)$$

در این رابطه، A ، L و W به‌ترتیب سطح ، طول و عرض برگ است. جهت تعیین وزن خشک کل نیز ابتدا نمونه‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک و سپس توسط ترازو وزن شدند. به‌منظور بیان تغییرات شاخص سطح برگ ارزن نسبت به روزهای کاشت از رابطه لجستیک-پیک (رابطه ۴) استفاده شد (Hosseinpanahi *et al.*, 2010):

$$Y = a + 4b\frac{\exp[-(\frac{x-c}{d})]}{1+\exp[-(\frac{x-c}{d})]^2} \quad (۴)$$

که در آن، a عرض از مبدا، b زمان رسیدن به حداکثر شاخص سطح برگ، c حداکثر شاخص سطح برگ، d نقطه عطف منحنی که در آن رشد سطح برگ وارد مرحله خطی می‌شود و x زمان بر حسب روزهای پس از کاشت است.

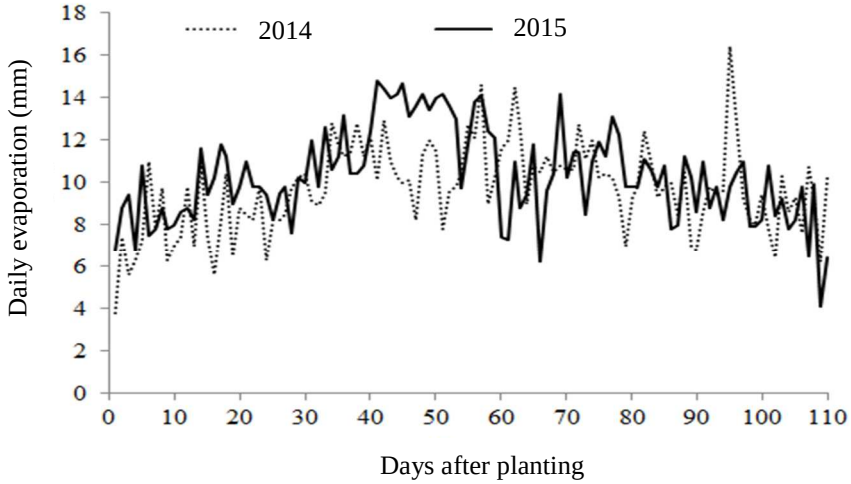
www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳- مقدار آب مصرف شده (مترمکعب در هکتار) طی دوره رشد ارزن

Table 3. Water used content ($m^3.ha^{-1}$) during the millet growing period

Irrigation (evaporation from pan class A in mm)	2014	2015
60	6120	6358
90	4680	4864
120	3700	3847



شکل ۱- میزان تبخیر روزانه (میلی‌متر) طی دوره رشد ارزن در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴

Figure 1. Daily evaporation (mm) during the millet growing period at 2014 and 2015

جهت ارزیابی تغییرات ماده خشک ارزن در زمان، رابطه سیگموئیدی (رابطه ۵) بهترین برازش را به داده‌های به‌دست آمده داشت (Hosseinpanahi *et al.*, 2010):

$$TDM = \frac{a}{1+b\times\exp(-cx)} \qquad (۵)$$

که در آن، TDM تجمع ماده خشک برحسب گرم در مترمربع، a حداکثر تجمع ماده خشک، b ضریب ثابت رابطه، c سرعت رشد نسبی و x زمان (روز پس از کاشت) است.

جهت محاسبه میزان جذب و کارآیی مصرف تابش، ابتدا میزان تشعشع روزانه خورشیدی برای عرض جغرافیایی همدان به روش گودریان و ونلار (Goudriaan and van Laar, 1994) محاسبه و این مقادیر بر اساس تعداد ساعات آفتابی اخذ شده از ایستگاه هواشناسی مرکز همدان (۱۳۹۳ و ۱۳۹۴) اصلاح و نور جذب‌شده روزانه برای ارزن بر اساس رابطه ۶ محاسبه شد (Tsubo *et al.*, 2005). سپس تشعشع جذب‌شده از حاصل‌ضرب نور ورودی شبیه‌سازی شده در درصد نور جذب‌شده به‌دست آمد. مقدار کل تشعشع جذب‌شده به‌صورت تجمعی از طریق حاصل‌ضرب نور ورودی شبیه‌سازی شده در انتگرال کسر تشعشع فعال فتوسنتزی جذب‌شده نسبت به زمان محاسبه شد:

$$I_{abs} = I_0\times(1-p)\times[1-\exp(-k\times LAI)] \qquad (۶)$$

که در آن، I_0 مقدار تشعشع رسیده به بالای تاج پوشش ارزن (مگاژول بر مترمربع)، I_{abs} مقدار تشعشع جذب‌شده توسط تاج پوشش ارزن (مگاژول بر مترمربع)، p ضریب انعکاس (۰/۰۵)، k ضریب خاموشی نور در ارزن (۰/۵۵) و LAI شاخص سطح برگ است (Kamkar *et al.*, 2004). کارآیی مصرف نور بر حسب گرم بر مگاژول، از طریق محاسبه شیب خط رگرسیون بین ماده خشک (گرم در مترمربع) و میزان تشعشع تجمعی (مگاژول بر متر مربع) محاسبه شد (Tsubo *et al.*, 2005). برای تعیین عملکرد دانه، سطحی معادل دو مترمربع در هر دو سال اجرای آزمایش در تاریخ ۱۵ شهریور با لحاظ حاشیه برداشت شد.

به‌منظور تجزیه آماری داده‌ها، ابتدا یکنواختی واریانس خطاهای آزمایشی با استفاده از آزمون بارتلت بررسی شد. سپس تجزیه واریانس مرکب داده‌ها با فرض تصادفی بودن سال و ثابت بودن فاکتورهای آبیاری و قارچ انجام شد. با توجه به معنی‌دار بودن برهمکنش (سال× آبیاری× قارچ)، برش این برهمکنش بر اساس سال انجام و مقایسه میانگین‌ها به روش Lsmeans در سطح احتمال پنج درصد

www.SID.ir

Archive of SID

صورت گرفت. برای تجزیه آماری داده‌ها از نرم‌افزار آماری SAS ver. 9.1 و برای برازش منحنی‌ها و رسم نمودارها از نرم‌افزارهای Slide Write و Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

شاخص سطح برگ

ارتباط بین تیمارهای آبیاری و شاخص سطح برگ ارزن با و بدون کاربرد قارچ *P. indica* در قالب مدل غیرخطی در جدول ۴ ارایه شده است. نتایج این آزمایش نشان دهنده روند مشابه تغییرات شاخص سطح برگ طی فصل رشد برای تمامی تیمارها در هر دو سال بود (شکل ۲)، به‌طوری که در ابتدای دوره رشد با گذشت زمان شاخص سطح برگ ارزن به‌کندی افزایش یافت و در ادامه فصل رشد افزایش شاخص سطح برگ روند خطی پیدا کرد و درحدود ۶۰ روز پس از کاشت به حداکثر مقدار خود رسید. پس از آن به‌دلیل پیری، زرد شدن و ریزش برگ‌های پایین تاج پوشش، شاخص سطح برگ روند نزولی پیدا کرد (شکل ۲).

