

مقاله پژوهشی

ویژگی‌های فتوسنتزی تریتیکاله در مرحله پرشدن دانه تحت تأثیر کود نیتروژن، کاربرد برگی سیلیکون و تنش آبی

وحید براتی* و احسان بیژن‌زاده

بخش اگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۵، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۰۹/۰۱)

چکیده

این پژوهش به منظور بررسی اثرات کاربرد برگی سیلیکون در کاهش سطح تنش آبی در گیاه تریتیکاله طراحی شد. تیمارها شامل: دو سطح آبیاری به عنوان عامل اصلی [۱- آبیاری بدون تنش آبی: آبیاری بر اساس نیاز آبی گیاه تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیک و ۲- آبیاری با تنش آبی: آبیاری بر اساس نیاز آبی گیاه تا انتهای مرحله‌ی گلدهی] بود. عامل فرعی اول شامل سه سطح کود نیتروژن به صورت اوره [صفر، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار] و عامل فرعی دوم شامل دو سطح کاربرد برگی سیلیکون [صفر (شاهد) و ۳ میلی مولار] بود. آزمایش به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه اجرا شد. نتایج نشان داد که تنش آبی سبب کاهش مقدار فتوسنتز شد. اما، این کاهش در سطوح مختلف کود نیتروژن متفاوت بود و در بالاترین سطح کود نیتروژن بیشترین مقدار (۴۴ و ۵۵ درصد کاهش به ترتیب در مراحل شیری و خمیری نرم) مشاهده شد. روندی مشابه در عملکرد دانه نیز مشاهده شد. کاربرد برگی سیلیکون به طور مستقل از کود نیتروژن سبب کاهش اثرات تنش آبی بر فتوسنتز و صفات وابسته به آن (هدایت روزنه‌ای و کارایی استفاده از آب لحظه‌ای) شد. به طور کلی، برای دستیابی به بیشینه‌ی فتوسنتز و عملکرد دانه، کاربرد ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار به ترتیب در شرایط تنش آبی و مطلوب رطوبتی پیشنهاد می‌شود. همچنین، کاربرد برگی سیلیکون به مقدار ۳ میلی مولار در اواسط مرحله‌ی گلدهی برای کاهش اثرات مخرب تنش شدید آبی پس از گلدهی بر فتوسنتز و سایر صفات وابسته در مناطق جنوبی ایران توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: فتوسنتز، کارایی مصرف آب، هدایت روزنه‌ای

مقدمه

گلدهی و پرشدن دانه‌ی غلات از جمله تریتیکاله (*Triticosecale* Wittmack) را متأثر می‌کند (Barati and Bijanzadeh, 2021). این گیاه که حاصل تلاقی چاودار (*Secale cereal* L.) و گندم (*Triticum* sp. L.) است و در شرایط مطلوب و همچنین طیف وسیعی از تنش‌های محیطی موفق‌تر از گندم بوده است (Roohi et al., 2013). بنابراین، با توجه به این مقاومت تلاش‌های قابل توجهی جهت معرفی

کمبود آب از جمله عوامل کاهنده‌ی تولید غلات در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران از جمله جنوب استان فارس است. در این مناطق، میانگین بلند مدت مقدار بارندگی کم (۲۵۰ میلی متر) و تغییرات سالیانه‌ی آن بسیار زیاد است. این مقدار محدود بارندگی نیز در اواخر پاییز و اوایل زمستان-همزمان با رشد رویشی غلات- رخ می‌دهد. بنابراین، تنش آبی مراحل

*نویسنده مسؤول، نشانی پست الکترونیکی: v.barati@shirazu.ac.ir

تریتیکاله به عنوان غله جایگزین برای سایر غلات در مناطق جنوبی ایران در جریان است (Barati et al., 2020).

در کنار کمبود آب، مقدار نیتروژن نیز در خاک‌های جنوب استان فارس محدود کننده بوده و کشاورزان با آگاهی از این کمبود و همچنین، نقش تعیین کننده این عنصر در شکل-گیری عملکرد مناسب گیاهان، کود نیتروژن را در مزارع غلات به کار می‌برند. اما، آنها معمولاً بیش از مقدار توصیه شده از کود نیتروژن استفاده می‌کنند. به دلیل وابستگی گیاه به آب در جذب نیتروژن، در مناطقی با بارندگی‌های متغیر و غیر قابل پیش‌بینی از سالی به سال دیگر، مدیریت کاربرد کود نیتروژن دشوار است (Karrou and Maranville, 1995) و این دشواری در شرایط استفاده از سطوح بالای کود نیتروژن، بیشتر نیز خواهد شد (Barati et al., 2015). زیرا، برخی از محققین نشان داده‌اند که کاربرد سطوح بالای کود نیتروژن در شرایط تنش آبی می‌تواند سبب تشدید اثرات آن شود (Frederick and Camberato, 1994; Garabet et al., 1998) و بنابراین، عملکرد گیاه را با کاهش بیشتری مواجه کند. پژوهش‌های زیادی در مورد ابعاد فیزیولوژیک برهم‌کنش نیتروژن و تنش آبی روی غلات انجام شده است (Frederick and Camberato, 1994; Karrou and Maranville, 1995; Shangguan et al., 2000). اما، اطلاعات کمی در مورد اثر برهم‌کنش نیتروژن و تنش آبی انتهای فصل بر پارامترهای فتوسنتزی گیاه تریتیکاله در مناطق جنوبی ایران وجود دارد.

فرآیندهای فیزیولوژیک متعددی از کوددهی نیتروژن متاثر می‌شوند (نیازی اردکانی و همکاران، الف ۱۳۹۹ Lawlor et al., 1988). افزایش مقدار کود نیتروژن سبب افزایش غلظت نیتروژن برگ خواهد شد (Frederick and Camberato, 1994). این افزایش، میزان فتوسنتز خالص برگ را در خلال مرحله‌ی پر شدن دانه می‌افزاید (Hunt and Vander Poorten, 1985). Sugiharto و همکاران (۱۹۹۰) این همبستگی مثبت بین ظرفیت فتوسنتزی برگ‌ها و غلظت نیتروژن موجود در آنها را به نقش نیتروژن در ساختار اجزای دستگاه فتوسنتزی نسبت داد. Karrou و Maranville (۱۹۹۵) نشان دادند که افزایش غلظت نیتروژن درون گیاه سبب افزایش محتوای نسبی آب

برگ، افزایش هدایت روزنه‌ای و در نتیجه افزایش میزان فتوسنتز گیاه گندم (*Triticum aestivum* L.) در شرایط مطلوب رطوبتی شد. اما، Shangguan (۲۰۰۰) ثابت کرد که پارامترهای مربوط به تبادلات گازی در گندم که با کاربرد کود نیتروژن در شرایط بهینه‌ی رطوبتی افزایش می‌یابند، با تنش آبی و کاهش محتوای آب درون گیاه کاهش خواهند یافت.

