نشریه بوم شناسی کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۱، بهار ۱۳۹۸، ص. ۲۱۵-۱۹۹

Journal of Agroecology
Vol. 11, No.1, Spring 2019, p. 199-215

تأثیر تلقیح با قارچ *Piriformospora indica* بر عملکرد دانه، جذب و کارآیی مصرف نور سویا (*Glycine max* (L.) Merr.) تحت شرایط تنش کم‌آبی

گودرز احمدوند[1]* و سمیه حاجی‌نیا[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۷

احمدوند، گ.، و حاجی نیا، س. ۱۳۹۸. تأثیر تلقیح با قارچ *Piriformospora indica* بر عملکرد دانه، جذب و کارآیی مصرف نور سویا (*Glycine max* (L.) Merr.) تحت شرایط تنش کم‌آبی. بوم‌شناسی کشاورزی، ۱۱(۱): ۲۱۵-۱۹۹.

چکیده

به‌منظور بررسی تأثیر تلقیح با قارچ *Piriformospora indica* بر جذب و کارآیی مصرف نور سویا (*Glycine max* (L.) Merr.) تحت شرایط تنش کم‌آبی، آزمایشی به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا در دو سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ اجرا شد. عامل اصلی آبیاری در سه سطح (آبیاری پس از ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر آب از تشت تبخیر) و عامل فرعی کاربرد قارچ *P. indica* در دو سطح (تلقیح و عدم تلقیح با قارچ) بود. صفات مورد بررسی شامل شاخص سطح برگ، ماده خشک، جذب تشعشع، کارآیی مصرف نور و عملکرد دانه بود. در هر دو سال زراعی 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 مقدار کارآیی مصرف نور (۱/۷۵ و ۱/۸۵ گرم بر مگاژول به‌ترتیب در سال اول و دوم) در گیاهان تلقیح‌شده با قارچ تحت شرایط عدم تنش کم‌آبی و کمترین مقدار آن (۱/۱۰ و ۱/۱۵ گرم بر مگاژول به‌ترتیب در سال اول و دوم) در گیاهان تلقیح نشده تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی به‌دست آمد. تنش شدید کم‌آبی، عملکرد دانه سویا را به‌میزان ۵۷/۲۰ درصد کاهش داد. قارچ *P. indica*، در شرایط عدم تنش، تنش متوسط و تنش شدید کم‌آبی، عملکرد دانه سویا را به‌ترتیب ۱۳/۶۷، ۲۲/۸۵ و ۲۲/۱۴ درصد در مقایسه با عدم تلقیح، افزایش داد. نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت قارچ *P. indica* در سطوح مختلف آبیاری بر شاخص سطح برگ، ماده خشک، جذب و کارآیی مصرف نور سویا بود، به‌طوری‌که کاربرد قارچ منجر به کاهش اثرات تنش و بهبود عملکرد سویا تحت شرایط تنش کم‌آبی گردید.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، تشعشع فعال فتوسنتزی، قارچ درون‌زی، کارآیی مصرف تابش

مقدمه

سویا (*Glycine max* (L.) Merr.) از مهم‌ترین دانه‌های روغنی در جهان و ایران محسوب می‌شود و با دارا بودن ۲۵-۱۸ درصد روغن و ۵۰-۳۰ درصد پروتئین، یکی از منابع عمده تولید روغن و پروتئین گیاهی است و اهمیت ویژه‌ای در تغذیه انسان، دام و طیور دارد (Khajehpour, 2007). تنش کم‌آبی یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده رشد سویا می‌باشد، به‌طوری که برآورد شده است تنش خشکی باعث کاهش ۲۴ تا ۵۰ درصدی عملکرد دانه سویا شده است (Sadeghipour & Abbasi, 2012).

تنش‌های محیطی از راه ایجاد محدودیت در تأمین مواد فتوسنتزی لازم، سبب کاهش رشد اندام‌های هوایی و عملکرد می‌شوند. یکی از بارزترین اثرات کاهش رشد گیاه، کاهش سطح برگ است. ابوطالبیان و همکاران (Aboutalebian et al., 2016) گزارش کردند با افزایش شدت تنش خشکی، حداکثر شاخص سطح برگ کاهش یافت به‌طوری که در تنش‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر در مقایسه با عدم تنش (۵۰ میلی‌متر تبخیر) شاخص سطح برگ به‌ترتیب ۳ و ۳۶ درصد کاهش یافت. گزارش شده است تنش کم‌آبی، میزان شاخص سطح برگ، جذب نور خورشید و ماده خشک در سویا را کاهش داد (Adeboye et al., 2016). از آن‌جا که برگ‌ها اندام اصلی فتوسنتز کننده در گیاه می‌باشند، لذا کاهش شاخص سطح برگ

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار و دانش آموخته دکتری زراعت- فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان
(*- نویسنده مسئول: Email: gahmadvand@basu.ac.ir)
DOI:10.22067/jag.v11i1.66827

در اثر تنش، سبب عدم ایجاد منبع فیزیولوژیکی کافی جهت استفاده از نور دریافتی و تأمین اسیمیلات‌های لازم برای پر کردن دانه و در نتیجه کاهش عملکرد می‌گردد (Sarmadnia & Koocheki, 1989). بنابراین از دیرباز، یکی از شیوه‌های ارزیابی کارکرد گیاهان، اندازه‌گیری مقدار نور دریافتی توسط گیاه و محاسبه کارآیی تبدیل آن به ماده خشک است تا جایی که از راه پایش الگوی دریافت تشعشع توسط تاج‌پوشش طی دوره رشد، می‌توان کاهش عملکرد ناشی از وقوع تنش‌های محیطی را تبیین کرد (Pazoki & Kariminejad, 2010).

تمام شواهد نشان می‌دهد که هر چه جذب نور در جامعهٔ گیاهی بیشتر باشد، عملکرد نیز بیشتر خواهد بود. عزت‌احمدی و همکاران (Ezzat Ahmadi et al., 2012) دریافتند که تنش خشکی سبب کاهش شاخص سطح برگ گندم (*Triticum aestivum* L.) و متعاقب آن کاهش قابل‌توجه کارآیی مصرف نور نسبت به حالت آبیاری مطلوب گردید. کاهش کارآیی مصرف نور در شرایط تنش خشکی نیز در سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) گزارش شده است (Garofalo & Rinaldi, 2015). از جمله دلایل کاهش کارآیی مصرف نور در گیاهان تحت شرایط تنش کم‌آبی، کاهش جذب تشعشع فعال فتوسنتزی گزارش شده است (Garofalo & Rinaldi, 2015). دیمیرتاس و همکاران (Demirtas et al., 2010) با بررسی تأثیر تنش خشکی بر عملکرد و کیفیت سویا، نشان دادند که تنش خشکی در طول مراحل رشد رویشی، عملکرد دانه را تحت تأثیر قرار نداد، در حالی‌که اعمال یک یا چند تنش خشکی در طی پر شدن دانه، به کاهش قابل‌توجه عملکرد دانه منجر گردید.

یکی از راه‌های افزایش تحمل به تنش کم‌آبی و افزایش عملکرد در گیاهان زراعی، کاربرد قارچ‌های همزیست است. قارچ *Piriformospora indica* دارای رابطه همزیستی با ریشه اغلب گیاهان زراعی بوده و از طریق افزایش جذب عناصر غذایی مانند فسفر و برخی عناصر کم‌مصرف، باعث افزایش رشد و عملکرد گیاهان می‌شود (Oelmuller et al., 2009). همچنین پتانسیل زیادی در افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی مانند خشکی دارد (Ghabooli et al., 2013; Xu et al., 2017). تلقیح ریشه گیاه ذرت (*Zea mays* L.) با قارچ *P. indica* در شرایط تنش خشکی سبب افزایش ماده خشک و کاهش اثرات تنش خشکی در گیاه ذرت شد (Xu et al., 2017). همچنین نامبردگان مشاهده نمودند غلظت پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان تیمار شده با قارچ، نسبت به گیاهان شاهد، افزایش یافت. در پژوهشی دیگر نشان داده شده است که تلقیح ریشه گیاه جو (*Hordum vulgare* L.) با قارچ *P. indica* در شرایط تنش خشکی، سبب افزایش وزن خشک اندام‌های هوایی و ریشه جو به‌ترتیب به میزان ۳۹ و ۴۶ درصد نسبت به گیاهان تلقیح نشده گردید (Ghabooli et al., 2011). سایر تحقیقات نیز نشان دادند که تحت شرایط تنش خشکی می‌توان از قارچ *P. indica* در جهت افزایش رشد و عملکرد گیاه گندم استفاده نمود (Yaghoubian et al., 2014). ابوطالبیان و خلیلی (Aboutalebian & Kahlili, 2014) گزارش کردند کاربرد کود زیستی میکوریزا و کاربرد توأم آن با *برادی‌رایزوبیوم* (*Bradyrhizobium japonicum*) تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی، به‌ترتیب عملکرد دانه سویا را ۷۰ و ۹۳ درصد نسبت به شاهد (عدم مصرف کود) افزایش داد.

با توجه به اهمیت به‌کارگیری روش‌های مناسب برای کاهش اثرات سوء تنش کم‌آبی، هدف از اجرای این تحقیق، بررسی تأثیر تلقیح با قارچ *P. indica* بر جذب و کارآیی مصرف نور، شاخص سطح برگ و عملکرد دانه سویا در سطوح مختلف آبیاری بود.