نتایج نشان داد که تا ۳۰ روز پس از کاشت تفاوت معنی‌داری از لحاظ شاخص سطح برگ بین تیمارها وجود نداشت که احتمالاً به‌این دلیل باشد که در این مرحله گیاهان کم‌تر تحت تأثیر تنش کم‌آبی قرار گرفتند، اما در ۴۰ روز پس از کاشت ارزن، تفاوت بین تیمارها مشاهده شد و شاخص سطح برگ در این مرحله با اعمال تنش کم‌آبی، کاهش یافت (شکل ۲). تحت شرایط بدون تنش، بیش‌ترین شاخص سطح برگ در سال اول (۴/۳۷) و در سال دوم (۴/۰۸) با کاربرد قارچ *P. indica* به‌دست آمد که به‌ترتیب ۹/۵۲ و ۶/۸۱ درصد بیش‌تر از شاهد بدون قارچ بود. تحت شرایط تنش متوسط کم‌آبی نیز بیش‌ترین شاخص سطح برگ در سال اول (۳/۶۴) و در سال دوم (۳/۵۲) مربوط به گیاهان تلقیح‌شده با قارچ *P. indica* بود که نسبت به گیاهان تلقیح‌نشده به‌ترتیب ۱۰/۷۱ و ۱۲/۳۸ درصد افزایش یافت و در نهایت تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی، تلقیح با قارچ *P. indica* موجب افزایش ۱۹/۴۷ و ۱۵/۵۷ درصدی شاخص سطح برگ نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب در سال اول و دوم شد (شکل ۲).

به‌طور کلی، شاخص سطح برگ ارزن در همه سطوح تنش کم‌آبی کاهش یافت که با نتایج سایر محققان مطابقت داشت (Anjum *et al.*, 2011; Tabarzad *et al.*, 2016). تحقیقات نشان داده است که اولین پاسخ به تنش کم‌آبی، کاهش سطح برگ و رشد گیاه است که این امر موجب می‌شود که تعرق در گیاه کاهش یابد (Xu and Zhou, 2008). کاهش در آماس برگ و فتوسنتز تحت شرایط تنش کم‌آبی، رشد و گسترش سلول‌ها را محدود می‌کند و در نتیجه منجر به کاهش سطح برگ می‌شود (Anjum *et al.*, 2011; Tabarzad *et al.*, 2016).

به‌نظر می‌رسد که پیر شدن و ریزش بیش‌تر برگ‌ها و جایگزین نشدن آن‌ها توسط برگ‌های جدید باعث کاهش بیش‌تر شاخص سطح برگ در تیمار تنش شدید کم‌آبی شده باشد. شاخص سطح برگ با کاربرد قارچ *P. indica* افزایش یافت و این امر منجر به استفاده بهینه از نور دریافتی کانوپی و افزایش عملکرد شد. قارچ *P. indica* باعث افزایش جذب آب و عناصر غذایی به‌ویژه فسفر در گیاهان می‌شود و با دسترسی بیش‌تر این عناصر، شاخص سطح برگ افزایش می‌یابد (Oelmuller *et al.*, 2009).

جدول ۴- اثر تیمارهای آبیاری و قارچ بر شاخص سطح برگ ارزن در قالب مدل غیرخطی برازش داده شده

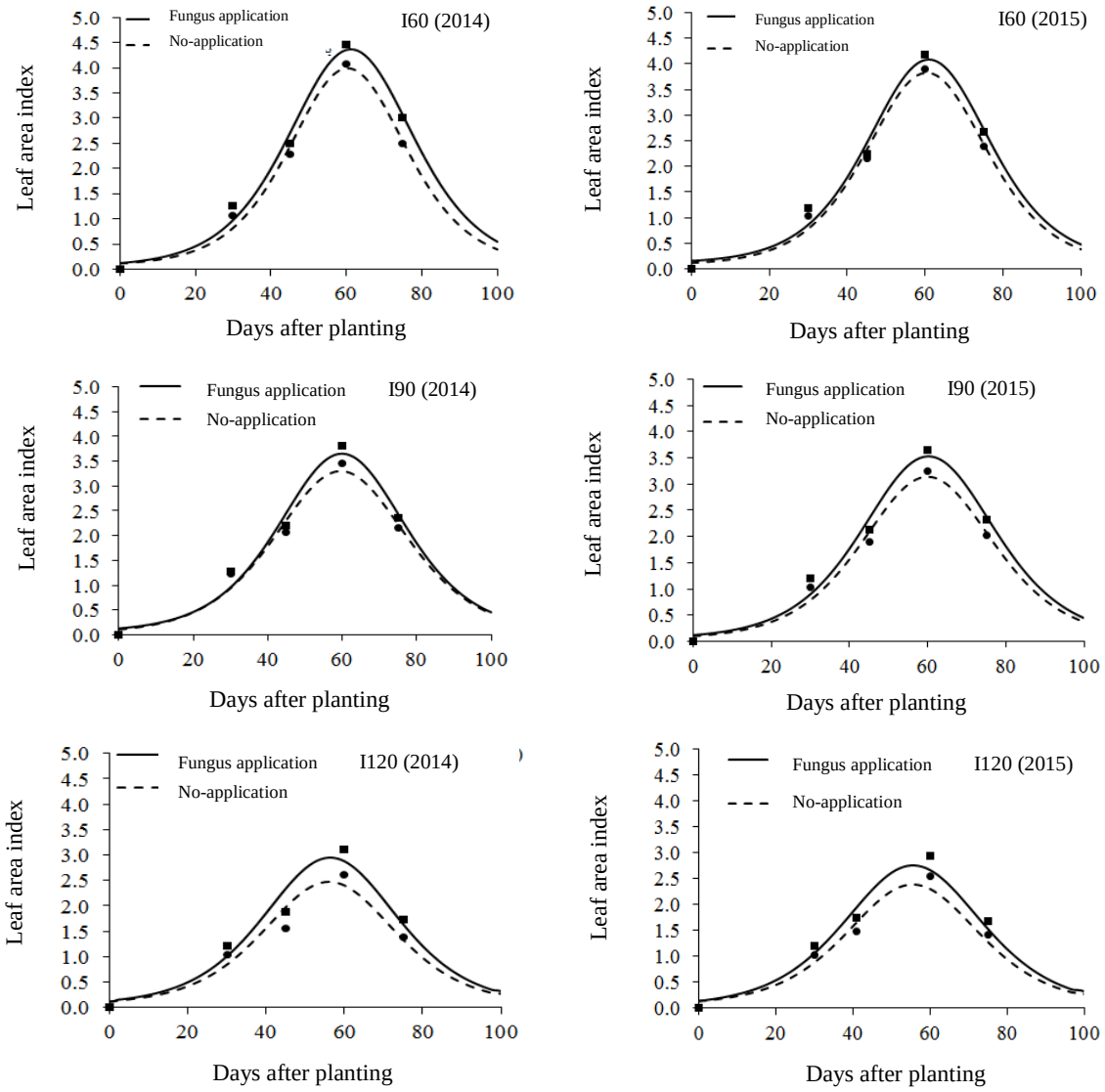
Table 4. Effect of irrigation and fungus on leaf area index of millet in the fitted non-linear model

Irrigation*	Fungus	2014					2015				
		a	b	c	d	R^2	a	b	c	d	R^2
60	Application	0.06	4.35	61.16	10.96	0.98	0.12	3.98	60.96	10.50	0.98
	No-application	0.07	3.96	60.32	10.33	0.98	0.07	3.75	60.42	10.32	0.98
90	Application	0.06	3.60	60.10	11.46	0.97	0.08	3.50	60.16	11.04	0.97
	No-application	0.03	3.25	59.26	12.01	0.97	0.03	3.06	59.89	11.35	0.98
120	Application	0.04	2.90	58.12	11.54	0.95	0.03	2.68	58.86	12.17	0.94
	No-application	0.03	2.43	57.88	11.60	0.95	0.02	2.32	58.28	11.97	0.94

*: Evaporation from pan class A (mm).