وجود برهم‌کنش نیتروژن و محتوای رطوبتی خاک توسط برخی دیگر از پژوهشگران نیز در مورد گندم دوروم (*Triticum durum* L.) (Ercoli et al., 2008) و گندم نان (*Hordeum vulgare* L.) (Garabet et al., 1998) و جو (نیازی اردکانی و همکاران، الف ۱۳۹۹) به اثبات رسیده است. کاربرد سطوح بالای کود نیتروژن اثرات منفی تنش آبی بر فتوسنتز و صفات وابسته به آن را افزایش می‌دهد (Garabet et al., 1998). Karrou و Maranville (۱۹۹۵) نشان دادند که در شرایط مطلوب رطوبتی، کاربرد کود نیتروژن هدایت روزنه‌ای و میزان فتوسنتز گندم را افزود. اما، در شرایط تنش رطوبتی، این صفات در گیاهانی که سطوح بالای نیتروژن را دریافت کرده بودند، کاهش یافت. Morgan (۱۹۸۶) نشان داد که بوته‌های گندمی که کود نیتروژن کمتری دریافت کرده بودند، ویژگی گیاهان متحمل به خشکی را در شرایط تنش آبی نشان دادند. همچنین، نتایج پژوهش آنها نشان داد که در گیاهان با غلظت بالای نیتروژن، هدایت روزنه‌ای برگ و میزان تبادل دی-اکسیدکربن بیشتر از گیاهان با غلظت پایین نیتروژن، تحت تاثیر کاهش پتانسیل آب برگ قرار گرفتند. آنها اظهار داشتند که در سطوح پایین کود نیتروژن تغییر آناتومی برگ و استحکام دیواره‌ی سلولی سبب نگهداری محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش آبی می‌شود. از طرف دیگر، برخی دیگر از محققین (Barker, 2016) گزارش کردند که کاربرد سطوح بالای کود نیتروژن سبب کاهش نسبت ریشه به شاخساره گندم شد. بنابراین، به نظر می‌رسد کاهش محتوای نسبی آب برگ و به دنبال آن کاهش هدایت روزنه‌ای و میزان فتوسنتز در گیاهان با غلظت بالای نیتروژن در شرایط تنش آبی، ممکن است به عدم توانایی گیاه در جبران آب تعرق یافته از اندام‌های هوایی

نسبت داده شود.

عدم اطمینان از بارندگی مناسب و یا دسترسی به آب کافی در مراحل پس از گلدهی، کشاورزان جنوب ایران را با یک بحران مدیریتی روبرو کرده است. آنها در ابتدای فصل نمی‌دانند که کود نیتروژن را در بالاترین سطح توصیه شده برای شرایط مطلوب رطوبتی به کار ببرند و یا اینکه سطح کود نیتروژن را برای شرایط رطوبت محدود، کاهش دهند. یک راهکار که ممکن است این مخاطره‌ی کشاورزان را کاهش دهد، کاربرد برگ مصرف مواد کاهش دهنده‌ی سطح تنش مانند سیلیکون در شرایطی است که سطوح بالای کود نیتروژن در ابتدای فصل استفاده شده است اما، محدودیت منابع آب در انتهای فصل رخ داده است. سیلیکون دومین عنصر فراوان بعد از اکسیژن در پوسته زمین است. این عنصر به هنگام بروز تنش‌های محیطی با سازوکارهای مختلف از جمله مهار گونه‌های فعال اکسیژنی از طریق دفاع آنتی اکسیدانی یا جذب بهتر آب از ریشه‌ها نقش مهمی در مقاومت به تنش‌های محیطی ایفا می‌کند (Liang et al., 2015). با وجود فراوانی این عنصر، به دلیل همراه بودن آن با سایر عناصر عمدتاً از دسترس گیاه خارج است. بنابراین، می‌توان با کاربرد برگی سیلیکون به فرم قابل دسترس آن برای گیاه $(\text{Si}(\text{OH})_2)$ ، گیاهان را در مقابل تنش‌های محیطی متحمل نمود (Epstein, 1994).

در رابطه با اثرات کاربرد سیلیکون در کاهش اثرات تنش آبی پژوهش‌های زیادی انجام شده است. به عنوان مثال، Hattori و همکاران (۲۰۰۵) مشاهده کردند که کاربرد سیلیکون سبب کاهش نسبت شاخساره به ریشه و افزایش تجمع ماده‌ی خشک ریشه در گیاه سورگوم شده است. این در حالی است که برخی دیگر از محققین (Barker, 2016) گزارش کرده‌اند که کاربرد سطوح بالای کود نیتروژن رشد شاخساره را بیشتر از رشد ریشه تحریک می‌کند. همچنین، Gao و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که کاربرد سیلیکون سبب کاهش هدایت روزنه‌ای و تعرق در ذرت شد. از اینرو، کاهش تعرق می‌تواند یکی از سازکارهای افزایش تحمل به خشکی توسط سیلیکون باشد. Hattori و همکاران (۲۰۰۷ و ۲۰۰۸) اثبات کردند که مقاومت

هیدرولیکی ریشه که در شرایط تنش آبی افزایش می‌یابد، با کاربرد سیلیکون کاهش یافت. این اثرات مثبت کاربرد سیلیکون بر گیاه در شرایط تنش آبی می‌تواند محتوای نسبی آب برگ را افزوده و سبب افزایش فتوستتزی و یا نسبت فتوستتزی به آب تعرق یافته شود.

با توجه به مطالب بالا، این فرضیه شکل خواهد گرفت که کاربرد سیلیکون می‌تواند اثرات تنش تشدید شده به واسطه‌ی کاربرد سطوح بالای کود نیتروژن را کاهش دهد و در نتیجه سبب کاهش کمتر ویژگی‌های فتوستتزی تریتیکاله نسبت به شرایط عدم کاربرد سیلیکون شود. برای اثبات این فرضیه، آزمایشی در شرایط متفاوت رطوبتی، کاربرد و عدم کاربرد برگی سیلیکون و سطوح مختلف کود نیتروژن طراحی شد و برهم‌کنش این تیمارها بر ویژگی‌های فتوستتزی تریتیکاله مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در مزرعه‌ی پژوهشی دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی داراب- دانشگاه شیراز (طول جغرافیای 54° و $30'$ شرقی و عرض جغرافیایی 28° و $50'$ شمالی و با ارتفاع 1180 متری از سطح دریا) در سال $97-1396$ در منطقه‌ی داراب در جنوب استان فارس انجام شد. اقلیم این منطقه، گرم و خشک مدیترانه‌ای است و حداکثر دما 42 درجه سانتی‌گراد در تابستان و میانگین بلند مدت (30 ساله) بارندگی، 250 میلی‌متر است که در اواخر پاییز و اوایل زمستان رخ می‌دهد. پارامترهای اصلی هواشناسی از ایستگاه هواشناسی کشاورزی در نزدیکی محل آزمایش تهیه و در جدول ۱ آمده است. قبل از شروع آزمایش، در آبان ماه یک نمونه‌ی مرکب از عمق 0 تا 30 سانتی‌متری خاک تهیه و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن اندازه‌گیری شد (جدول ۲).

تیمارها در این آزمایش شامل: دو سطح آبیاری به عنوان عامل اصلی [۱- آبیاری بدون تنش آبی (مطلوب): آبیاری بر اساس نیاز آبی گیاه تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیک و ۲- آبیاری با تنش آبی (کم آبیاری): آبیاری بر اساس نیاز آبی گیاه

جدول ۱- وضعیت آب و هوایی منطقه در سال زراعی ۹۷ - ۱۳۹۶

ماه	بارندگی، میلی متر	بیشینه دما درجه سانتی گراد	کمینه دما درجه سانتی گراد	رطوبت درصد	تبخیر و میلی متر	طول دوره ساعت
مهر	۰/۰	۳۳/۰	۱۵/۹	۲۸/۰	۱۸۱/۸	۳۱۰/۹
آبان	۱/۹	۲۷/۴	۹/۵	۳۵/۵	۱۱۳/۳	۲۸۴/۴
آذر	۲۶/۲	۱۹/۵	۴/۷	۵۴/۵	۵۵/۰	۲۳۱/۲
دی	۱/۳	۲۰/۱	۳/۳	۴۵/۵	۵۵/۰	۲۷۳/۲
بهمن	۰/۴	۲۱/۴	۴/۵	۳۹/۵	۷۶/۵	۲۷۷/۶
اسفند	۶۲/۰	۲۲/۵	۸/۶	۴۹/۵	۸۶/۰	۲۳۹/۲
فروردین	۶/۴	۲۸/۶	۱۲/۱	۳۷/۵	۱۶۳/۳	۲۹۰/۳
اردیبهشت	۱/۷	۳۲/۲	۱۶/۹	۳۱/۵	۲۴۷/۲	۲۸۷/۷
خرداد	۰/۲	۳۹/۶	۲۲/۱	۲۲/۰	۳۰۶/۱	۲۵۷/۱
تیر	۰/۰	۴۱/۷	۲۶/۹	۱۹/۵	۴۲۸/۰	۳۶۷/۳
مرداد	۰/۰	۴۱/۸	۲۷/۳	۲۰/۵	۴۰۲/۸	۳۵۶/۰
شهریور	۴/۷	۳۹/۵	۲۳/۴	۲۷/۰	۳۱۱/۱	۳۲۵/۵

جدول ۲- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک در عمق ۳۰-۰ سانتی متری.