مواد و روش‌ها

آزمایش در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا 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 گردید. این منطقه از نظر اقلیمی بر اساس اقلیم‌نمای دومارتن جزء مناطق نیمه‌خشک و سرد، با میانگین بارندگی سالیانهٔ ۳۳۰ میلی‌لیتر است (Zare-Abyaneh et al., 2010).

مجموع بارندگی سال اول و دوم در طول دوره رشد، به‌ترتیب ۹/۷ و ۱۹/۱ میلی‌متر بود (جدول ۱). میانگین دمای محیط در طول دوره رشد، در سال اول آزمایش ۲۴/۱ درجه و در سال دوم ۲۴/۶ درجه سانتی‌گراد بود (جدول ۱).

میزان تبخیر روزانه از تشتک تبخیر کلاس A در طول دوره رشد سویا 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).

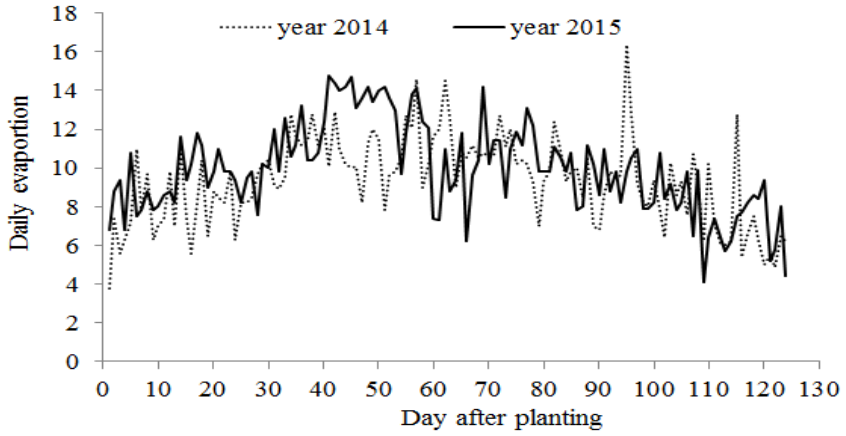
بافت خاک محل آزمایش لومی و سال قبل از اجرای آزمایش به‌صورت آیش بود. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است.

آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. کرت‌های اصلی شامل رژیم‌های آبیاری در سه سطح (آبیاری پس از ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی آب از تشت تبخیر کلاس A که به‌ترتیب به‌عنوان عدم تنش، تنش متوسط و تنش شدید کم‌آبی در نظر گرفته شدند) و قارچ *P. indica* در دو سطح (تلقیح و عدم تلقیح با قارچ) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند.

جدول ۱- دمای حداقل، دمای حداکثر، دمای متوسط و میزان بارندگی در طول دوره رشد سویا در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹٤

Table 1- Maximum (T max), minimum (T min), and average temperature (T mean) and rainfall during growing season of soybean at 2014 and 2015 years

روز پس از کاشت Day after planting	2014				2015			
	دمای حداقل T min (◦C)	دمای حداکثر T max (◦C)	متوسط دما T mean (◦C)	بارندگی Rainfall (mm)	دمای حداقل T min (◦C)	دمای حداکثر T max (◦C)	متوسط دما T mean (◦C)	بارندگی 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
110-120	12.2	31.2	22.2	0.0	12.3	28.7	20.5	0.0



شکل ۱- میزان تبخیر روزانه (میلی‌متر) در طول دوره رشد سویا در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹٤

Fig. 1- Daily evaporation (mm) during growing season of soybean at 2014 and 2015 years

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش (عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک)

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

سال Year	بافت Texture	هدایت الکتریکی EC (dS. m^{-1})	اسیدیته pH	ماده آلی Organic Matter (%)	فسفر قابل جذب Available P (ppm)	پتاسیم قابل جذب Available K (ppm)	نیتروژن کل Total N (%)
2014	لومی Loam	0.38	7.50	1.10	20.00	456.00	0.08
2015	لومی Loam	0.18	8.00	1.00	11.00	326.00	0.02

جدایه قارچ *P.indica* در ارلن‌های حاوی ۵۰۰ میلی‌لیتر محیط کشت مایع اختصاصی (Hill & Kafer, 2001)، کشت و بر روی شیکر با دور 100 rpm قرار گرفت و پس از ۲۰ روز اقدام به جمع‌آوری میسلیوم‌ها شد. در نهایت ۱۰ گرم از اندام‌های قارچی (میسلیوم‌ها و اسپور) با ۱۰۰ گرم ماسه بادی استریل مخلوط و به عنوان مایه تلقیح استفاده شد (Tripathi et al., 2013). تکثیر قارچ در آزمایشگاه‌های گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا صورت گرفت. جهت اعمال تیمار قارچ، بذرها با مایه تلقیح (به میزان ۱۰۰ گرم مایه تلقیح به ازای هر کیلوگرم بذر) آغشته و بلافاصله اقدام به کشت گردید (Tripathi et al., 2013).

بذر مورد استفاده سویا رقم M_9 از مرکز تحقیقات دانه‌های روغنی الشتر (لرستان) تهیه شد. رقم سویا جزء ارقام رشد نامحدود از گروه رسیدگی سه با دورهٔ رشدی ۱۲۰ روز و مقاوم به ورس می‌باشد. عملیات کاشت سویا در سال اول و دوم به‌ترتیب در دهم و اول خرداد ماه در کرت‌هایی شش ردیفه با طول چهار متر و فاصله بین ردیف ۵۰ سانتی‌متر انجام شد. فاصله نهایی بوته‌ها روی خطوط کاشت، پنج سانتی‌متر بود. کاشت بذر با تراکم دو برابر انجام و برای دست‌یابی به تراکم مطلوب ۴۰ بوته در مترمربع، گیاهان در مرحله چهار تا شش برگی تنک شدند.

اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت بذور انجام گرفت. گیاهان تا مرحله سه برگی به طور منظم و یکنواخت آبیاری شدند. بعد از این مرحله اعمال تیمارهای آبیاری بر اساس تبخیر از تشت تبخیر کلاس A صورت گرفت. میزان تبخیر با نصب تشت تبخیر کلاس A در مزرعه به‌طور روزانه اندازه‌گیری شد و آبیاری هر تیمار، پس از رسیدن میزان تبخیر تجمعی به مقدار مورد نظر، انجام شد. آبیاری به صورت جوی و پشته‌ای و با لوله‌های پلی‌اتیلنی انجام و مقدار آب مصرفی در هر بار آبیاری با استفاده از کنتور، کنترل گردید. نیاز آبی هر گیاه، با تعیین تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش فائو پنمن مونتیث و ضرایب گیاهی در منطقه مورد آزمایش از معادله‌های یک و دو تعیین گردید (Allen et al., 1998). برای تعیین تبخیر و تعرق مرجع از داده‌های تبخیر از تشت تبخیر کلاس A و ضرایب تشت استفاده شد (Allen et al., 1998).

معادله (۱) $ET_0= K_p\times E_{pan}$

در این معادله E_{pan}، K_p و ET_0: به ترتیب تبخیر از تشت، ضریب تشت و تبخیر و تعرق مرجع است. در این تحقیق ضریب تشت محاسبه شده از روش پیشنهاد شده آلن و همکاران (Allen et al., 1998)، با توجه به موقعیت و محل استقرار آن به طور میانگین ۰/۶۵ منظور شد.

معادله (۲) $ET_{crop}= K_c\times ET_0$

در این معادله ET_{crop}: تبخیر و تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر در روز)، K_c: ضریب گیاهی (بدون واحد) است (Allen et al., 1998). برای تعیین ضرایب گیاهی سویا در مراحل مختلف نمو از دستورالعمل فائو استفاده گردید (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 گردید (Doorenbos & Kassam, 1979). میزان آب مصرفی در طول دوره رشد در جدول ۳ بیان شده است.

جدول ۳- مقدار آب مصرف شده (مترمکعب در هکتار) در طول دوره رشد سویا

Table 3- The amount of water used ($m^3 .ha^{-1}$) in soybean growing season

آبیاری Irrigation (mm evaporation from pan class A)	2014	2015
60	6840	7106
90	5220	5440
120	4140	4284

در ابتدای فصل، هر کرت به دو قسمت تقسیم شد که در یک قسمت نمونه‌گیری‌های تخریبی و قسمت دیگر به برآورد عملکرد اختصاص یافت. به منظور تعیین وزن خشک کل و سطح برگ، از ۳۰ روز پس از کاشت، نمونه‌برداری تخریبی آغاز شد و هر ۱۵ روز یک بار تا انتهای دوره رشد، ادامه یافت. بدین منظوردر هر بار نمونه‌برداری، سه بوته به‌طور کاملاً تصادفی و با در نظر گرفتن اثر حاشیه از هر یک از کرت‌ها برداشت شد و به آزمایشگاه منتقل گردید. جهت تعیین شاخص سطح برگ از دستگاه سطح برگ سنج استفاده شد. همچنین جهت تعیین وزن خشک کل سویا نیز ابتدا نمونه‌ها در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک و سپس توسط ترازو توزین گردیدند. به منظور بیان تغییرات شاخص سطح برگ سویا نسبت به روزهای بعد از کاشت، از معادله لجستیک- پیک (معادله ۳) استفاده گردید (Hosseinpanahi et al., 2010).