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲- تأثیر قارچ *P. indica* بر شاخص سطح برگ ارزن در رژیم‌های مختلف آبیاری طی سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴

Figure 2. Effect of *P. indica* fungus on leaf area index of millet under different irrigation regimes during 2014 and 2015

افزایش شاخص سطح برگ تنها به‌دلیل افزایش تولید برگ نیست، بلکه با افزایش دوام سطح برگ، تأخیر در پیری و زرد شدن برگ‌ها نیز ارتباط دارد (Hakan, 2002). چنین به‌نظر می‌رسد که قارچ *P. indica* با جذب بیشتر رطوبت خاک، توانسته است در تأمین آب مورد نیاز گیاه و در نتیجه افزایش رشد و گسترش سطح برگ، موثر واقع شود. افزایش شاخص سطح برگ در گیاهان تلقیح شده با *P. indica* به‌ویژه در شرایط تنش شدید کم‌آبی، بیانگر سودمندی آثار این قارچ در بهبود جذب آب، عناصر غذایی، فتوسنتز و در نهایت سطح برگ گیاه است.

ماده خشک

اثر تیمارهای آبیاری و قارچ بر روند تغییرات ماده خشک کل ارزن در جدول ۵ ارایه شده است. در هر دو سال، تجمع ماده خشک در طول زمان از یک رابطه سیگموئیدی تبعیت کرد. بین تیمارهای مختلف از نظر تجمع ماده خشک ارزن در روزهای ابتدایی، تفاوت چندانی وجود نداشت. از حدود ۵۰ روز پس از کاشت، اختلاف میان تیمارهای مختلف از لحاظ تغییرات ماده خشک نمود پیدا کرد و در حدود ۹۰ روز پس از کاشت به بیش‌ترین مقدار خود رسید و از آن پس روند تقریباً ثابتی را دنبال کرد (شکل ۳).

www.SID.ir

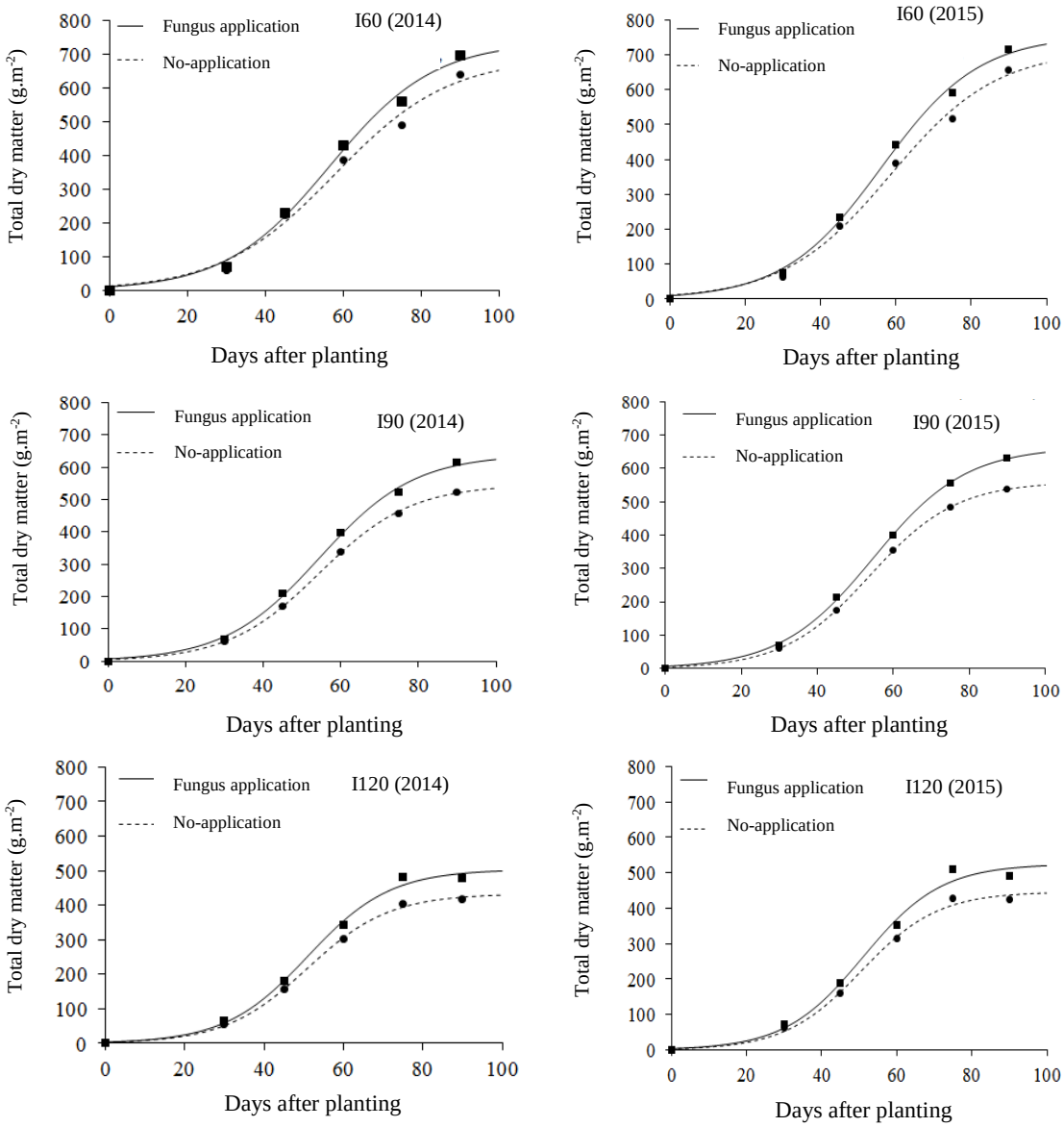
Archive of SID

جدول ۵- اثر تیمارهای آبیاری و قارچ بر روند ماده خشک کل ارزن در قالب مدل غیرخطی برازش داده شده

Table 5. Effect of irrigation and fungus on total dry matter of millet in the fitted non-linear model

Irrigation*	Fungus	2014				2015			
		a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
60	Application	737	67.73	0.07	0.99	755	75.59	0.07	0.99
	No-application	689	52.01	0.06	0.98	713	62.49	0.07	0.99
90	Application	639	84.87	0.08	0.99	664	89.00	0.08	0.98
	No-application	546	99.74	0.08	0.99	560	113.67	0.08	0.99
120	Application	503	133.64	0.09	0.99	524	131.80	0.09	0.97
	No-application	432	133.87	0.09	0.97	446	141.53	0.09	0.98

*: Evaporation from pan class A (mm).



شکل ۳- تأثیر قارچ *P. indica* بر ماده خشک کل ارزن در رژیم‌های مختلف آبیاری طی سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴

Figure 3. Effect of *P. indica* fungus on total dry matter of millet under different irrigation regimes during 2014 and 2015

www.SID.ir

Archive of SID

در سال اول، گیاهان ارزن تلقیح شده با قارچ *P .indica* تحت شرایط بدون تنش، بیش‌ترین تجمع ماده خشک (۶۸۰ گرم در متر مربع) را به خود اختصاص دادند. کم‌ترین میزان این صفت (۴۲۳ گرم در متر مربع) نیز در گیاهان ارزن تلقیح‌نشده تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی به‌دست آمد (شکل ۳). در سال دوم، بیش‌ترین و کم‌ترین تجمع ماده خشک نیز به‌ترتیب در گیاهان تلقیح شده با *P. indica* در شرایط بدون تنش کم‌آبی (۷۰۳ گرم بر متر مربع) و گیاهان تلقیح نشده در شرایط تنش شدید کم‌آبی (۴۳۷ گرم بر متر مربع) به‌دست آمد (شکل ۳).