ویژگی	واحد	مقدار
شن	%	۳۸/۶۷
سیلت	%	۴۴/۵۴
رس	%	۱۶/۷۹
کربن آلی	%	۰/۹۹
ماده آلی	%	۱/۷۰
قابلیت هدایت الکتریکی	dS m ⁻¹	۱/۰۸
اسیدیته		۷/۴۷
نیتروژن کل	%	۰/۰۹
پتاسیم قابل دسترس	mg kg ⁻¹	۳۲۵
فسفر قابل دسترس	mg kg ⁻¹	۱۱
آهن	mg kg ⁻¹	۵/۵۵
منگنز	mg kg ⁻¹	۱۶/۳۱
مس	mg kg ⁻¹	۱/۴۶
روی	mg kg ⁻¹	۰/۷۳

تا انتهای مرحله ی گلدهی (قطع آبیاری پس از مرحله گلدهی) بود. همچنین، عامل فرعی اول شامل سه سطح کود نیتروژن به صورت اوره (۴۶ درصد نیتروژن) [صفر، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار] و عامل فرعی دوم شامل دو سطح کاربرد برگی سیلیکون [صفر (شاهد) و ۳ میلی مولار] بود. این تیمارها به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه اجرا شدند. کود نیتروژن در سه مرحله

[سه برگچه ای (کد زیداکس ۱۳)، پنجه زنی (کد زیداکس ۲۳) و ساقه رفتن (کد زیداکس ۳۱)] (Zadoks et al., 1974) و به مقدار مساوی به خاک مزرعه افزوده شد. سیلیکون در اواسط مرحله ی گلدهی (ZGS65) (Zadoks et al., 1974) بر روی برگها اسپری شد. در زمان اعمال تیمار سیلیکون، به منظور جلوگیری از اثرات جانبی جذب آب در این تیمار، کرت های شاهد نیز با آب معمولی بدون سیلیکون با حجمی معادل تیمار

سیلیکون محلول‌پاشی شدند.

آزمایش در یک قطعه زمین که در سال زراعی قبل به صورت آیش بود، اجرا شد. به منظور آماده سازی کرت‌ها در اواخر بهار، زمین با گاوآهن قلمی و دو بار دیسک عمود بر هم خاک‌ورزی شد. در آبان ماه کرت‌های فرعی با ابعاد $2 \times 3/5$ مترمربع تهیه شدند و جهت جلوگیری از نشت جانبی آب و کود نیتروژن اطراف هر کرت فرعی پشته‌ای به عرض نیم‌متر ایجاد شد. برای اطمینان بیشتر از عدم حرکت جانبی آب، فاصله‌ی بین کرت‌های اصلی (آبیاری مطلوب و تنش آبی) دو متر در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج آزمون خاک کود سوپر فسفات تریپل (۶۰ کیلوگرم بر هکتار) قبل از کاشت به صورت نواری زیر بذر استفاده شد. بذر تریپتیکاله (*Triticosecale* Wittmack) رقم سناباد که سازگاری مطلوبی با منطقه داشت از موسسه‌ی تحقیقات، اصلاح و تهیه نهال و بذر (ایستگاه حسن آباد داراب) تهیه و با توجه به تاریخ بهینه کاشت در منطقه (نیمه دوم آذرماه) در ۲۰ آذر در ردیف‌های به فاصله ۲۵ سانتی‌متر در ۶ ردیف به طول ۳ متر بر اساس مقدار توصیه شده (۴۵۰ بذر بر متر مربع) کاشته شد.

به‌منظور آبیاری زمین، قبل از هر آبیاری در کرت‌های مربوط به تیمار آبیاری مطلوب، محتوای رطوبتی خاک به‌وسیله روش وزنی در فواصل ۳۰ سانتی‌متری تا عمق ۶۰ سانتی‌متری خاک اندازه‌گیری شد. میزان آب موردنیاز برای هر کرت بر اساس ظرفیت زراعی خاک مزرعه (۲۲ درصد وزنی) با کمک معادله ۱ محاسبه شد. پس از اندازه‌گیری میزان آب، آبیاری نشستی به‌صورت یکسان برای تمام کرت‌ها به روش حجمی زمانی (Barati et al., 2015) تا مرحله گلدهی (ZGS65) انجام شد و در انتهای مرحله گلدهی آبیاری تیمارهای تنش آبی (قطع آبیاری) متوقف شد و آبیاری تیمارهای مطلوب رطوبتی تا مرحله‌ی رسیدگی فیزیولوژیک ادامه یافت. لازم به ذکر است که پس از مرحله‌ی گلدهی تا انتهای رسیدگی بارندگی رخ نداد.

معادله ۱

$$D = \sum_{i=1}^n (\theta_{fci} - \theta_i) \Delta Z_i$$

D : عمق آب آبیاری (میلی‌متر)، i یک لایه، n : تعداد لایه-های خاک، θ_{fci} : محتوای حجمی رطوبت خاک در حالت ظرفیت مزرعه (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) در i امین لایه خاک، θ_i : محتوای حجمی رطوبت خاک (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) در i امین لایه خاک، ΔZ_i : ضخامت هر لایه خاک (میلی‌متر).

بوته‌های تریپتیکاله در تاریخ ۲۰ اردیبهشت به مرحله رسیدگی فیزیولوژیک رسیدند. در این مرحله برای تعیین عملکرد دانه دو متر طولی از دو ردیف وسط کرت با داس کف‌بر شدند (۵۰ سانتی‌متر اطراف هر کرت به‌عنوان اثر حاشیه در نظر گرفته شد). به‌منظور اندازه‌گیری میزان فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای و تعرق برگ پرچم در اواسط مرحله‌ی شیری (کد زیداکس ۷۵) و خمیری نرم (کد زیداکس ۸۵) از دستگاه قابل حمل اندازه‌گیری این صفات (IGRA model LCA4 – ADC, Hodgeson, UK) استفاده شد. سه برگ پرچم متعلق به ساقه-های اصلی در قسمت مرکزی هر کرت به طور تصادفی انتخاب شد و به‌منظور اندازه‌گیری این صفات، قسمت میانی آنها در فواصل زمانی ساعت ۱۱ تا ۱۳ در داخل محفظه‌ی دستگاه قرار گرفت و ویژگی‌های فتوسنتزی اندازه‌گیری شدند. کارایی استفاده از آب لحظه‌ای با تقسیم میزان فتوسنتز بر میزان تعرق محاسبه شد (Gong and Chen, 2012). محتوای نسبی آب برگ پرچم در مراحل شیری و خمیری نرم با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد.

معادله ۲

$$RWC = \frac{W_1 - W_3}{W_2 - W_3} \times 100$$

RWC : محتوای نسبی آب برگ (درصد)، W_1 : وزن تازه برگ (گرم)، W_2 : وزن اشباع برگ (گرم)، W_3 : وزن خشک برگ (گرم).

تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 (SAS Institute, 2004) صورت گرفت و میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد مقایسه

جدول ۳- میانگین مربعات حاصل از تجزیه واریانس فتوستتزر، هدایت روزنه‌ای، تعرق، محتوای نسبی آب برگ پرچم، کارایی مصرف آب لحظه‌ای و عملکرد دانه تریتیکاله.

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		فتوستتزر		هدایت روزنه‌ای		تعرق	
		مرحله شیری	مرحله خمیری نرم	مرحله شیری	مرحله خمیری نرم	مرحله شیری	مرحله خمیری نرم
تکرار	۲	۰/۰۵۲ ^{ns}	۰/۰۱۶ ^{ns}	۹۰۵/۹۵۰ ^{ns}	۳۶۲/۶۸۰ ^{ns}	۰/۴۲۹ ^{ns}	۰/۰۰۹ ^{ns}
رژیم آبیاری (آبیاری)	۱	۱۹۳/۷۶۶ ^{**}	۱۸۹/۳۳۸ ^{**}	۵۶۱۶۹/۰۱۰ ^{**}	۷۳۹۷۴/۹۳۴ ^{**}	۱۵/۸۴۰ [*]	۸/۵۵۶ [*]
خطای (الف)	۲	۰/۹۳۲	۰/۷۳۲	۵۳۶/۳۹۶	۴۷۷/۱۳۸	۱/۱۸۵	۰/۳۰۶
سیلیکون	۱	۴۶/۹۲۳ ^{**}	۲۹/۵۹۴ ^{**}	۴۰۹۶/۰۰۱ ^{**}	۵۷۶۸/۴۰۳ ^{ns}	۱/۵۱۳ ^{ns}	۱/۶۰۰ ^{**}
کود نیتروژن (کود)	۲	۱۴۵/۴۰۲ ^{**}	۹۰/۵۸۷ ^{**}	۵۷۳۵۴/۴۰۹ ^{**}	۵۳۶۳۳/۴۰۱ ^{**}	۴/۳۹۸ ^{**}	۶/۵۸۹ ^{**}
آبیاری × سیلیکون	۱	۴۳/۶۹۲ ^{**}	۱۲/۴۶۱ ^{**}	۲۷۰۷/۴۶۸ [*]	۳۵۹۸/۰۰۱ ^{**}	۳/۲۴۰ [*]	۰/۶۹۷ [*]
آبیاری × کود	۲	۱۷/۲۷۳ ^{**}	۲۶/۱۳۰ ^{**}	۱۲۵۸۴/۴۲۶ ^{**}	۱۷۲۳۲/۱۳۴ ^{**}	۰/۰۳۱ ^{ns}	۰/۴۴۶ ^{ns}
سیلیکون × کود	۲	۱/۸۶۵ ^{ns}	۰/۳۸۰ ^{ns}	۴۲/۴۲۶ ^{ns}	۱۶۸/۰۵۱ ^{ns}	۰/۳۰۴ ^{ns}	۰/۰۸۴ ^{ns}
آبیاری × سیلیکون × کود	۲	۱/۲۶۹ ^{ns}	۰/۸۹۵ ^{ns}	۱۶/۸۴۲ ^{ns}	۸۲/۰۵۰ ^{ns}	۰/۳۴۵ ^{ns}	۰/۲۲۷ ^{ns}
خطای (ب)	۲۰	۰/۶۹۰	۰/۲۷۴	۳۷۸/۵۵۷	۴۲۲/۷۶۲	۰/۴۲۶	۰/۱۳۲
ضریب تغییرات (%)		۷/۹۲	۶/۶۹	۷/۲۳	۸/۳۹	۱۰/۵۵	۷/۷۷

* و **: به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، ns: غیر معنی‌داری

ادامه جدول ۳-

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				عملکرد دانه
		محتوای نسبی آب برگ		کارایی مصرف آب لحظه‌ای		
		مرحله شیری	مرحله خمیری نرم	مرحله شیری	مرحله خمیری نرم	
تکرار	۲	۳۸/۸۳۰ ^{ns}	۶۹/۱۸۸ ^{ns}	۰/۰۵۷ ^{ns}	۰/۰۰۷ ^{ns}	۸۹۳/۷۶۲ ^{ns}
رژیم آبیاری (آبیاری)	۱	۲۱۰۸/۳۴۰ ^{**}	۲۲۸۴/۸۴۰ ^{**}	۱/۵۶۷ ^{**}	۳/۳۴۹ ^{**}	۲۸۰۱۹۳/۷۷۸ ^{**}
خطای (الف)	۲	۵۰/۷۶۷	۵۶/۱۹۰	۰/۰۴۶	۰/۰۶۳	۱۶۱/۲۲۷
سیلیکون	۱	۱۹۷/۴۰۳ [*]	۲۰۶/۴۰۱ [*]	۰/۹۰۶ ^{**}	۰/۸۳۴ ^{**}	۱۴۰۷۳/۸۶۸ ^{**}
کود نیتروژن (کود)	۲	۱۳۵/۳۵۹ [*]	۱۲۹/۱۰۵ ^{ns}	۲/۱۳۹ ^{**}	۱/۷۲۰ ^{**}	۴۰۶۲۵۷/۹۴۴ ^{**}
آبیاری × سیلیکون	۱	۱۳۸/۰۶۳ ^{ns}	۱۹۴/۱۳۸ [*]	۰/۵۲۶ ^{**}	۰/۴۹۵ ^{**}	۱۰۸۹۹/۳۶۰ [*]
آبیاری × کود	۲	۱۹۹/۰۳۵ [*]	۱۳۴/۶۶۱ [*]	۰/۲۱۵ ^{**}	۰/۴۰۳ ^{**}	۵۶۷۱۰/۵۰۲ ^{**}
سیلیکون × کود	۲	۱/۰۰۸ ^{ns}	۴/۴۹۴ ^{ns}	۰/۰۷۷ ^{ns}	۰/۰۲۵ ^{ns}	۳۷۷/۰۶۷ ^{ns}
آبیاری × سیلیکون × کود	۲	۱/۴۱۱ ^{ns}	۵/۷۱۰ ^{ns}	۰/۰۰۷ ^{ns}	۰/۰۱۱ ^{ns}	۸۱۹/۹۹۸ ^{ns}
خطای (ب)	۲۰	۳۵/۲۸۰	۳۸/۲۷۲	۰/۰۳۰	۰/۰۳۵	۱۶۷۷/۹۵۹
ضریب تغییرات (%)		۷/۶۹	۹/۳۸	۱۰/۴۷	۱۱/۶۹	۹/۹۶

* و **: به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، ns: غیر معنی‌داری

شدند. رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel صورت گرفت.