معادله

$$Y= a+b\times4\times(\exp(-(x-c)/d))/(1+\exp(-(x-c)/d))^{\wedge2} \quad (۳)$$

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

جهت ارزیابی تغییرات ماده خشک سویا در زمان، معادله سیگموئیدی (معادله ۴) بهترین برازش را به داده‌های به‌دست آمده داشت (Hosseinpanahi et al., 2010).

$$TDM= a /(1+ b \times exp(-c \times x)) \quad (۴)$$ معادله

در این معادله TDM: تجمع ماده خشک برحسب گرم در مترمربع، a: حداکثر تجمع ماده خشک، b: ثابت معادله، c: سرعت رشد نسبی و x: زمان بر حسب روز پس از کاشت است.

جهت محاسبه میزان جذب و کارآیی مصرف تابش، ابتدا میزان تشعشع روزانه خورشیدی برای عرض جغرافیایی همدان به روش ارائه شده توسط خودریان و فن‌لار (Goudriaan & Van Laar, 1994) محاسبه گردید. سپس این مقادیر بر اساس تعداد ساعات آفتابی گرفته شده در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ از ایستگاه هواشناسی مرکز همدان، اصلاح و نور جذب شده روزانه برای سویا بر اساس معادله ۵ محاسبه شد (Tsubo et al., 2005). سپس تشعشع جذب شده از حاصل‌ضرب نور ورودی شبیه‌سازی شده در درصد نور جذب شده به‌دست آمد. مقدار کل تشعشع جذب شده به صورت تجمعی از طریق حاصل ضرب نور ورودی شبیه‌سازی شده در انتگرال کسر تشعشع فعال فتوسنتزی جذب شده نسبت به زمان، محاسبه گردید.

$$I_{abs}= I_0 \times (1-p) \times (1- exp(-k \times LAI) \quad (۵)$$ معادله

I0: مقدار تشعشع رسیده به بالای تاج پوشش سویا (مگاژول بر مترمربع)، I_{abs}: مقدار تشعشع جذب شده توسط تاج پوشش سویا (مگاژول بر مترمربع)، p: ضریب انعکاس (۰/۰۵)، K: ضریب خاموشی نور در سویا (۰/۵۰) و LAI: شاخص سطح برگ سویا است (Muchow, 1985). کارآیی مصرف نور بر حسب گرم بر مگا ژول، از طریق محاسبه شیب خط رگرسیونی بین ماده خشک (گرم در متر مربع) و میزان تشعشع جذب شده بصورت تجمعی (مگاژول بر متر مربع) محاسبه گردید (Tsubo et al., 2005). برای تعیین عملکرد دانه گیاه سویا، در هر دو سال زراعی در تاریخ ۱۰ مهر با لحاظ حاشیه، سطحی معادل دو مترمربع، برداشت شد.

قبل از تجزیه واریانس داده‌ها، ابتدا یکنواختی واریانس خطاهای آزمایشی با استفاده از آزمون بارتلت بررسی گردید. تجزیه واریانس مرکب داده‌ها بر اساس مدل تصادفی بودن سال و با فرض ثابت بودن فاکتورهای آبیاری و قارچ بر روی صفات انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت. تجزیه آماری داده‌ها با نرم‌افزارهای SAS var 9.1 و MSTAT انجام شد و برای برازش منحنی‌ها و رسم نمودارها از نرم‌افزارهای Slide Write و Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

شاخص سطح برگ

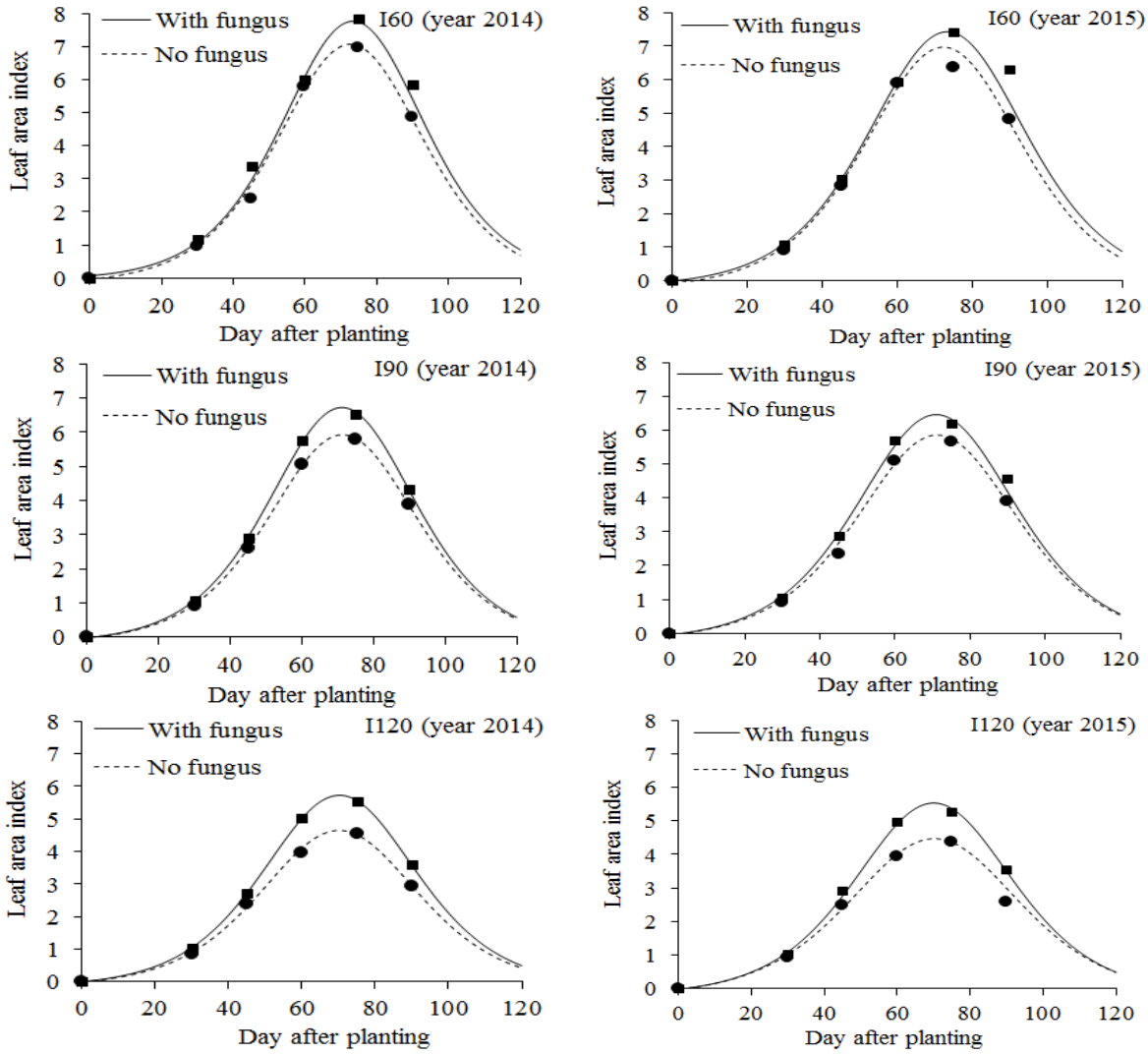
نتایج این آزمایش حاکی از روند مشابه تغییرات شاخص سطح برگ سویا در طول فصل رشد صرف‌نظر از نوع تیمار در هر دو سال زراعی بود (شکل ۲). به‌طوری‌که در ابتدای فصل رشد با گذشت زمان، شاخص سطح برگ به کندی افزایش یافت و در ادامه افزایش شاخص سطح برگ روند خطی پیدا کرد تا این‌که در حدود ۷۵–۷۰ روز پس از کاشت به حداکثر مقدار خود رسید و در اواخر فصل رشد به‌دلیل پیری و ریزش برگ‌های پایین تاج‌پوشش، روند نزولی در پیش گرفت (شکل ۲).

نتایج نشان داد تنش کم‌آبی باعث کاهش حداکثر شاخص سطح برگ سویا شد، چنین روندی در هر دو سال زراعی به‌خوبی مشهود بود. کاربرد قارچ *P. indica* موجب کاهش اثرات نامطلوب تنش کم‌آبی و مانع از کاهش شدید سطح برگ سویا تحت شرایط تنش کم‌آبی شد. در سال اول، گیاهان سویا تلقیح شده با قارچ *P. indica* تحت شرایط عدم تنش کم‌آبی، حداکثر شاخص سطح برگ معادل ۷/۷۵ را به خود اختصاص دادند. کمترین میزان این صفت (۴/۵۱) نیز در گیاهان تلقیح نشده تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی به‌دست آمد (شکل ۲). در سال دوم، بیشترین و کمترین شاخص سطح برگ سویا به‌ترتیب در گیاهان سویا تلقیح شده با قارچ *P. indica* در شرایط عدم تنش کم‌آبی (۷/۴۳) و گیاهان تلقیح نشده در شرایط تنش شدید کم‌آبی (۴/۳۸) به‌دست آمد (شکل ۲).