تنش خشکی باعث کاهش حداکثر تجمع ماده خشک کل در ارزن شد. به‌نظر می‌رسد که در تیمارهای تحت تنش خشکی به‌دلیل کاهش سطح فعال برگ و کاهش سرعت فتوسنتز، راندمان انتقال مواد و تجمع ماده خشک کاهش یافت. این موضوع با یافته‌های سایر محققان مطابقت داشت (Ali *et al.*, 2012; Tabarzad *et al.*, 2016). اسبورن و همکاران (Osborne *et al.*, 2002) بیان داشتند که علت افزایش تولید ماده خشک در شرایط آبیاری مطلوب، گسترش بیش‌تر و تداوم سطح برگ بود که موجب ایجاد منبع فیزیولوژیک کافی جهت استفاده هر چه بیش‌تر نور دریافتی و تولید ماده خشک شد. بنابراین در شرایط تنش کم‌آبی، عدم تأمین آب مطلوب مورد نیاز برای گیاه باعث کاهش سطح برگ و در نتیجه کاهش جذب نور می‌شود که در نتیجه آن، فتوسنتز و تولید ماده خشک در گیاه کاهش می‌یابد. با توجه به آثار مثبت قارچ *P. indica* بر سطح برگ و جذب نور بدیهی است که ماده خشک در گیاهان تلقیح شده نسبت به گیاهان تلقیح نشده افزایش یابد. رحیمی و همکاران (Rahimi *et al.*, 2014)، تولید ماده خشک بالا در گیاهان تلقیح شده با قارچ *P. indica* را در نتیجه جذب فسفر بیان کردند و اظهار داشتند که افزایش جذب آب توسط قارچ نیز ممکن است بر رشد رویشی تأثیرگذار باشد.

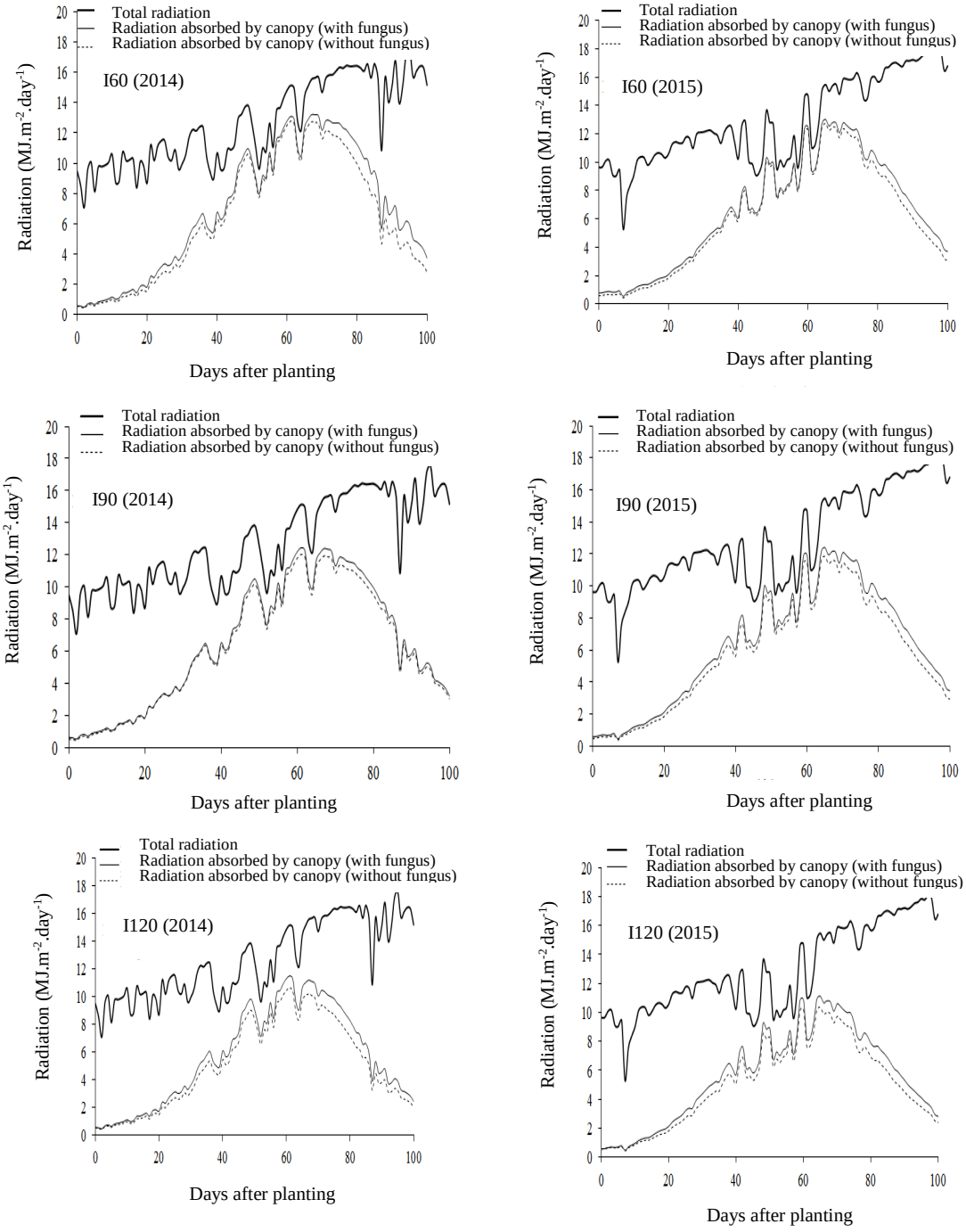
جذب تشعشع

میزان تشعشع بالای تاج پوشش و میزان تشعشع جذب شده توسط تاج پوشش ارزن در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در هر دو سال متناسب با افزایش سطح برگ، میزان نور جذب شده توسط تاج پوشش ارزن به‌تدریج افزایش یافت و در حدود ۶۷-۶۵ روز پس از کاشت به بیش‌ترین میزان خود رسید و سپس به‌علت کاهش شاخص سطح برگ تا انتهای دوره رشد روند نزولی در پیش گرفت (شکل ۴). در سال اول، میزان کل تشعشع جذب شده در بالای تاج پوشش در ۶۷ روز پس از کاشت ۱۵/۶۵ مگاژول بر متر مربع در روز بود. در این سال، بیش‌ترین میزان نور جذب‌شده (۱۳/۲۰ مگاژول بر متر مربع در روز) در گیاهان تلقیح‌شده با قارچ تحت شرایط عدم تنش کم‌آبی و کم‌ترین میزان آن (۱۰/۱۸ مگاژول بر متر مربع در روز) در گیاهان شاهد تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی مشاهده شد (شکل ۴). در سال دوم در ۶۵ روز پس از کاشت، کل تشعشع جذب‌شده حدود ۱۵/۴۷ مگاژول بر متر مربع در روز بود (شکل ۴). گیاهان ارزن تلقیح‌شده با قارچ تحت شرایط عدم تنش با ۱۳/۰۲ مگاژول بر متر مربع در روز بیش‌ترین و گیاهان شاهد تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی (۱۰/۳۳ مگاژول بر متر مربع در روز) کم‌ترین میزان جذب تشعشع را دارا بودند (شکل ۴). تنش شدید کم‌آبی میزان تشعشع جذب‌شده در گیاهان تلقیح نشده در سال اول و دوم را در مقایسه با عدم تنش کم‌آبی به‌ترتیب ۲۰/۰۳ و ۱۸/۷۹ درصد کاهش داد (شکل ۴).