نتایج و بحث

فتوستز برگ: با نمو گیاه از مرحله‌ی شیری به مرحله‌ی خمیری نرم میزان فتوستز برگ پرچم در شرایط مطلوب و تنش آبی کاهش یافت (جدول ۳). کاهش میزان فتوستز با پیشرفت مراحل نمو گیاه که در این آزمایش مشاهده شد، احتمالاً مربوط به کاهش توان فتوستزی گیاه همروند با پیشرفت فرآیند پیری است و با یافته‌های Shabani و همکاران (۲۰۱۳) در مورد گیاه کلزا و Ahmadi و همکاران (۲۰۱۰) در مورد گیاه سیب زمینی مطابقت داشت.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهم‌کنش رژیم آبیاری $\times$ کود نیتروژن در مراحل شیری و خمیری نرم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین میزان فتوستز (۱۶/۴۹ و ۱۳/۸۷ به ترتیب در مراحل شیری و خمیری نرم) در تیمار آبیاری مطلوب و بالاترین سطح کود نیتروژن و کمترین میزان فتوستز (۵/۲۱ و ۳/۹۰ به ترتیب در مراحل شیری و خمیری نرم) در تیمار تنش آبی و عدم استفاده از کود نیتروژن (شاهد) مشاهده شد (جدول ۴). همچنین، اثر متقابل نشان داد که در هر دو مرحله‌ی نمو کاربرد کود نیتروژن در شرایط مطلوب رطوبتی سبب افزایش میزان فتوستز تا سطح ۱۵۰ کیلوگرم بر هکتار شد. اما، در شرایط تنش آبی، کود نیتروژن فقط تا سطح ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار میزان فتوستز را افزود (جدول ۴). اثر مثبت کاربرد سطوح بالای کود نیتروژن بر میزان فتوستز توسط سایر پژوهشگران (Shangguan et al., 2000; Lawlor et al., 1988) نیز به اثبات رسیده است.

بررسی این اثر متقابل از منظری دیگر، نشان داد که در هر دو مرحله‌ی نمو، تنش آبی میزان فتوستز برگ پرچم را به طور معنی‌داری کاهش داد. اما، این کاهش در سطوح مختلف کود نیتروژن متفاوت بود (۳۳، ۲۹ و ۴۴ درصد کاهش در مرحله‌ی شیری و ۳۱، ۴۱ و ۵۵ درصد کاهش در مرحله‌ی خمیری نرم به ترتیب در شاهد، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن

بر هکتار) که در هر دو مرحله بیشترین کاهش در بالاترین سطح کود نیتروژن رخ داد (جدول ۴). همروند با نتایج این پژوهش، برخی دیگر از مطالعات نیز نشان داده‌اند که تنش آبی سبب کاهش فتوستز در گیاه جو (Wall et al., 2011) و گندم (Shangguan et al., 2000) شده است. کاهش بیشتر مقدار فتوستز به واسطه‌ی تنش آبی در بالاترین سطح کود نیتروژن در مقایسه با کاربرد کمتر نیتروژن، نشان داد که گیاهانی که کود نیتروژن زیادی دریافت کرده‌اند، حساسیت بیشتری به تنش خشکی داشتند. کاهش بیشتر میزان فتوستز به واسطه‌ی تنش آبی نسبت شرایط مطلوب رطوبتی با کاربرد بالاترین سطح کود نیتروژن در این آزمایش، با نتایج Karrou و Maranville (۱۹۹۵) در مورد گندم مطابقت داشت. در همین راستا، Frederick و Camberato (۱۹۹۴) نشان دادند که کاربرد سطوح بالای کود نیتروژن در شرایط کمبود آب سبب تشدید تنش آبی به واسطه‌ی افزایش شاخص سطح برگ گندم و تخلیه‌ی سریعتر نیم‌رخ خاک از رطوبت شد. افزایش شدت تنش در سطوح بالای کود نیتروژن سبب کاهش بیشتر میزان فتوستز در دوره‌ی پر شدن دانه و در نهایت کاهش وزن دانه‌ها شده و می‌تواند عملکرد نهایی دانه را متاثر کند.

بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) برهم‌کنش رژیم آبیاری $\times$ سیلیکون در مرحله‌ی شیری و خمیری نرم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. در شرایط مطلوب رطوبتی، کاربرد سیلیکون سبب افزایش میزان فتوستز در مرحله‌ی شیری (۱ درصد) و خمیری نرم (۷ درصد) نسبت به عدم کاربرد آن شد. اما، این افزایش فقط در مرحله‌ی خمیری نرم معنی‌دار بود. همچنین، کاربرد سیلیکون میزان فتوستز را در شرایط تنش آبی به‌طور معنی‌دار و به میزان ۷۶ و ۷۴ درصد به ترتیب در مراحل شیری و خمیری نرم نسبت به شرایط عدم کاربرد سیلیکون افزود (جدول ۵). نمایی دیگر از برهم‌کنش رژیم آبیاری $\times$ سیلیکون نشان داد که، تنش آبی میزان فتوستز را در شرایط کاربرد و عدم کاربرد سیلیکون در هر دو مرحله‌ی نمو به‌طور معنی‌دار کاهش داد. اما، این

جدول ۴- اثر برهم کنش رژیم آبیاری × کود نیتروژن بر فتوستتز، هدایت روزنه ای، محتوای نسبی آب برگ پرچم و کارایی مصرف آب لحظه ای تربیتکاله

رژیم آبیاری	کود نیتروژن (کیلوگرم بر هکتار)	فتوستتز (میکرومول بر مترمربع بر ثانیه)		هدایت روزنه ای (میلی مول بر مترمربع بر ثانیه)		محتوای نسبی آب برگ پرچم (درصد)		کارایی مصرف آب لحظه ای (میلی مول بر مول)	
		مرحله	مرحله	مرحله	مرحله	مرحله	مرحله	مرحله	مرحله
بدون	۰	۷/۷۸ ^d	۵/۶۲ ^d	۲۰۸ ^d	۱۸۹ ^d	۸۴/۳ ^a	۷۳/۳ ^a	۱/۲۶ ^d	۱/۳۳ ^c
تنش	۱۰۰	۱۴/۱۶ ^b	۱۰/۸۷ ^b	۳۱۴ ^b	۲۹۱ ^b	۸۴/۶ ^a	۷۴/۴ ^a	۲/۰۵ ^{ab}	۲/۱۰ ^a
آبی	۱۵۰	۱۶/۴۹ ^a	۱۳/۸۷ ^a	۴۰۵ ^a	۳۹۲ ^a	۸۵/۷ ^a	۷۴/۰ ^a	۲/۲۵ ^a	۲/۳۰ ^a
با تنش	۰	۵/۲۱ ^e	۳/۹۰ ^e	۱۷۹ ^e	۱۵۶ ^e	۷۴/۸ ^b	۶۱/۵ ^b	۱/۰۶ ^d	۱/۰۱ ^d
آبی	۱۰۰	۱۰/۰۸ ^c	۶/۴۵ ^c	۲۵۸ ^c	۲۲۹ ^c	۷۲/۸ ^b	۶۲/۱ ^b	۱/۷۲ ^{bc}	۱/۶۱ ^b
آبی	۱۵۰	۹/۲۲ ^{cd}	۶/۲۵ ^{cd}	۲۵۳ ^c	۲۱۵ ^c	۶۱/۱ ^c	۵۰/۴ ^c	۱/۵۳ ^c	۱/۲۷ ^c

میانگین های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون چند دامنه ای دانکن اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

جدول ۵- اثر برهم کنش رژیم آبیاری × سیلیکون بر فتوستتز، هدایت روزنه ای، محتوای نسبی آب برگ پرچم و تعرق تربیتکاله

رژیم آبیاری	کاربرد سیلیکون	فتوستتز (میکرومول بر مترمربع بر ثانیه)		هدایت روزنه ای (میلی مول بر مترمربع بر ثانیه)		محتوای نسبی آب برگ پرچم (درصد)		تعرق (میلی مول بر مترمربع بر ثانیه)	
		مرحله	مرحله	مرحله	مرحله	مرحله	مرحله	مرحله	مرحله
بدون	بدون سیلیکون	۱۲/۷۷ ^a	۹/۸۰ ^b	۳۰۷ ^a	۲۸۸ ^a	۸۴/۵ ^a	۷۴/۰ ^a	۶/۹۴ ^a	۵/۰۹ ^a
تنش آبی	با سیلیکون	۱۲/۸۵ ^a	۱۰/۴۴ ^a	۳۱۱ ^a	۲۹۳ ^a	۸۵/۳ ^a	۷۴/۰ ^a	۶/۷۵ ^a	۵/۲۳ ^a
با تنش	بدون سیلیکون	۵/۹۲ ^c	۴/۰۴ ^d	۲۱۰ ^c	۱۷۷ ^c	۶۵/۳ ^c	۵۳/۳ ^c	۵/۰۱ ^c	۳/۸۳ ^c
آبی	با سیلیکون	۱۰/۴۱ ^b	۷/۰۳ ^c	۲۴۹ ^b	۲۲۲ ^b	۷۳/۹ ^b	۶۲/۷ ^b	۶/۰۲ ^b	۴/۵۳ ^b

میانگین های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون چند دامنه ای دانکن اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

کاربرد سیلیکون میزان فتوستتز را در شرایط مطلوب رطوبتی و به ویژه در مرحله ی خمیری نرم نیز افزود.