رشد برگ اولین فرآیندی است که به تنش کم‌آبی واکنش نشان داده و کاهش می‌یابد. تنش کم‌آبی در طول دوره رشد رویشی منجر به کوچک شدن، تسریع در زردی و پیر شدن برگ‌ها گردیده و شاخص سطح برگ و میزان جذب نور توسط گیاه را کاهش می‌دهد. این نتایج مطابق با یافته‌های بسیاری از محققان در زمینه کاهش شاخص سطح برگ سویا تحت تأثیر تنش کم‌آبی بود (Adeboye et al., 2016; Aboutalebian et al., 2016). کاهش محتوای نسبی آب برگ، کاهش پتانسیل فشاری سلول‌های برگ و افزایش میزان اسید آبسزیک، باعث توقف رشد برگ و کاهش تقسیم سلولی شده و تأمین نشدن اسیمیلات مورد نیاز برای رشد برگ و کاهش فتوسنتز از مهم‌ترین علل احتمالی کاهش شاخص سطح برگ بر اثر تنش خشکی ذکر شده است (Anjum et al., 2011).

افزایش شاخص سطح برگ با کاربرد قارچ به‌خصوص در شرایط تنش کم‌آبی احتمالاً می‌تواند به علت بهبود جذب عناصر غذایی به‌ویژه عنصر فسفر در خاک باشد که باعث افزایش تعداد و سطح برگ گیاه شده است (Oelmuller et al., 2009). در پژوهشی روی ذرت تحت شرایط تنش کم‌آبی مشاهده شد. همزیستی با قارچ *P. indica* باعث افزایش سطح برگ و تحمل گیاه ذرت به خشکی شده است (Xu et al., 2017). افزایش سطح برگ در واقع به افزایش بازده فتوسنتزی برگ و سرانجام، افزایش ماده خشک منجر می‌شود.

در بیشتر آزمایشات صورت گرفته در رابطه با همزیستی قارچ‌های میکوریز، عنوان شده که کاربرد این قارچ‌ها و ریزجانداران، باعث بهبود شاخص سطح برگ شده است (Ghabooli et al., 2011; Aboutalebian et al., 2016). در حقیقت، قارچ *P. indica* علاوه بر فراهم کردن عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، از طریق تولید هورمون‌های محرک رشد، می‌تواند اثرات مثبتی را در گیاه ایجاد نماید (Michal Johnson et al., 2013). افزایش شاخص سطح برگ در گیاهان تلقیح شده با قارچ *P. indica* به‌ویژه در شرایط تنش شدید کم‌آبی، بیانگر سودمندی اثرات قارچ *P. indica* در بهبود جذب آب، عناصر غذایی، فتوسنتز و در نهایت سطح برگ گیاه بود.



شکل ۲- تأثیر قارچ *Piriformospora indica* بر شاخص سطح برگ سویا در رژیم‌های مختلف آبیاری طی دو سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹٤

Fig. 2- Effect of fungus *Piriformospora indica* on leaf area index of soybean under different irrigation regimes in both years (2014 and 2015)

جدول ٤- پارامترهای مدل غیر خطی برازش داده شده تیمارهای رژیم آبیاری و قارچ بر روند شاخص سطح برگ سویا

Table 4- Effect of non linear model parameters fitted to irrigation regimes and fungus on leaf area index of soybean

آبیاری Irrigation (mm evaporation from pan class A)	قارچ Fungus	2014					2015				
		a	b	c	d	R^2	a	b	c	d	R^2
60	با قارچ With fungus	-0.09	7.84	73.5	13.56	0.99	-0.17	7.61	73.4	14.16	0.99
	بدون قارچ No fungus	-0.16	7.27	72.6	13.58	0.95	-0.24	7.22	72.3	14.02	0.99
90	با قارچ With fungus	-0.18	6.89	71.0	13.74	0.99	-0.23	6.70	71.1	14.28	0.96
	بدون قارچ No fungus	-0.16	6.07	71. 6	14.00	0.99	-0.22	6.09	71.2	14.31	0.99
120	با قارچ With fungus	-0.15	5.89	70.4	14.04	0.96	-0.19	5.75	69.9	14.34	0.98
	بدون قارچ No fungus	-0.16	4.81	70.1	14.49	0.98	-0.24	4.71	70.2	15.66	0.99

a: عرض از مبداء، b: زمان رسیدن به حداکثر شاخص سطح برگ، c: حداکثر شاخص سطح برگ و d: نقطه عطف منحنی که در آن رشد سطح برگ وارد مرحله خطی می‌شود

a: Intercept, b: Time to reach the maximum leaf area index, c: Maximum leaf area index and d: The curve turning point (when leaf area index inters the linear phase).

ماده خشک

در هر دو سال زراعی، تجمع ماده خشک (صفر تا ۱۲۰ روز پس از کاشت) در طول زمان از یک رابطه سیگموئیدی تبعیت کرد. در ابتدای دوره رشد، تجمع ماده خشک درهمه تیمارها پایین بود و اختلاف چندانی بین تیمارهای آبیاری و قارچ دیده نشد. با بزرگ شدن گیاه، رشد اندام‌های هوایی و سطح فتوسنتز کننده افزایش یافته و سرعت تجمع ماده خشک بیشتر شد، به‌طوری که در تیمار عدم تنش کم‌آبی به‌علت فراهم بودن آب قابل استفاده در مقایسه با سایر تیمارها ماده خشک بیشتری در واحد سطح تولید گردیده و این اختلاف با افزایش رشد گیاه زیادتر شده است. در حدود ۱۰۰ روز پس از کاشت، تجمع ماده خشک به بیشترین مقدار خود رسید و از آن پس روند تقریباً ثابتی را دنبال کرد (شکل ۳).

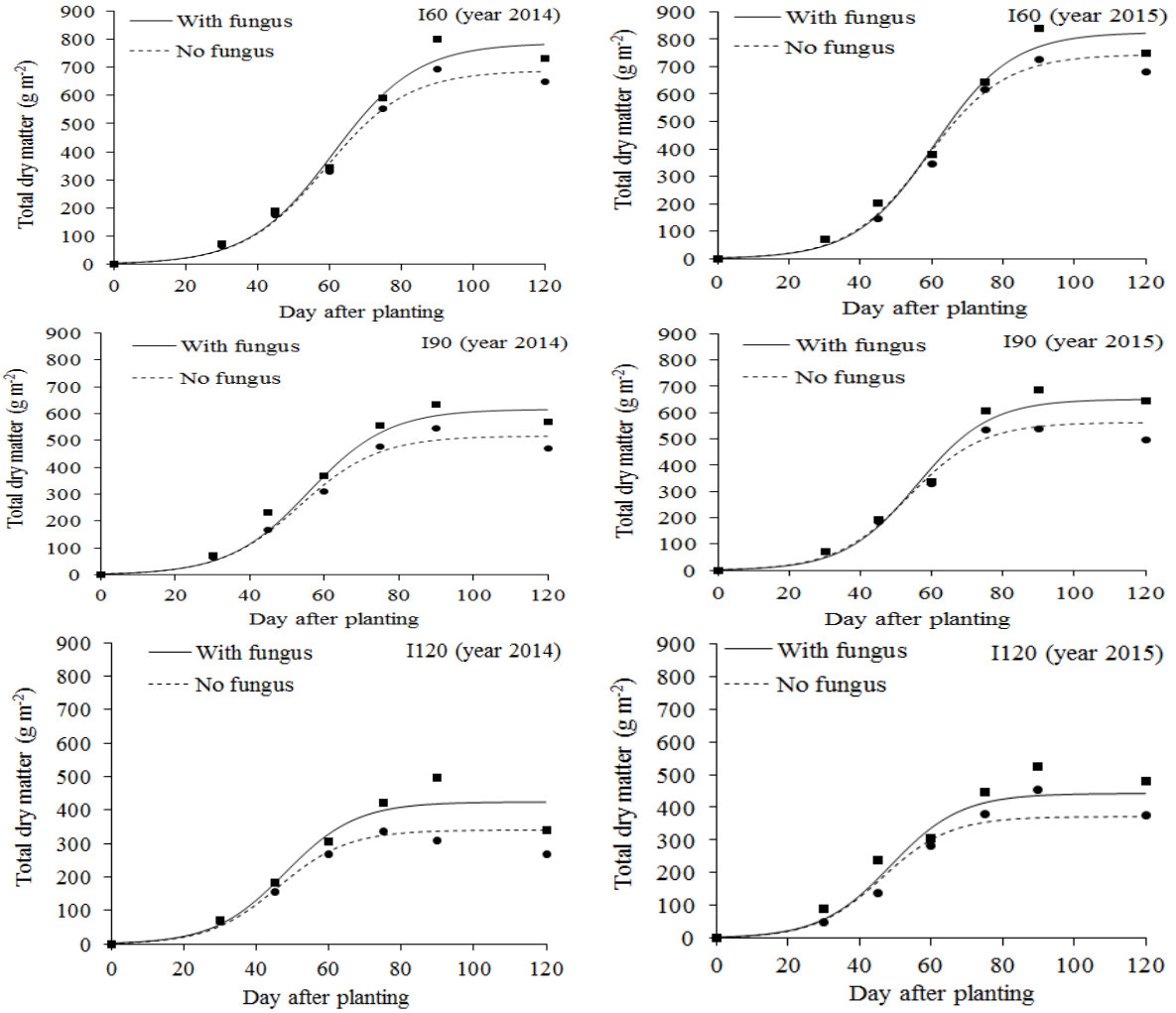
نتایج نشان داد که حداکثر تجمع ماده خشک سویا در هر دو سال زراعی تحت تأثیر تیمارهای تنش کم‌آبی و کاربرد قارچ *P. indica* قرار گرفت. تحت شرایط عدم تنش کم‌آبی، بیشترین تجمع ماده خشک در سال اول (۷۹۸ گرم بر متر مربع) و در سال دوم (۸۶۹ گرم بر متر مربع) با کاربرد قارچ *P. indica* به‌دست آمد که به‌ترتیب ۱۵/۰۲ و ۱۱/۹۸ درصد بیشتر از تیمار بدون قارچ بود. تحت شرایط تنش متوسط کم‌آبی، بیشترین تجمع ماده خشک در سال اول (۶۳۳ گرم بر متر مربع) و در سال دوم (۶۸۶ گرم بر متر مربع) مربوط به گیاهان تلقیح شده با قارچ *P. indica* بود که نسبت به گیاهان تلقیح نشده به‌ترتیب ۱۶/۴۷ و ۱۲/۸۵ درصد افزایش یافت. تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی، تلقیح با قارچ *P. indica* تجمع ماده خشک در سال اول و دوم را نسبت به شاهد به‌ترتیب ۲۱/۵۳ و ۱۵/۶۰ درصد افزایش داد (شکل ۳).