میزان کل تشعشع ورودی در ابتدای دوره رشد زیاد است، اما به‌دلیل رشد آهسته برگ‌ها و باز بودن تاج پوشش، جذب نور کم است. افزایش میزان جذب تشعشع و افزایش سرعت رشد هنگامی اتفاق می‌افتد که تاج پوشش بسته و رشد برگ‌ها وارد مرحله خطی شود. بیش‌ترین میزان جذب نور در این آزمایش، مصادف با حداکثر سطح برگ در تمامی تیمارها بود (شکل ۴). آکرچ و اسلافر (Acreche and Slafer, 2009) نیز گزارش کردند که جذب نور به‌میزان تشعشع برخورد کرده با تاج پوشش و سطح برگ بستگی دارد. با اعمال تنش کم‌آبی، میزان جذب نور فعال فتوسنتزی کاهش یافت. احتمالاً این کاهش جذب نور ناشی از کاهش سطح برگ بود. رزیق و همکاران (Rezig *et al.*, 2015) نیز کاهش سطح سبز برگ و در نتیجه کاهش جذب نور فعال فتوسنتزی را در اثر تنش کم‌آبی گزارش کردند. با افزایش شاخص سطح برگ و به تبع آن افزایش پوشش گیاهی بر سطح زمین، میزان جذب نور در گیاهان ارزن تلقیح‌شده با قارچ در مقایسه با گیاهان شاهد تلقیح‌نشده افزایش یافت که این امر منجر به کاهش اتلاف نور و بهبود کارآیی مصرف نور در گیاهان تلقیح‌شده با قارچ *P. indica* در سطوح مختلف آبیاری شد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴- تأثیر قارچ *P. indica* بر جذب تشعشع ارزن در رژیم‌های مختلف آبیاری طی سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴

Figure 4. Effect of *P. indica* fungus on radiation absorbtion of the millet under different irrigation regimes during 2014 and 2015

کارآیی مصرف نور

نتایج این آزمایش نشان داد که در هر دو سال در تمام تیمارها، ارتباط بین تولید ماده خشک ارزن و تشعشع فعال فتوسنتزی (PAR) تجمعی به‌صورت خطی و ضریب همبستگی آن بیش‌تر از ۰/۹۳ بود (شکل ۵). بیش‌ترین مقدار کارآیی مصرف نور ارزن (۲/۳۱ و ۲/۵۳ گرم بر مگاژول به‌ترتیب در سال اول و دوم) در گیاهان تلقیح‌شده با قارچ *P. indica* تحت شرایط بدون تنش کم‌آبی و کم‌ترین مقدار آن (۱/۹۶و ۲/۰۸ گرم بر مگاژول به‌ترتیب در سال اول و دوم) در گیاهان شاهد تلقیح‌نشده تحت شرایط تنش شدید

www.SID.ir

Archive of SID

کم‌آبی به‌دست آمد (شکل ۵). مقادیر گزارش‌شده برای کارآیی مصرف نور ارزن در مطالعات مختلف بسته به شرایط آزمایش متفاوت است. برای مثال کامکار و همکاران (Kamkar *et al.*, 2004) کارآیی مصرف نور در ارزن را حدود ۱/۴۳ گرم بر مگاژول به‌دست آوردند. تنش کم‌آبی به‌واسطه کاهش جذب تشعشع فعال فتوسنتزی توسط کانوپی که ناشی از کاهش سطح برگ می‌باشد، کارآیی مصرف نور را کاهش می‌دهد (Earl and Davis, 2003). کاهش جذب نور از طریق لوله‌شدن برگ‌ها نیز می‌تواند عامل مهمی در کاهش کارآیی مصرف نور در ارزن باشد. در شرایط تنش کم‌آبی تغییر شکل دادن برگ‌ها و جمع‌شدن آن‌ها سطح تبخیر را کاهش داده و باعث می‌شود گیاهان با متعادل‌کردن حفظ آماس و کاهش هدررفت آب زنده بمانند. در کل کاهش راندمان مصرف نور در شرایط تنش کم‌آبی را می‌توان به تغییرات مورفولوژیک و اکوفیزیولوژیکی که در گیاهان تحت تنش رخ می‌دهد و پیامد آن کاهش دریافت و جذب تشعشع خورشیدی است، مرتبط دانست (Arvin and Vafabakhsh, 2016). لی و همکاران (Li *et al.*, 2011) کاهش کارآیی مصرف نور گندم را تحت تنش کم‌آبی گزارش کردند. بت‌اویون و همکاران (Bat-Oyun *et al.*, 2011) کاهش ظرفیت فتوسنتزی تاج‌پوشش تحت تنش خشکی را دلیل کاهش کارایی مصرف نور دانستند. عزت احمدی و همکاران (Ezzat-Ahmadi *et al.*, 2012) نیز دریافتند که تنش خشکی سبب کاهش شاخص سطح برگ گندم و متعاقب آن کاهش قابل‌توجه کارآیی مصرف نور نسبت به حالت آبیاری مطلوب می‌شود.

تبارزاد و همکاران (Tabarzad *et al.*, 2016) مقدار کارآیی مصرف نور در گیاه جو را تحت شرایط ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۲/۱۲، ۱/۶۰ و ۱/۵۱ گرم بر مگاژول گزارش کردند. رزیگ و همکاران (Rezig *et al.*, 2015) نشان دادند که بیش‌ترین میزان کارآیی مصرف نور در گندم دوروم (۱/۳۲ تا ۱/۴۳ گرم بر مگاژول) تحت شرایط عدم تنش کم‌آبی و کم‌ترین میزان آن (۱/۱۷ تا ۱/۲۹ گرم بر مگاژول) در شرایط تنش خشکی به‌دست آمد. این محققان علت کاهش کارآیی مصرف نور تحت شرایط تنش خشکی را ناشی از کاهش جذب تشعشع فعال فتوسنتزی گزارش کردند.