هدایت روزنه ای: میزان هدایت روزنه ای برگ پرچم با پیشرفت مراحل رشدی گیاه از شیری به خمیری نرم کاهش یافت. اما، این کاهش در شرایط با تنش آبی (میانگین شرایط با کاربرد و بدون کاربرد سیلیکون، ۱۴ درصد) بیشتر از شرایط بدون تنش آبی (میانگین شرایط با کاربرد و بدون کاربرد سیلیکون، ۶ درصد) بود. همچنین، در شرایط تنش آبی و بدون کاربرد سیلیکون میزان کاهش (۱۶ درصد) بیشتر از شرایط

کاهش در شرایط عدم کاربرد سیلیکون بیشتر (۵۴ و ۵۹ درصد به ترتیب در مراحل شیری و خمیری نرم) از شرایط با کاربرد سیلیکون (۱۹ و ۳۳ درصد به ترتیب در مراحل شیری و خمیری نرم) بود (جدول ۵). افزایش بیشتر میزان فتوستتز به واسطه ی کاربرد سیلیکون نسبت به عدم کاربرد آن در شرایط تنش آبی، نشان دهنده ی کاهش اثرات تنش بر میزان فتوستتز در صورت کاربرد سیلیکون است که با یافته های Chen و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت داشت. اما، بر خلاف یافته های Hattori و همکاران (۲۰۰۵) در مورد گیاه سورگوم، در آزمایش حاضر،

جدول ۶- همبستگی بین عملکرد دانه (گرم بر مترمربع)، فتوستتز (میکرومول بر مترمربع بر ثانیه)، هدایت روزنه‌ای (میلی مول بر مترمربع بر ثانیه)، تعرق (میلی مول بر مترمربع بر ثانیه)، کارایی مصرف آب لحظه‌ای (میلی مول بر مول) و محتوای نسبی آب برگ پرچم (درصد).

صفات	عملکرد دانه	فتوستتز	هدایت روزنه‌ای	تعرق	کارایی مصرف آب
فتوستتز (میکرومول بر متر مربع بر ثانیه)	۰/۹۵۳**				
هدایت روزنه‌ای (میلی مول بر متر مربع بر ثانیه)	۰/۹۸۶**	۰/۹۵۳**			
مرحله شیری	۰/۸۲۸**	۰/۹۱۳**	۰/۸۵۳**		
تعرق (میلی مول بر متر مربع بر ثانیه)	۰/۹۳۹**	۰/۹۸۴**	۰/۹۲۲**	۰/۸۵۰**	
کارایی مصرف آب لحظه‌ای (میلی مول بر مول)	۰/۳۶۹	۰/۵۲۹	۰/۴۳۶	۰/۶۱۱*	۰/۴۵۲
محتوای نسبی آب برگ پرچم (درصد)					
فتوستتز (میکرومول بر متر مربع بر ثانیه)	۰/۹۴۸**				
هدایت روزنه‌ای (میلی مول بر متر مربع بر ثانیه)	۰/۹۷۳**	۰/۹۷۷**			
مرحله خمیری نرم	۰/۸۸۲**	۰/۹۴۱**	۰/۹۱۱**		
تعرق (میلی مول بر متر مربع بر ثانیه)	۰/۹۱۸**	۰/۹۶۷**	۰/۹۳۰**	۰/۸۵۳**	
کارایی مصرف آب لحظه‌ای (میلی مول بر مول)	۰/۴۱۴	۰/۶۲۱*	۰/۵۳۵	۰/۴۵۱	۰/۶۷۶*
محتوای نسبی آب برگ پرچم (درصد)					

** همبستگی معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد، * همبستگی معنی دار در سطح ۵ درصد

ریشه‌ها و استمرار جذب آب در مراحل انتهایی رشد گیاه باشد، که البته فهم دقیق آن نیازمند پژوهش‌های بیشتر است.

هدایت روزنه‌ای برگ پرچم به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد در مراحل شیری و خمیری نرم تحت تاثیر برهم‌کنش رژیم آبیاری $\times$ کود نیتروژن قرار گرفت (جدول ۳). این برهم‌کنش، در هر دو مرحله از رشد، نشان داد که در شرایط مطلوب رطوبتی هدایت روزنه‌ای تا سطح ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار به‌طور معنی‌دار افزایش یافت. در مقابل، در شرایط تنش آبی این افزایش فقط تا سطح ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار معنی‌دار بود (جدول ۴). همچنین، این برهم‌کنش نشان داد که تنش آبی هدایت روزنه‌ای را در تمام سطوح کود نیتروژن کاهش داد. اما، میزان کاهش تابعی از سطح کود نیتروژن مورد استفاده بود (۱۴، ۱۸ و ۳۸ درصد کاهش در مرحله‌ی شیری و ۱۸، ۲۱ و ۴۵ درصد کاهش در مرحله‌ی خمیری نرم به‌ترتیب در شاهد، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار) (جدول ۴).

کاهش هدایت روزنه‌ای به‌واسطه‌ی تنش آبی که در این پژوهش مشاهده شد با یافته‌های سایر محققین (Wall et al.,

تنش آبی و با کاربرد سیلیکون (۱۱ درصد) بود (جدول ۵). کاهش میزان هدایت روزنه‌ای در طول مراحل رشدی تربیتکاله با یافته‌های Ahmadi و همکاران (۲۰۱۰) در مورد گیاه سیب زمینی و Shabani و همکاران (۲۰۱۳) در مورد گیاه کلزا مطابقت داشت. احتمالاً، این روند کاهشی میزان هدایت روزنه‌ای برگ با پیشرفت مراحل فنولوژیک گیاه در انتهای فصل رشد که در شرایط تنش آبی نیز تشدید شد، مربوط به کاهش توان ریشه‌ها در جذب آب به‌واسطه‌ی پیری آنها و افزایش تولید آبسزیک اسید به‌ویژه در شرایط تنش آبی بود. این کاهش جذب آب سبب کاهش محتوای نسبی آب برگ شده و به همراه اثرات آبسزیک اسید بر روزنه‌ها، بسته شدن روزنه‌ها را سبب شده است. به‌علاوه، در آزمایش حاضر، محتوای نسبی آب برگ همبستگی مثبت با هدایت روزنه‌ای (۰/۴۳۶) در مرحله‌ی شیری و ۰/۵۳۵ در مرحله‌ی خمیری نرم) نشان داد (جدول ۶). کاهش کمتر میزان هدایت روزنه‌ای با پیشرفت مراحل فنولوژیک گیاه در شرایط استفاده از سیلیکون ممکن است به‌علت اثرات مثبت سیلیکون در کاهش روند پیری