کاهش بسیار شدید سطح برگ و عدم جذب تشعشع کافی و نیز کاهش تولیدات فتوسنتزی، باعث کاهش ماده خشک تحت شرایط تنش کم‌آبی شد. تنش کم‌آبی با محدودیت‌هایی که در جذب آب توسط گیاه و همچنین جذب عناصر غذایی برای گیاه ایجاد می‌کند باعث کاهش ماده خشک می‌شود (Ashraf & Foolad, 2007). 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 فیزیولوژیکی کافی جهت استفاده هر چه بیشتر از نور دریافتی و تولید ماده خشک در ذرت گردید. دانشیان و همکاران (Daneshian et al., 2011) اثر تنش کم‌آبی را بر تجمع ماده خشک و شاخص‌های رشد سویا، بررسی کردند. تنش کم‌آبی به‌دلیل کاهش سطح برگ، میزان تجمع ماده خشک را در گیاه کاهش داد.

با توجه به اثرات 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. قارچ با ارتقای سطح جذب ازطریق میسلیوم‌های خود، فراهمی آب و عناصر را برای گیاه افزایش می‌دهد

و بهبود میزان فتوسنتز، تولید قندها و مواد ذخیره‌ای را موجب می‌شود و در نتیجه رشد اندام‌های هوایی و ریشه‌ها افزایش می‌یابد. افزایش تجمع ماده خشک می‌تواند وابسته به سیستم ریشه‌ای گسترده‌تر و جذب مقادیر بالای عناصر غذایی از جمله فسفر و آهن و در نتیجه بهبود رشد گیاه باشد (Oelmuller et al., 2009). همچنین قارچ از طریق تولید هورمون اکسین، سبب افزایش طول ریشه و جذب بیشتر عناصر غذایی می‌شود که نتیجهٔ آن بهبود رشد اندام‌های هوایی گیاه است (Michal Johnson et al., 2013). از آن‌جا که قارچ از مناطق خشک و بیابانی جداسازی شده است، این احتمال می‌رود که توانایی القای مقاومت به خشکی را داشته باشد (Oelmuller et al., 2009).

علی‌اصغرزاده و همکاران (Aliasgharzad et al., 2006) در آزمایشی روی سویا تحت شرایط تنش کم‌آبی گزارش نمودند که گیاهان تیمار شده با *برادی‌رایزوبیوم ژاپونیکوم* (*Bradyrhizobium japonicum*) و *گلوموس اتونیکاتوم* (*Glumus etanicatum*) دارای وزن خشک اندام‌های هوایی بالاتر و پتانسیل آب بیشتری بودند و مکانیزم اصلی ایجاد شده در این گیاهان را اجتناب از خشکی عنوان نمودند. اثرات مثبت قارچ *P. indica* بر افزایش مقدار وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاه ذرت در شرایط تنش خشکی نیز توسط سایر محققان گزارش شده است (Xu et al., 2017).



شکل ۳- تأثیر قارچ *Piriformospora indica* بر ماده خشک کل سویا در رژیم‌های مختلف آبیاری طی دو سال زراعی ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴

Fig. 3- Effect of fungus *Piriformospora indica* on total dry matter of soybean under different irrigation regimes in both years (2014 and 2015)

جذب تشعشع

الگوی تغییرات زمانی جذب تشعشع در همه تیمارها در هر دو سال زراعی از الگوی رشد سطح برگ تبعیت کرد. بدین ترتیب که متناسب با افزایش شاخص سطح برگ، میزان تشعشع جذب شده توسط تاج‌پوشش گیاه در تمامی تیمارها نیز به‌تدریج افزایش یافت و سپس به‌علت کاهش شاخص سطح برگ در انتهای دوره رشد، روند نزولی در پیش گرفت (شکل ۴). این موضوع با نتایج سایر محققان مبنی بر تطابق روند افزایش شاخص سطح برگ با روند جذب تشعشع، مطابقت دارد (Yousef Nia et al., 2015).

نتایج نشان داد که درصد جذب نور با کاربرد قارچ *P. indica* در سطوح مختلف آبیاری در هر دو سال، افزایش یافت (شکل ۴). در سال اول میزان کل تشعشع جذب شده در بالای تاج‌پوشش در ۷۷ روز پس از کاشت سویا معادل ۱۶/۴۵ مگاژول بر متر مربع در روز بود. بیشترین میزان نور جذب شده (۱۵/۳۳ مگاژول بر متر مربع در روز) در گیاهان سویا تلقیح شده با قارچ تحت شرایط عدم تنش کم‌آبی و کمترین میزان (۱۱/۸۹ مگاژول بر متر مربع در روز) تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی و عدم تلقیح با قارچ، مشاهده شد (شکل ۴). در سال دوم در ۸۵ روز پس از کاشت، کل تشعشع جذب شده حدود ۱۷/۰۳ مگاژول بر متر مربع در روز بود (شکل ۴). گیاهان سویا تلقیح شده با قارچ تحت شرایط عدم تنش با ۱۵/۵۶ مگاژول بر مترمربع در روز، بیشترین و گیاهان تلقیح نشده تحت شرایط عدم تنش کم‌آبی با ۱۲/۹۵ مگاژول بر مترمربع در روز، کمترین جذب تشعشع را دارا بودند (شکل ۴). با اعمال تنش کم‌آبی، میزان جذب نور فعال فتوسنتزی کاهش یافت (شکل ۴). احتمالاً این کاهش جذب نور ناشی از کاهش سطح برگ بوده است. تنش کم‌آبی، سطح برگ گیاه را به علت پژمردگی و جمع شدن پهنک، کاهش می‌دهد، با کاهش سطح برگ، جذب تشعشع فعال فتوسنتزی کاهش می‌یابد (Ngugi et al., 2013). موچو (Muchow, 1985) گزارش کرد که وقوع تنش کم‌آبی از زمان استقرار گیاهچه و ادامه یافتن آن تا زمان بلوغ بقولات دانه‌ای مختلف مانند سویا، باعث کاهش جذب تشعشع فعال فتوسنتزی و مقدار ماده خشک اندام‌های هوایی می‌شود. همچنین گزارش شده است بیشترین میزان تشعشع فعال فتوسنتزی سویا (۳۹۲ مگاژول بر مترمربع در روز) تحت شرایط آبیاری کامل و کمترین میزان (۳۳۳ مگاژول بر متر مربع) تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی، به‌دست آمده است (Adeboye et al., 2016).

جذب نور توسط تاج‌پوشش سویا در گیاهان تلقیح شده با قارچ بیشتر بود که به نظر می‌رسد، به علت رشد بهتر و سطح برگ بیشتر سویا از طریق فراهم شدن آب و عناصر غذایی باشد. گوش (Ghosh, 2000) ضمن بررسی اثر کودهای زیستی و هورمون‌های رشد بر تولید کنجد (*Sesamum indicum* L.)، گزارش کرد که کارآیی جذب انرژی تابشی به میزان سطح برگ و توزیع برگ‌ها در داخل سایه‌انداز، بستگی داشت. تولید ماده خشک و عملکرد نهایی به میزان تشعشع جذب شده و کارآیی مصرف نور وابسته است و جذب نور نیز به نوبه خود به میزان تشعشع برخورد کرده به تاج‌پوشش و شاخص سطح برگ بستگی دارد (Shariatmadari et al., 2011). بنابراین هر گونه شرایط نامساعد محیطی مانند عدم تأمین آب مطلوب مورد نیاز برای گیاه باعث کاهش سطح برگ و در نتیجه کاهش جذب نور می‌شود که در نتیجه موجب کاهش فتوسنتز و عملکرد می‌گردد.

جدول ۵- پارامترهای مدل غیر خطی برازش داده شده تیمارهای رژیم آبیاری و قارچ بر روند ماده خشک کل سویا
Table 5- Non linear model parameters fitted to irrigation regimes and fungus on total dry matter of soybean

آبیاری Irrigation (mm evaporation from pan class A)	قارچ Fungus	2014				2015			
		a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
60	با قارچ With fungus	786	182	0.08	0.98	825	256	0.09	0.97
	بدون قارچ No fungus	688	172	0.08	0.98	744	219	0.09	0.97
90	با قارچ With fungus	616	182	0.09	0.98	651	238	0.09	0.95
	بدون قارچ No fungus	516	159	0.09	0.97	562	183	0.09	0.95
120	با قارچ With fungus	424	130	0.101	0.93	422	139	0.101	0.91
	بدون قارچ No fungus	340	121	0.104	0.92	371	133	0.105	0.89

a: حداکثر تجمع ماده خشک، b: ثابت معادله و c: سرعت رشد نسبی

a: Maximum dry matter, b: A constant coefficient and c: Relative growth rate

کارآیی مصرف نور

در هر دو سال زراعی، تجمع ماده خشک سویا ارتباط خطی با تشعشع فعال فتوسنتزی تجمعی داشت و ضریب همبستگی آن در بین تیمارهای مختلف بین ۰/۷۳ تا ۰/۸۶ متغیر بود. شیب این ارتباط، بیانگر کارآیی مصرف نور در سویا است (شکل ۵).