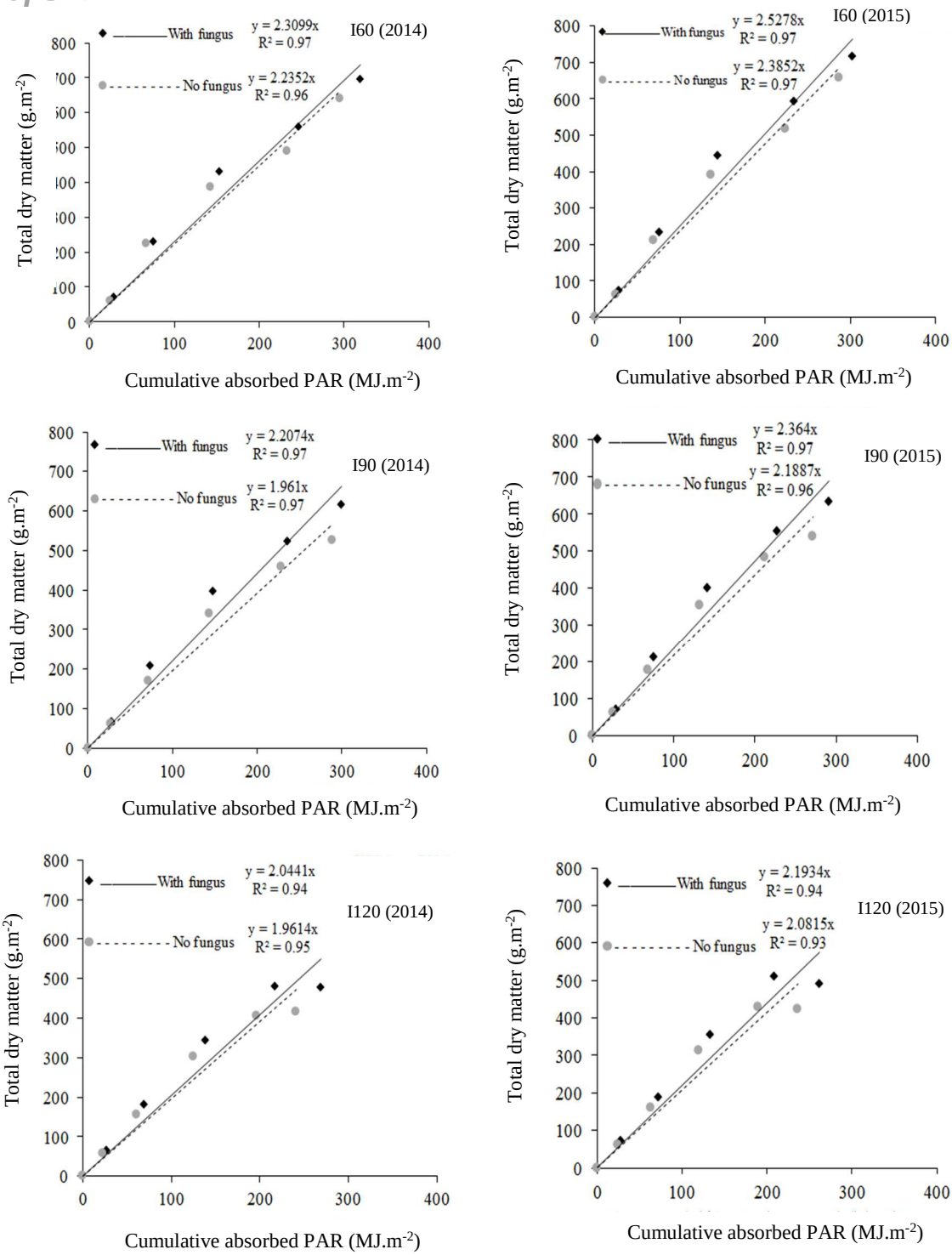
به‌نظر می‌رسد که قارچ *P. indica* با قابلیت افزایش دسترسی به عناصر غذایی به‌ویژه فسفر، باعث افزایش رشد رویشی و در نتیجه افزایش سطح برگ و توسعه بیش‌تر کانوپی می‌شود که موجب افزایش کارآیی گیاه در استفاده از انرژی نورانی و سنتز بیش‌تر مواد فتوسنتزی می‌شود. آروین و وفابخش (Arvin and Vafabakhsh, 2016) گزارش دادند که کاربرد باکتری سودوموناس فلورسنس (*Pseudomonas fluorescens*) باعث افزایش کارآیی مصرف نور در کلزا تحت شرایط بدون تنش و تنش کم‌آبی شد. کاربرد باکتری در شرایط تنش نسبت به عدم کاربرد آن از طریق ایجاد کلونی در اطراف ریشه و جذب رطوبت و تخفیف شرایط تنش، باعث افزایش کارآیی مصرف نور در کلزا شد (Arvin and Vafabakhsh, 2016).

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که عملکرد دانه ارزن تحت تأثیر آبیاری، قارچ و برهمکنش سه‌جانبه سال× آبیاری× قارچ قرار گرفت (جدول ۶). نتایج برش‌دهی برهمکنش سه‌جانبه سال× آبیاری× قارچ نشان داد که اثر آبیاری و قارچ *P. indica* بر عملکرد دانه ارزن در هر دو سال در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). تنش شدید کم‌آبی، عملکرد دانه ارزن را در سال اول و دوم به‌ترتیب ۵۷/۵۳ و ۴۶/۹۱ درصد کاهش داد و کاربرد قارچ *P. indica* تأثیر مثبت و معنی‌داری بر عملکرد دانه ارزن در همه سطوح آبیاری در هر دو سال داشت (شکل ۶). در سال اول، قارچ *P. indica* در شرایط عدم تنش، تنش متوسط و تنش شدید کم‌آبی، عملکرد دانه ارزن رابه‌ترتیب ۱۶/۳۴، ۳۹/۳۸ و ۳۵/۳۴ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد. این افزایش در سال دوم به‌ترتیب معادل ۱۹/۷۲، ۲۴/۷۴ و ۳۲/۵۰ درصد بود (شکل ۶). بیشتر بودن عملکرد دانه ارزن در سال دوم نسبت به سال اول، احتمالاً به‌دلیل شرایط آب و هوایی مناسبت‌تر سال دوم و تاریخ کاشت زودتر در سال دوم بوده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵- تأثیر قارچ *P. indica* بر کارآیی مصرف نور ارزن در رژیم‌های مختلف آبیاری طی سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴

Figure 5. Effect of *P. indica* fungus on radiation use efficiency of the millet under different irrigation regimes during 2014 and 2015

کاهش عملکرد دانه ارزن در شرایط تنش کم‌آبی به‌دلیل عدم گسترش و تداوم مناسب سطح برگ بود که موجب کاهش استفاده هر چه بیش‌تر از نور دریافتی و تولید ماده خشک و اختصاص آن به دانه شد. این نتایج مطابق با یافته‌های محققان دیگر در زمینه کاهش عملکرد دانه ارزن تحت تأثیر تنش کم‌آبی بود (Yadav and Bhatnagar, 2001; Saghatoleslami *et al.*, 2007). یادف و باتناگار (Yadav and Bhatnagar, 2001) با بررسی اثر تنش

www.SID.ir

Archive of SID

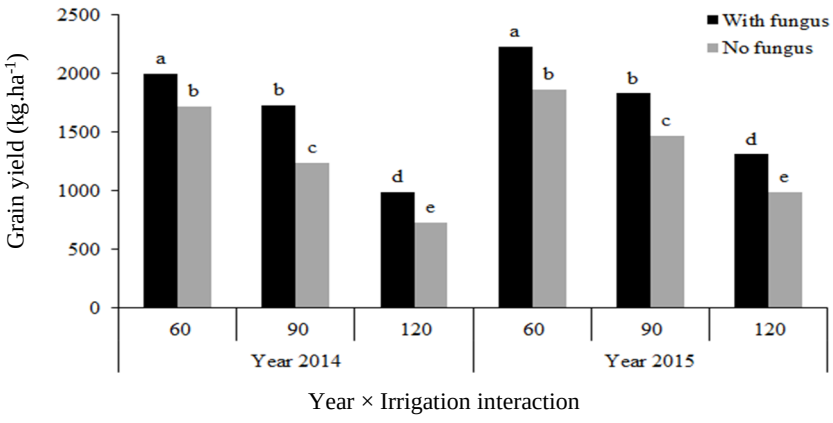
خشکی بر عملکرد ۳۰ رقم ارزن گزارش کردند که متوسط عملکرد دانه ارزن ۷۲ درصد نسبت به شرایط بدون تنش کاهش یافت. در شرایط تنش شدید کم‌آبی، شاخص سطح برگ کاهش پیدا کرد و در نتیجه موجب کاهش عملکرد دانه به کم‌تر از نصف میزان عملکرد نسبت به شرایط بدون تنش شد. شاخص سطح برگ بیش‌تر در گیاهان ارزن تلقیح شده با قارچ *P. indica* مقدار تشعشع جذب‌شده را افزایش داد که این خود مهم‌ترین علت افزایش عملکرد گیاه تحت شرایط تنش کم‌آبی بود. همزیستی قارچ *P. indica* با ریشه گیاه ممکن است از طریق افزایش جذب آب و عناصر غذایی، باعث افزایش فتوسنتز گیاه شود و از این طریق موجب بهبود رشد و عملکرد گیاه شده باشد. افزایش جذب فسفر و دیگر عناصر غذایی به‌وسیله هیف‌های قارچی، سازوکار اولیه تحریک و تسریع رشد گیاه به‌وسیله قارچ‌های شبه‌میکوریز می‌باشد (Oelmuller *et al.*, 2009). قارچ *P. indica* علاوه بر افزایش قابلیت جذب فسفات نامحلول خاک، از طریق ترشح هورمون‌ها و فاکتورهای تحریک‌کننده رشد گیاه نیز بر رشد و نمو گیاهان موثر است (Michal-Johnson *et al.*, 2013). در همین راستا، تأثیر مثبت قارچ *P. indica* در افزایش عملکرد گندم (Yaghoubian *et al.*, 2014) و جو (Ghabooli *et al.*, 2013) تحت تنش کم‌آبی نیز گزارش شده است.