کاهش فتوسنتز به علت کاهش تولید هورمون سیتوکاینین در ریشه‌ها در شرایط تنش آبی است که با تجمع آبسزیک اسید در سلول‌های محافظ روزنه تشدید می‌شود (Blackman and Davies, 1985). همروند با نتایج این پژوهش، بسیاری از محققین اثر مثبت تغذیه با کود نیتروژن بر هدایت روزنه‌ای و میزان فتوسنتز گندم را نشان داده‌اند (Shangguan et al., 2000; Fredrick and Camberato, 1995). اما، همانطور که نتایج این پژوهش در مورد تربیتکاله نشان داد، اثر تغذیه با کود نیتروژن از تنش آبی متاثر شد. Radin و Boyer (۱۹۸۲) گزارش کردند که غلظت نیتروژن در گیاه، وضعیت آب گیاه را در شرایط تنش آبی دستخوش تغییر می‌کند. در واقع Radin و Parker (۱۹۷۹) در آزمایشی بر روی پنبه نتیجه‌گیری کردند که گیاهانی که غلظت نیتروژن کمی داشتند ویژگی‌های مقاومت به خشکی را نشان دادند. همچنین، Morgan (۱۹۸۶) اثبات کرد که هدایت روزنه‌ای برگ گیاهانی که کود نیتروژن کمتری دریافت کرده‌اند نسبت به گیاهانی که کود نیتروژنه زیادی دریافت کرده‌اند، کمتر تحت تاثیر پتانسیل آب برگ قرار گرفتند. این محقق نشان داد که کمبود نیتروژن در گیاه سبب تغییراتی در آناتومی برگ و سختی بیشتر دیواره سلولی شده و سبب افزایش محتوای نسبی آب برگ در پتانسیل آب کمتر می‌شود. افزایش ضخامت دیواره سلولی در شرایط استفاده از سطوح پایین کود نیتروژن را سایر پژوهشگران (Barker, 2016) نیز گزارش کرده‌اند.

اثر برهم‌کنش رژیم آبیاری $\times$ سیلیکون بر هدایت روزنه‌ای برگ پرچم در مرحله‌ی شیری و خمیری نرم به ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). کاربرد سیلیکون در شرایط مطلوب رطوبتی سبب افزایش جزئی در هدایت روزنه‌ای شد. اما، در شرایط تنش آبی، کاربرد سیلیکون هدایت روزنه‌ای را در مراحل شیری و خمیری نرم به‌طور معنی‌دار و به ترتیب به مقدار ۱۹ و ۲۵ درصد افزود (جدول ۵). بررسی این برهم‌کنش از منظری دیگر نشان داد که تنش آبی سبب کاهش معنی‌دار هدایت روزنه‌ای در شرایط کاربرد و عدم

کاربرد سیلیکون در هر دو مرحله‌ی رشدی شد. اما، این کاهش در شرایط کاربرد سیلیکون کمتر از شرایط عدم کاربرد آن بود (۳۲ و ۳۹ درصد کاهش در شرایط عدم کاربرد سیلیکون به ترتیب در مراحل شیری و خمیری نرم و ۲۰ و ۲۴ درصد کاهش در شرایط کاربرد سیلیکون به ترتیب در مراحل شیری و خمیری نرم) (جدول ۵).

کاهش کمتر هدایت روزنه‌ای به واسطه‌ی تنش آبی در شرایط کاربرد سیلیکون را برخی دیگر از محققین در مورد سورگوم (Hattori et al., 2005) و فلفل (Lobato et al., 2009) نیز اثبات کرده‌اند. همچنین، Gong و Chen (۲۰۱۲) گزارش کردند که کاربرد سیلیکون نسبت به عدم کاربرد آن، سبب افزایش هدایت روزنه‌ای گندم در شرایط تنش آبی شد. Hattori و همکاران (۲۰۰۷) اثبات کردند که کاربرد سیلیکون باعث تسهیل جذب آب و انتقال آن در شرایط تنش آبی خواهد شد. بنابراین، احتمالاً، بهبود وضعیت آبی گیاه سبب تداوم هدایت روزنه‌ای در شرایط تنش آبی می‌شود. در آزمایش حاضر نیز همبستگی هدایت روزنه‌ای و محتوای نسبی آب برگ مثبت بود (جدول ۶).

تعرق

با پیشرفت رشد گیاه از مرحله‌ی شیری به خمیری، میزان تعرق برگ پرچم در همه‌ی تیمارها کاهش یافت، که این کاهش همروند با کاهش هدایت روزنه‌ای بود (جدول ۵). همروند بودن تغییرات هدایت روزنه‌ای و میزان تعرق را برخی دیگر از محققین (Gong and Chen, 2012) نیز گزارش کرده‌اند. در آزمایش حاضر نیز این دو صفت دارای همبستگی مثبت در مراحل شیری و خمیری نرم بودند (جدول ۶).

جدول تجزیه واریانس نشان داد که میزان تعرق در مرحله‌ی شیری و خمیری نرم به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد از کاربرد کود نیتروژن متاثر شد (جدول ۳). استفاده از کود نیتروژن سبب افزایش معنی‌دار میزان تعرق تا سطح ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار به ترتیب در مرحله‌ی شیری و خمیری نرم شد (جدول ۷). برخی دیگر از پژوهشگران (Shangguan et al., 2000) نیز اثرات مثبت نیتروژن بر هدایت

جدول ۷- اثر رژیم آبیاری، کود نیتروژن و سیلیکون بر تعلق در مراحل شیری و خمیری نرم تربیتکاله

تعلق		
(میلی مول بر مترمربع بر ثانیه)		
رژیم آبیاری	مرحله شیری	مرحله خمیری نرم
بدون تنش آبی	۶/۸۵ ^a	۵/۱۶ ^a
با تنش آبی	۵/۵۲ ^a	۴/۱۸ ^b
کود نیتروژن (کیلوگرم بر هکتار)		
۰	۵/۴۹ ^b	۳/۹۸ ^c
۱۰۰	۶/۴۳ ^a	۴/۵۹ ^b
۱۵۰	۶/۶۳ ^a	۵/۴۵ ^a
کاربرد سیلیکون		
بدون سیلیکون	۵/۹۸ ^a	۴/۴۶ ^b
با سیلیکون	۶/۳۹ ^a	۴/۸۸ ^a

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

روزنه‌ای و تعلق را نشان داده‌اند. همچنین، جدول تجزیه واریانس نشان داد که میزان تعلق در هر دو مرحله از رشد به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد تحت تاثیر برهم‌کنش رژیم آبیاری $\times$ سیلیکون قرار گرفت (جدول ۳). تنش آبی سبب کاهش میزان تعلق در شرایط کاربرد و عدم کاربرد سیلیکون شد. اما، مقدار این کاهش در شرایط کاربرد سیلیکون کمتر (۱۱ و ۱۳ درصد به‌ترتیب در مرحله‌ی شیری و خمیری نرم) از شرایط عدم کاربرد سیلیکون (۲۸ و ۲۵ درصد به‌ترتیب در مرحله‌ی شیری و خمیری نرم) بود (جدول ۵). Gong و Chen (۲۰۱۲) نیز با انجام پژوهشی بر روی گندم نشان دادند که در شرایط تنش آبی و کاربرد سیلیکون میزان تعلق بیش از شرایط عدم کاربرد آن بود. بر اساس نتایج آزمایش حاضر، این افزایش را می‌توان به بالا بودن میزان هدایت روزنه‌ای با کاربرد سیلیکون در شرایط تنش آبی مرتبط دانست.