تحت شرایط عدم تنش کم‌آبی، بیشترین مقدار کارآیی مصرف نور (۱/۷۵ و ۱/۸۵ گرم بر مگاژول به‌ترتیب در سال اول و دوم) در گیاهان سویا تلقیح شده با قارچ، به‌دست آمد که به‌ترتیب ۱۳/۳۷و ۴/۵۱ درصد بیشتر از گیاهان تلقیح نشده بود (شکل ۵). تحت شرایط تنش متوسط کم‌آبی، با کاربرد قارچ *P. indica*، بیشترین میزان کارآیی مصرف نور به میزان ۱/۵۱ و ۱/۷۱ گرم بر مگاژول به‌ترتیب در سال اول و دوم در گیاهان تلقیح شده با قارچ مشاهده گردید که نسبت به گیاهان تلقیح نشده به‌ترتیب ۱۲/۷۸ و ۹/۶۱ درصد، بیشتر بود (شکل ۵). تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی، بیشترین کارآیی مصرف نور در گیاهان تلقیح شده با قارچ مشاهده گردید، که ۱۷/۴۸ و ۱۷/۸۷ درصد در مقایسه با عدم تلقیح با قارچ، افزایش یافته بود (شکل ۵).

مقادیر گزارش شده برای کارآیی مصرف نور سویا در مطالعات مختلف بسته به شرایط آزمایش، متفاوت می‌باشد. سینگر و همکاران (Singer et al., 2011) مقدار کارآیی مصرف نور را در سویا، ۱/۴۴ گرم بر مگاژول بیان کردند، که در محدوده مقادیر به‌دست آمده در این آزمایش قرار می‌گیرد.

کاربرد قارچ *P. indica* از طریق افزایش رشد رویشی و سبزینه‌ای گیاه می‌تواند تأثیر مستقیم بر افزایش جذب تشعشع فتوسنتزی و در نتیجه افزایش کارآیی مصرف نور داشته باشد. به‌نظر می‌رسد قارچ *P. indica* با قابلیت افزایش دسترسی به عناصر غذایی به‌خصوص فسفر، باعث افزایش رشد رویشی و در نتیجه افزایش سطح برگ و توسعه بیشتر کانوپی شده که موجب افزایش کارآیی محصول در استفاده از انرژی نورانی و سنتز بیشتر مواد فتوسنتزی می‌شود. آروین و وفابخش (Arvin & Vafabakhsh, 2016) گزارش دادند کاربرد باکتری *سودوموناس فلورسنس* (*Pseudomonas fluorescens*) باعث افزایش کارآیی مصرف نور در گیاه کلزا تحت شرایط عدم 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 بالا رفتن کارآیی مصرف نور در کلزا شده بود (Arvin & Vafabakhsh, 2016).

تنش کم‌آبی سبب کاهش در اندازه برگ‌ها، وزن خشک اندام‌های هوایی، شاخص سطح برگ، تعداد برگچه و متوسط سطح برگ می‌شود. بنابراین در مجموع، خشکی بر فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه تأثیر گذاشته و پیامد آن نیز می‌تواند کاهش کارآیی مصرف نور باشد (Hu et al., 2014). تنش کم‌آبی از طریق اختلال در فرآیندهای رشد سلولی، توسعه برگ و فتوسنتز، باعث استفاده کمتر از نور خورشید، کاهش ساخت مواد و در نهایت، کاهش کارآیی مصرف نور خورشید در مقایسه با شرایط عدم تنش می‌شود. به عبارتی دیگر، تنش کم‌آبی از یک سو با کاهش رشد و ماده‌سازی از توسعه سطح برگ ممانعت می‌کند، از سوی دیگر خشکی با تأثیر بر تخریب سلول‌های برگ و نکروزه شدن برگ‌ها، سطح برگ را در گیاه کاهش می‌دهد که این خود یکی از عمده دلایل کاهش میزان کارآیی مصرف نور در گیاه به حسب می‌آید (Arvin & Vafabakhsh, 2016). مطالعات نشان داده است که کاهش در ظرفیت فتوسنتزی تاج‌پوشش ناشی از کاهش خشکی باعث کاهش در کارایی مصرف نور گردید (Bat-Oyun et al., 2011). تبارزاده 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. این محققان علت کاهش کارآیی مصرف نور تحت شرایط تنش خشکی را کاهش جذب تشعشع فعال فتوسنتزی گزارش نمودند.

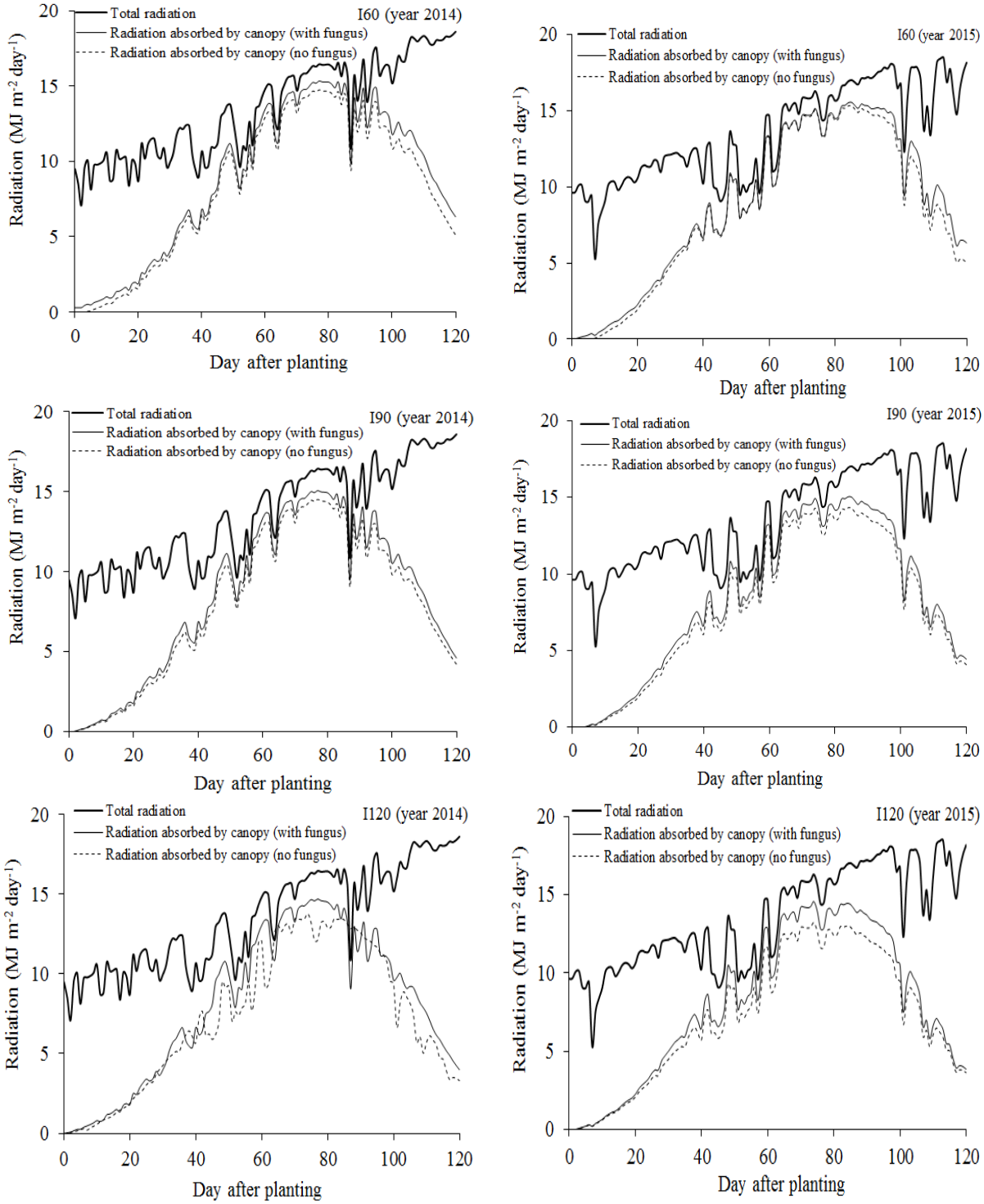
عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که عملکرد دانه تحت تأثیر اثرات آبیاری، کاربرد قارچ و اثرات متقابل دوگانه (آبیاری× قارچ) قرار گرفت (جدول ۶). تنش شدید کم‌آبی، عملکرد دانه سویا را به‌میزان ۵۷/۲۰ درصد کاهش داد (شکل ۶). قارچ *P. indica* تأثیر مثبت و معنی‌داری بر عملکرد دانه سویا در همه سطوح آبیاری داشت (شکل ۶). قارچ *P. indica* در شرایط عدم تنش، تنش متوسط و تنش شدید کم‌آبی، عملکرد دانه سویا را به‌ترتیب ۱۳/۶۷، ۲۲/۸۵ و ۲۲/۱۴ درصد در مقایسه با گیاهان تلقیح نشده، افزایش داد (شکل ۶).