جدول ۶- تجزیه واریانس مرکب اثر آبیاری و قارچ (*P. indica*) بر عملکرد دانه ارزن طی سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴

Table 6. Combined analysis of variance of the effect of irrigation and fungus (*P. indica*) on grain yield of the millet during 2014 and 2015

Source of variations	df	Mean squares of the grain yield
Year	1	409175^{ns}
Replication / Year	4	1761
Irrigation	2	2725260**
Year × Irrigation	2	13468^{ns}
Error a	8	1863
Fungus	1	1080778**
Irrigation × Fungus	2	142^{ns}
Year × Fungus	1	15058^{ns}
Year × Irrigation × Fungus	2	9982**
Error b	12	1021
CV (%)	-	2.84
Slicing Year × Irrigation × fungus interactions based on year		
First year	5	727787**
Second year	5	593906**

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



شکل ۶- تأثیر قارچ *P. indica* بر عملکرد دانه ارزن در رژیم‌های مختلف آبیاری طی سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴. ستون‌های دارای حروف مشابه تفاوت معنی‌داری ندارند (مقایسه میانگین‌ها در دو سال به‌صورت جداگانه انجام شده است).

Figure 6. Effect of *P. indica* on grain yield of millet under different irrigation regimes in 2014 and 2015. Means followed by the same letters have not significant difference (mean comparisons is separately done for each year).

www.SID.ir

Archive of SID

References

Acreche, M. M. and Slafer, G. A. 2009. Grain weight, radiation interception and use efficiency as affected by sink strength in Mediterranean wheat released from 1940 to 2005. **Field Crops Research** 110: 98-105.

Akmal, M. and Janssens, M. J. J. 2004. Productivity and light use efficiency of perennial ryegrass with contrasting water and nitrogen supplies. **Field Crops Research** 8: 143-155.

Ali, H., Tariq, S., Ahmad, S., Rashed, M. and Hussian, A. 2012. Growth and radiation use efficiency of wheat as affected by different irrigation levels and phosphorus application methods. **Journal of Animal and Plant Sciences** 22 (4): 1118-1125.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome.

Amiri, M. J. and Eslamian, S. S. 2010. Investigation of climate change in iran. **Journal of Environmental Science and Technology** 3 (4): 208-216.

Anjum, S. A., Xie, X., Wang, L., Saleem, M. F., Man, C. and Lei, W. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. **African Journal of Agriculture Research** 6 (9): 2026-2032.

Arvin, P. and Vafabakhsh, J. 2016. Study of drought and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on radiation use efficiency and dry matter partitioning into pod in different cultivars of oilseed rape (*Brassica napus* L.). **Iranian Journal of Agroecology** 8 (1): 134-152. (In Persian with English Abstract).

Bagheri, A. A., Saadatmand, S., Niknam, V., Nejadsatari, V. and Babaeizad, V. 2013. Effect of endophytic fungus, *Piriformospora indica*, on growth and activity of antioxidant enzymes of rice (*Oryza sativa* L.) under salinity stress. **International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research** 11: 1337-1350.

Bat-Oyun, T. M., Shinoda, M. and Tsubo, M. 2011. Effects of water and temperature stresses on radiation use efficiency in a semi-arid grassland. **Journal of Plant Interaction** 7: 214-224.

Doorenbos, J. and Kassam, A. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 33. FAO, Rome.

Earl, H. J. and Davis, R. F. 2003. Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation use efficiency and yield of maize. **Agronomy Journal** 95: 688-696.

Ezzat-Ahmadi, M., Noor-Mohammadi, G., Moghaddasi, M. and Kafi, M. 2012. Evaluation of radiation and water use efficiency in bread wheat genotypes in condition of different photosynthetic and moisture stress**. Iranian Journal of Field Crops Research** 10 (1): 225-239. (In Persian with English Abstract).

Garofalo, P. and Rinaldi, M. 2015. Leaf as exchange and radiation use efficiency of sunflower (*Helianthus annuus* L.) in response to different deficit irrigation strategies: From solar radiation to plant growth analysis. **European Journal of Agronomy** 64: 88-97.

Ghabooli, M., Khatabi, B., Ahmadi, S., Sepehri, M., Mirzaei, M., Amirkhani, A., Jorrin, J. V. and Salekdeh, G. H. 2013. Proteomics study reveals the molecular mechanisms underlying water stress tolerance induced by *Piriformospora indica* in barley. **Journal of Proteomics** 94: 289-301.

Ghosh, D. C. 2004. Growth and productivity of summer sesame (*Sesamum indicum*) as influenced by biofertilizer and growth-regulator. **Indian Journal of Agronomy** 45 (2): 389-394.

Goudriaan, J. and van Laar, H. H. 1994. Modelling potential crop growth processes. Kluwer Academic Press.

Hakan, O. 2002. Sowing date and nitrogen rate effects on growth, yield and yield components of two summer rapseed cultivars. **Agronomy Journal** 19: 453-463.

Han, H., Li, Z., Ning, T., Zhang, X., Shan, Y. and Bai, M. 2008. Radiation use efficiency and yield of winter wheat under deficit irrigation in North China. **Plant, Soil and Environment** 54: 313-319.

Hill, T. W. and Kafer, E. 2001. Improved protocols for *Aspergillus* minimal medium: Trace element and minimal medium salt stock solutions. **Fungal Genetics and Newsletter** 48: 20-21.

Hosseinpanahi, F., Koocheki, A., Nassiri-Mahallati, M. and Ghorbani, R. 2010. Evaluation of radiation absorption and use efficiency in potato/corn intercropping. **Iranian Journal of Agroecology** 2 (1): 45-54. (In Persian with English Abstract).

kamkar, B., Koocheki, A., Nasiri-Mahallati, M. and Rezvani-Moghaddam, P. 2004. Evaluation of radiation use efficiency and its relationship with dry matter accumulation in three millet species. **Iranian Journal of Field Crops Research** 2 (2): 196-208. (In Persian with English Abstract).

Kusaka, M., Lalusin, A. G. and Fujimura, T. 2005. The maintenance of growth and turgor in pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) Leeke) cultivars with different root structures and osmo-regulation under drought stress. **Plant Science** 168: 1-14.