با اعمال تنش کم‌آبی، عملکرد دانه سویا کاهش یافت. تنش کم‌آبی باعث کاهش شاخص سطح برگ و جذب تشعشع، اختلال در جذب آب و مواد غذایی و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه و در نهایت کاهش عملکرد دانه شد. دانشیان و همکاران (Daneshian et al., 2011) اظهار نمودند که اعمال تنش کم‌آبی در مرحله گلدهی، باعث کاهش ۸۰ درصدی عملکرد دانه در سویا شد.

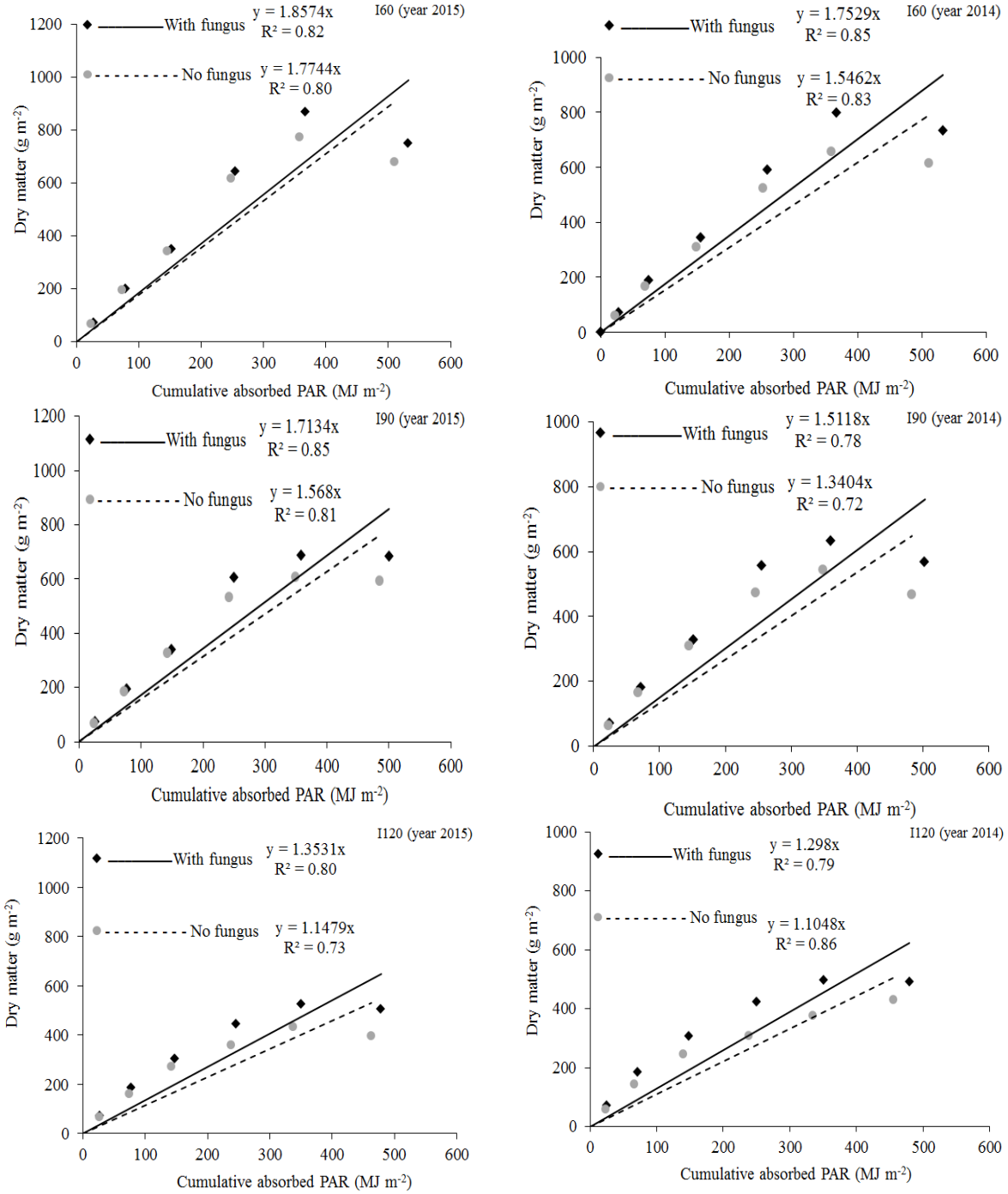
کاربرد قارچ *P. indica* به‌ویژه در شرایط تنش کم‌آبی، می‌تواند برای رشد گیاه سودمند باشد، زیرا در وضعیت کمبود رطوبت خاک، افزایش سطح تماس ریشه گیاه با خاک برای جذب بیشتر رطوبت بیش از هر چیزی اهمیت دارد که همزیستی با قارچ *P. indica* این ویژگی را به گیاه می‌دهد (Aliasgharzad et al., 2006). در همین

راستا تأثیر مثبت قارچ *P. indica* در افزایش عملکرد گیاهان گندم (Yaghoubian et al., 2014) و جو (Ghabooli et al., 2013) نیز تحت تنش کم‌آبی، گزارش شده است. ابوطالبیان و خلیلی (Aboutalebian & Khalili, 2014) در تحقیقی اعلام کردند کاربرد همزمان کودهای زیستی میکوریز آربوسکولار و *برادی‌ریزوبیوم* در سویا به‌ویژه تحت شرایط تنش کم‌آبی سبب کاهش تأثیر سوء تنش کم‌آبی بر عملکرد دانه شد.



شکل ٤- تأثیر قارچ *Piriformospora indica* بر جذب تشعشع سویا در رژیم‌های مختلف آبیاری طی دو سال زراعی ۱۳۹۳ و ۱۳۹٤

Fig. 4- Effect of fungus *Piriformospora indica* on radiation of soybean under different irrigation regimes in both years (2014 and 2015)



شکل ۵- تأثیر قارچ *Piriformospora indica* بر کارآیی مصرف نور سویا در رژیم‌های مختلف آبیاری طی دو سال زراعی ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴

Fig. 5- Effect of fungus *Piriformospora indica* on radiation use efficiency of soybean under different irrigation regimes in both years (2014 and 2015)

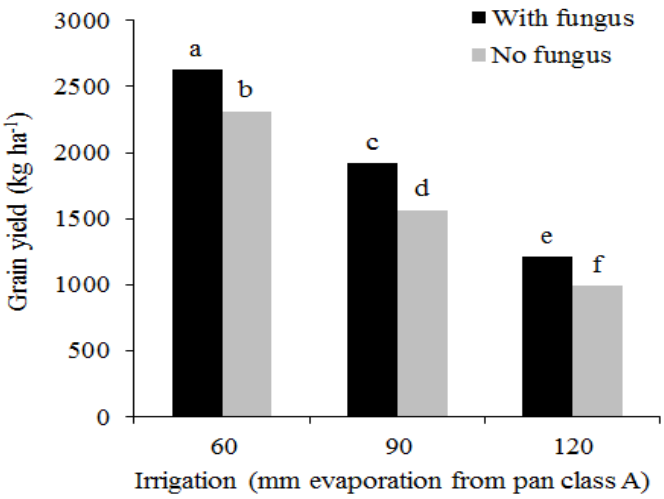
جدول ٦- تجزیه واریانس مرکب اثرات آبیاری و قارچ *Piriformospora indica* بر عملکرد دانه سویا طی دو سال زراعی ۱۳۹۳ و ۱۳۹٤

Table 6- Combined analysis of variance of the effect of irrigation regimes and fungus *Piriformospora indica* on seed yield of soybean in both years (2014 and 2015)

S.O.V.	منابع تغییر	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of square
			عملکرد دانه Seed yield
Year	سال	1	744740^{ns}
Rep × (Year)	تکرار× سال	4	90213
Irrigation	آبیاری	2	5643279*
Year × Irrigation	سال× آبیاری	2	77949^{ns}
Error a	خطای اصلی	8	38633
Fungus	قارچ	1	895753*
Irrigation × Fungus	آبیاری× قارچ	2	44891**
Year× Fungus	سال× قارچ	1	5157^{ns}
year × irrigation× Fungus	سال× آبیاری× قارچ	2	5231^{ns}
Error b	خطای فرعی	12	11843
CV (%)	ضریب تغییرات		6.15

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد، ns: غیرمعنی‌دار

* and **: Significant at 5 and 1% probability levels, respectively. ns: non significant



شکل ٦- تأثیر قارچ *Piriformospora indica* بر عملکرد دانه سویا در رژیم‌های مختلف آبیاری

Fig. 6- Effect of fungus *Piriformospora indica* on grain yield of soybean under different irrigation regimes

نتیجه‌گیری

شاخص سطح برگ، ماده خشک، عملکرد دانه و جذب نور تحت شرایط تنش کم‌آبی کاهش یافتند. کارآیی مصرف نور تحت شرایط تنش کم‌آبی به‌واسطه کم شدن فرآیند رشد، سطح برگ و دریافت و جذب نور خورشید کاهش یافت. کاربرد قارچ *P. indica* باعث بهبود شاخص سطح برگ، ماده خشک، جذب نور و کارآیی مصرف نور در گیاه سویا شد. بنابراین، قارچ *P. indica* در سطوح مختلف آبیاری از طریق افزایش جذب عناصر غذایی و به تبع آن بهبود رشد اندام‌های هوایی و در نهایت با افزایش جذب نور و کارآیی مصرف نور، باعث افزایش عملکرد دانه سویا گردید.

منابع

Aboutalebian, M.A., and Khalili, M. 2014. Effect of arbuscular mycorrhiza and *Bradyrhizobium japonicum* on soybean yield and yield components under water stress. Iranian Journal of Field Crop Science 45: 169-181. (In Persian with English Summary)

Aboutalebian, M.A., Ahmadvand, G., and Khalili, M. 2016. Effects of arbuscular mycorrhizae and *Bradyrhizobium* on some growth indices of soybean under water stress. Journal of Crop Production and Processing 5:367-382. (In Persian with English Summary)

Adeboye, O.B., Schultz, B., Adekalu, K.O., and Prasad, K. 2016. Impact of water stress on radiation interception and radiation use efficiency of soybeans (*Glycine max* L. Merr.) in Nigeria. Brazilian Journal of Science and Technology 15: 2-21.

Aliasgharzad, N., Neyshabouri, M.R., and Salimi, G. 2006. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and *Bradyrhizobium japonicum* on drought stress of soybean. Biologia Bratislava 61: 324-328.

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 56. FAO, Rome, 300, D05109.

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 Agriculture Research 6: 2026-2032.

Ashraf, M., and Foolad, M.R. 2007. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. Environmental and Experimental Botany 59: 206-216.

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 Journal of Agroecology 8: 134-152. (In Persian with English Summary)

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 Plant Interaction 7: 214-224.

Daneshian, J., Jonoubi, P., and Barari Tari, D. 2011. Investigation of water deficit stress on agronomical traits of soybean in temperate climate. World Academy of Science, Engineering and Technology 75: 778-785.

Demirtas, C., Yazgan, S., Candogan, B.N., Sincik, M., Buyukcangaz, H., and Goksoy, A.T. 2010. Quality and yield response of soybean (*Glycine max* L. Merr.) to drought stress in sub-humid environment. African Journal of Biotechnology 9: 6873-6881.

Doorenbos, J., and Kassam, A. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper 33: 257.

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 Summary)

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., Shahriari, F., Sepehri, M., Marashi, H., and Hosseini Salekdeh, G.H. 2011. An Evaluation of the impact of the endophyte fungus *Piriformospora indica* on some traits of barley (*Hordeum vulgare* L.) in drought stress. Journal of Agroecology 3(3): 328-336. (In Persian with English Summary)

Ghosh, D.C. 2004. Growth and productivity of 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.

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 Newsl 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: 45-54. (In Persian with English Summary)

Hu, Y., Zhang, Y.L., Yix, P., Zhan, D.X., Luo, H.H., Chow, W.S., and Zhang, W.F. 2014. The relative contribution of non-foliar organs of cotton to yield and related physiological characteristics under water deficit. Journal of Integrative Agriculture 13: 975-989.

Khajehpour, M. 2007. Principle of Agronomy. Industrial University of Esfahan Publication, Isfahan, Iran. 387pp. (In Persian).

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: A. Varma (Eds.). *Piriformospora indica,* soil biology. Springer Verlag, Berlin. p. 139-147.

Muchow, R.C. 1985. An analysis of the efects of water deicits on grain legumes grown in a semi‑arid tropical environ‑ment in terms of radiation interception and its eiciency of use. Field Crops Research 11: 309-323.

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.

Pazoki, A.R., and Kariminejad, M. 2010. Effect of zeolit amounts and drought stress on light extinction coefficientof rapeseed (*Brassica napus* L.). Journal of Crop Production Research 2(2): 175-189. (In Persian with English Summary)

Sadeghipour, O., and Abbasi, S. 2012. Soybean response to drought and seed inoculation. World Applied Science Journal 17: 55-60.

Sarmadnia, G.H., and Koocheki, A. 1989. Crop Plant Physiology. University of Mashhad Publicatio, Mashhad, Iran. 400pp. (In Persian).

Shariatmadari, M.H., Zemani, G.R., and Sayari, M.H. 2011. Effect of salinity and foliar spraying with Fe on leaf area index, absorption radiation and relation with grain yield of sunflower. Iranian Journal of Field Crops Research 9: 285-293. (In Persian with English Summary)

Singer, J.W., Meek, D.W., Sauer, T.J., Prueger, J.H., and Hatield, J.L. 2011. Variability of light interception and radiation use eiciency in maize and soybean. Field Crops Research 121: 147-152.

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. DOI 10.1007/s11274-014-1785-y.

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: 251-258.

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

Yousef Nia, M., Banayan Aval, M., and Khorramdel, S. 2015. Evaluation of radiation use and interception of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) and dill (*Anethum graveolens* L.) intercropping canopy. Journal of Agroecology 7(3): 412-424. (In Persian with English Summary)

Zare Abyaneh, H., Gasemi, A., Marofi, S., and Bayat Varkeshi, M. 2010. Determination of water requirement, single and dual crop coefficients of garlic in cold semi-arid climate. Water and Soil Science 20: 111-122.

Journal of Agroecology
Vol. 11, No.1, Spring 2019, p. 199-215

نشریه بوم شناسی کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۱، بهار ۱۳۹۸، ص. ۲۱۵-۱۹۹

The Effects of *Piriformospora indica* Inoculation on the Seed Yield, Light Absorption and Radiation Use Efficiency of Soybean (*Glycine max*) Under Water Stress Conditions

G. Ahmadvand[1*] and S. Hajinia[2]

Submitted: 14-08-2017
Accepted: 27-02-2018

Ahmadvand, G., and Hajinia, S. 2019. The effects of *Piriformospora indica* inoculation on the seed yield, light absorption and radiation use efficiency of soybean (*Glycine max*) under water stress conditions. Journal of Agroecology. 11(1):199-215.

Introduction

Water stress is one of the most important limiting factors in crop production, especially in arid and semi-arid regions. More than 45% of agricultural land on earth is subjected to continuous or frequent water deficiency, and it can cause ~50% loss of grain yield, on average. Soybean growth is affected by drought stress. Drought stress has been estimated to reduce seed yield of soybean by 24 to 50 percent. Improvement the light absorption in the crop plant increase the crop yield. All plants, at least during their vegetative growing period, produce and store dry matters using sunlight. One of the most important strategies to increase tolerance to dehydration and improve the growth performance in crops is to establish associations with the beneficial of fungal symbiosis. *Piriformospora indica* is one of the cultivable root-colonizing endophytic fungi that has a symbiotic relationship with the roots of most crops and improves the growth and yield of plants by increasing the absorption of nutrients such as phosphorus and some micro- elements and can enhance the resistance to biotic and abiotic stresses (Oelmuller et al., 2009). The aim of the present investigation was to study the impact of *P. indica* on the light absorption, radiation use efficiency and grain yield of soybean under different levels of irrigation.

Materials and Methods

Two field experiments were carried out at the Agricultural Faculty, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran (35º1′N, 48 º31′E; 1690 m a.m.s.l.) in 2014 and 2015. This region has a cold and semi-dry climate. The experiments were carried out as split-plot based on a randomized complete block design with three replications. The Main factors consisted of three irrigation treatments (irrigation after 60 (well-watered), 90 (mild stress) and 120 (severe stress) mm cumulative evaporation from pan class A) and sub plots included of two levels of fungus P. indica (inoculated and non-inoculated). All main plots were irrigated immediately after sowing. Water-stress treatments as described above were applied after seedling establishment. Irrigation was performed via polyethylene pipes, and a water meter was used to measure the volume of irrigation water in each main plot. In order to maintain the specified soil-moisture regimes, the amount of used water was calculated by using crop water requirement as described by Doorenbos and Pruitt (1992).

Results and Discussion

In both years, drought stress decreased leaf area and dry matter of soybean. Inoculation with fungus, increased leaf area and dry matter of soybean plants in different irrigation levels. Daneshian et al. (2011) studied the effect of drought stress on dry matter and soybean growth indices. Due to the decrease in leaf area, drought stress reduced the amount of dry matter accumulation in the soybean plants. The highest radiation use efficiency (1.75 and 1.85 g MJ^{-1} in 1st and 2nd year, respectively) was obtained from inoculated soybean plant under well-watered, and the lowest one (1.10 and 1.15 g MJ^{-1} in 1st and 2nd year, respectively) was observed in control plant (non-inoculated) under severe drought stress. Drought stress reduces the amount of radiation use efficiency by reducing photosynthetic rates and decreasing leaf area index. Severe drought stress significantly decreased grain yield of soybean by about 57.20 percent. Application of *P. indica* caused an increase in *grain yield of soybean* by about 13.67, 22.85 and 22.14 percent under well-watered, mild

1 and 2- Associate Professor and Ph.D Student of Crop Physiology, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Bu- Ali Sina, Hamedan, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: gahmadvand@basu.ac.ir)
DOI:10.22067/jag.v11i1.66827

and severe drought stress, respectively, compared to control (non-inoculate). Inoculation with *P. indica* fungus increases the light absorption and radiation use efficiency by increasing the amount of vegetative growth, leaf area index and photosynthetic material production, which improves the yield of soybean.

Conclusion

The results showed *P. indica* fungus had a positive effect on absorption and radiation use efficiency of soybean in different irrigation levels, so that the application of fungus mitigated the effects of drought stress and improved the yield of soybean under drought stress.

Keywords: Endophytic fungus, Irrigation, Photosynthetic active radiation, Radiation use efficiency.