Li, H. L., Luo, Y. and Ma, J. H. 2011. Radiation use efficiency and the harvest index of winter wheat at different nitrogen levels and their relationships to canopy spectral reflectance. **Crop Pasture Science** 62: 208-217.

www.SID.ir

Archive of SID

Michal-Johnson, J., Lee, Y. C., Camehl, I., Sun, C., Yeh, K. W. and Oelmuller, R. 2013. *Piriformospora indica* promotes growth of *Chinese cabbage* by manipulating auxin homeostasis-role of auxin in symbiosis. In: Varma, A. (Ed.). *Piriformospora indica*, soil biology. Springer-Verlag, Berlin. pp: 139-147.

Monteith, J. L. 1977. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology** 9: 747-766.

Ngugi, K., Collins, J. O. and Muchira, S. 2013. Combining, earliness, short anthesis to silking interval and yield based selection indices under intermittent water stress to select for drought tolerant maize. **Australian Journal of Crop Science** 7: 2014-2020.

Oelmuller, R., Sherameti, I., Tripathi, S. and Varma, A. 2009. *Piriformospora indica*, a cultivable root endophyte with multiple biotechnological applications. **Symbiosis** 49: 1-17.

Osborne, S. L., Scheppers, J. S., Francis, D. D. and Schlemmer, M. R. 2002. Use of spectral radiance to in-season biomass and grain yield in nitrogen and water-stressed corn. **Crop Science** 42: 165-171.

Qiang, X., Weiss, M., Kogel, K. H. and Schafer, P. 2012. *Piriformospora indica*a mutualistic basidiomycete with an exceptionally large plant host range. **Molecular Plant Pathology** 13 (5): 508-518.

Rahimi, S., Ghasemnezhad, A. and Babaeizad, V. 2014. A study on the effect of endophyte fungus, *Piriformospora indica*, on the yield and phytochemical changes of globe artichoke (*Cynara scolymus* L.) leaves under water stress. **International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research** 6 (2): 1907-1921.

Rezig, M., M'hamed, H. C. and Ben Naceur, M. 2015. Does deficit irrigation affect the relation between radiation interception and water consumption for durum wheat (*Triticum durum* Desf.). **Energy and Environment Research** 5 (2): 36-48.

Saghatoleslami, M., Magidi Haravan, E., Nourmohmmadi, G. and Darvish, F. 2007. Effect of drought stress in growth different stages on yield and water use efficiency of five millet genotypes in South Khorasan. **Science and Technology of Agriculture and Natural Resources** 11: 215-225. (In Persian with English Abstract).

Sarmadnia, G. H. and Koochaky, A. 1989. Crop plant physiology. Mashhad University Press. (In Persian).

Sobhani, A. and Shirani, A. H. 2000. The guide of determination crops leaf area index. Seed and Plant Improvement Institute, Karaj, Iran. (In Persian).

Tabarzad, A., Ghaemi, A. A. and Zand-Parsa, S. 2016. Extinction coefficients and radiation use efficiency of barley under different irrigation regimes and sowing dates. **Agricultural Water Management** 178: 126-136.

Tesfaye, K., Walkerb, S. and Tsubob, M. 2006. Radiation interception and radiation use efficiency of three grain legumes under water deficit conditions in a semi-arid environment. **European Journal of Agronomy** 25: 60-70.

Tripathi, S., Das, A., Chandra, A. and Varma, A. 2015. Development of carrier-based formulation of root endophyte *Piriformospora indica* and its evaluation on *Phaseolus vulgaris* L. **World Journal of Microbiology and Biotechnology** 31 (2): 337-344.

Tsubo, M., Walker, S. and Ogindo, H. O. 2005. A simulation model of cereal legume intercropping systems for semi-arid regions. I: Model development. **Field Crops Research** 93: 10-22.

Xu, L., Wang, A., Wei, Q. and Zhang, W. 2017. *Piriformospora indica* confers drought tolerance on *Zea mays* L. through enhancement of antioxidant activity and expression of drought-related genes. **The Crop Journal** 5 (3): 251-258.

Xu, Z. and Zhou, G. 2008. Responses of leaf stomatal density to water status and its relationship with photosynthesis in a grass. **Journal of Experimental Botany** 59: 3317-3325.

Yadav, O. P. and Bhatnagar, S. K. 2001. Evaluation of indices for identification of pearl millet cultivars adapted to stress and non-stress conditions. **Field Crops Research** 70: 201-208.

Yaghoubian, Y., Mohammadi Goltapeh, E., Pirdashti, H., Esfandiari, E., Feiziasl, V., Kari Dolatabadi, H., Varma, A. and Hassim, M. H. 2014. Effect of *Glomusmosseae* and *Piriformospora indica* on growth and antioxidant defense responses of wheat plants under drought stress. **Agricultural Research** 3 (3): 239-245.

Zakirullah, Z., Swati, Z. A., Ahmad, A. and Raziuddin, R. 2000. Morpho-physiological response of selected brassica lines to moisture stress. **Pakistan Journal of Biological Science** 3 (1): 130-132.

Zare Abyaneh, H., Bayat Varkeshi, M., Gasemi, A., Marofi, S. and Amiri Chayjan, R. 2011. Determination of water requirement, single and dual crop coefficient of garlic (*Allium sativum*) in the cold semi-arid climate. **Australian Journal of Crop Science** 5 (8): 1050-1054.

www.SID.ir

Archive of SID
doi: 10.22124/c.2018.8272.1324

University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research
Vol. 8, No. 2, Summer 2018 (261-276)

Effect of fungus *Piriformospora indica* on the grain yield, absorption and radiation use efficiency of millet under different irrigation regimes

Goudarz Ahmadvand[1*] and Somayeh Hajinia[2]

Received: October 14, 2017 Accepted: April 29, 2018

Abstract

To investigate the effect of *Piriformospora indica* fungus on absorption and radiation use efficiency of millet under water stress, an experiment was carried out as a split plot in randomized complete block design with three replications in research field of Faculty of Agriculture, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran, during 2014 and 2015. The main factor was irrigation in three levels (irrigation after 60, 90 and 120 mm evaporation from pan class A) and sub factor was in two levels of fungus *P. indica* (inoculated and non-inoculated). In the both years, water stress decreased leaf area and dry matter accumulation of millet. Inoculation with fungus, increased leaf area and dry matter of millet plants in different irrigation levels. The highest radiation use efficiency (2.31 and 2.53 g.MJ^{-1} in 1st and 2nd years, respectively) was obtained in inoculated millet plants under well-watered, and the lowest (1.96 and 2.08 g.MJ^{-1} in 1st and 2nd years, respectively) was observed in non-inoculated plants under severe water stress. Severe water stress significantly decreased grain yield of millet in both 1st and 2nd years about 57.53 and 46.91 percent, respectively. Under severe water stress, inoculating increased grain yield by 35.34 and 32.50 percent in 1st and 2nd years, respectively, compared to control (non-inoculated). The results showed *P. indica* fungus, had a positive effect on absorption and radiation use efficiency of millet in different irrigation levels, so that the application of fungus mitigated the effects of water stress and improved the yield of millet under water stress.

Keywords: Absorption radiation, Dry matter accumulation, Endophytic fungus, Grain yield, Water stress

1. Assoc. Prof., Dept. of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran
2. Ph. D. Graduated, Dept. of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran
[*] Corresponding author: gahmadvand@basu.ac.ir

www.SID.ir