کارایی مصرف آب لحظه‌ای

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که کارایی استفاده از آب لحظه‌ای به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد تحت تاثیر برهم‌کنش رژیم آبیاری $\times$ کود نیتروژن در مرحله‌ی شیری و خمیری نرم قرار گرفت (جدول ۳). این برهم‌کنش

نشان داد که کاربرد کود نیتروژن سبب افزایش معنی‌دار مقدار کارایی استفاده از آب در هر دو شرایط رطوبتی و هر دو مرحله‌ی رشدی نسبت به شاهد شد (جدول ۴). روند افزایشی این صفت در شرایط مطلوب رطوبتی تا بالاترین سطح کود نیتروژن ادامه یافت. اما، در شرایط تنش رطوبتی، پس از افزایش کارایی استفاده از آب تا سطح ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار، با افزایش مقدار کود نیتروژن روندی کاهشی را نشان داد (جدول ۴). اثرات مثبت کاربرد کود نیتروژن بر کارایی استفاده از آب لحظه‌ای در شرایط مطلوب رطوبتی با یافته‌های Shangguan و همکاران (۲۰۰۴) مطابقت داشت. همچنین، این برهم‌کنش نشان داد که تنش آبی سبب کاهش کارایی استفاده از آب در همه‌ی سطوح کود نیتروژن شد. اما، این کاهش در سطوح مختلف کود نیتروژن متفاوت بود (۱۶، ۱۶ و ۳۹ درصد کاهش در مرحله‌ی شیری و ۲۴، ۲۳ و ۴۵ درصد کاهش در مرحله‌ی خمیری نرم به‌ترتیب در شاهد، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار) (جدول ۴).

میانگین مقدار کارایی استفاده از آب لحظه‌ای تربیتکاله در آزمایش حاضر (۱/۶۵ و ۱/۶۰ میلی مول بر مول) به‌ترتیب در مراحل شیری و خمیری نرم کمتر از مقدارهای

گزارش شده توسط Shangguan و همکاران (۲۰۰۴) در مورد گندم بود. اگرچه برخی از محققین (Zhang et al., 2006) نشان داده‌اند که در شرایط کم آبیاری مقدار کارایی استفاده از آب افزایش می‌یابد، اما، در آزمایش حاضر تنش آبی سبب کاهش کارایی استفاده از آب لحظه‌ای شد. این تعارض در رابطه با اثر تنش آبی بر کارایی استفاده از آب در پژوهش‌های مختلف ممکن است به شدت تنش وابسته باشد. در این رابطه، Barati و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که کارایی استفاده از آب گیاه جو در شرایط تنش‌های ملایم نسبت به شرایط مطلوب رطوبتی افزایش و با اعمال تنش‌های شدید کاهش یافت.

کاهش بیشتر کارایی استفاده از آب لحظه‌ای به واسطه‌ی تنش آبی در شرایط استفاده از بالاترین سطح کود نیتروژن در آزمایش حاضر، یافته‌های Van Herwaarden و همکاران (۱۹۹۸) را تایید می‌کند. این محققین نشان دادند که تنش آبی انتهای فصل، کارایی استفاده از آب بوته‌های گندمی که با ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار تیمار شده بودند را بیشتر از تیمار عدم کاربرد کود نیتروژن کاهش داد. آنها اظهار داشتند که گیاهانی که کود نیتروژن بیشتری دریافت کرده‌اند، اندام‌های رویشی بیشتری تولید می‌کنند و بنابراین با سرعت بیشتری آب را از نیم رخ خاک خارج کرده و گیاهان را با تنش انتهایی شدیدتری روبرو می‌کنند. در چنین شرایطی، میزان فتوسنتز و انتقال مجدد مواد پرورده (Barati and Ghadiri, 2017) نیز کاهش شدیدتری نسبت به شرایط عدم استفاده از کود نیتروژن خواهند یافت و در نتیجه کارایی استفاده از آب نسبت به شرایط شاهد (عدم کاربرد نیتروژن) کاهش بیشتری می‌یابد.

برهم‌کنش رژیم آبیاری $\times$ سیلیکون در مراحل شیری و خمیری نرم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). این برهم‌کنش نشان داد که تنش آبی سبب کاهش کارایی استفاده از آب در شرایط کاربرد سیلیکون و عدم کاربرد آن در هر دو مرحله‌ی رشدی شد. اما، این کاهش در شرایط کاربرد سیلیکون کمتر (۹ و ۲۰ درصد به ترتیب در مرحله‌ی شیری و خمیری نرم) از شرایط عدم استفاده از سیلیکون (۳۶ و ۴۵

درصد به ترتیب در مرحله‌ی شیری و خمیری نرم) بود (شکل ۱).

کاهش کمتر کارایی استفاده از آب به واسطه‌ی تنش آبی در شرایط کاربرد سیلیکون را می‌توان به کاهش شدت تنش در گیاهان دریافت‌کننده‌ی سیلیکون نسبت داد. در این رابطه، Yin و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که کاربرد سیلیکون سبب افزایش رشد ریشه و افزایش جذب آب در گیاه سورگوم و در نتیجه کاهش شدت تنش در این گیاه شد. در آزمایش حاضر، وضعیت بهتر آبی گیاه در شرایط تنش آبی به واسطه‌ی کاربرد سیلیکون، احتمالاً، سبب تاخیر در فرایند پیری و تداوم هدایت روزنه‌ای و تثبیت دی‌اکسیدکربن نسبت به شرایط عدم کاربرد سیلیکون شد. در چنین شرایطی، هرچند که میزان تثبیت دی اکسید کربن به واسطه‌ی تنش کاهش می‌یابد، اما به نظر می‌رسد که میزان کاهش آن کمتر از میزان کاهش تعرق خواهد بود و در نتیجه کارایی استفاده از آب کاهش کمتری می‌یابد. در تایید این نتایج، Ritchie (۱۹۸۳) نیز گزارش کردند که در شرایط تنش اگرچه فتوسنتز و تعرق هر دو کاهش می‌یابند، اما، کاهش تعرق بیشتر از کاهش فتوسنتز است و بنابراین، کارایی استفاده از آب افزایش می‌یابد.

محتوای نسبی آب برگ

محتوای نسبی آب برگ پرچم به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد در مراحل شیری و خمیری نرم تحت تاثیر برهم‌کنش رژیم آبیاری $\times$ کود نیتروژن قرار گرفت (جدول ۳). این صفت روندی کاهشی از مرحله‌ی شیری به مرحله‌ی خمیری نرم نشان داد (جدول ۴ و ۵). Huseynova و همکاران (۲۰۱۲) نیز گزارش کردند که محتوای نسبی آب برگ‌های گندم از مرحله‌ی گلدهی تا رسیدگی کاهش می‌یابد و این روند در شرایط تنش آبی به واسطه‌ی تشدید فرآیند پیری تسریع می‌شود.

در هر دو مرحله از رشد، برهم‌کنش رژیم آبیاری و کود نیتروژن نشان داد که کاربرد کود نیتروژن در شرایط مطلوب رطوبتی باعث افزایش جزئی و غیر معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ پرچم شد. اما، در شرایط تنش آبی، کاربرد کود نیتروژن

کاهش آن را سبب شد، که این کاهش در بالاترین سطح کود نیتروژن نسبت به شاهد معنی‌دار بود (جدول ۴). همچنین، در هر دو مرحله از رشد، تنش آبی سبب کاهش محتوای نسبی آب برگ پرچم شد. اما، بیشترین مقدار کاهش در بالاترین سطح کود نیتروژن در مراحل شیری (۲۹ درصد) و خمیری نرم (۳۲ درصد) رخ داد (جدول ۴). همروند با نتایج این پژوهش Karrou و Maranville (۱۹۹۵) نیز نشان دادند که تنش آبی سبب کاهش محتوای نسبی آب برگ گندم شد و این کاهش در بالاترین سطح کود نیتروژن بیشترین مقدار بود.

جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر برهم‌کنش رژیم آبیاری $\times$ سیلیکون بر محتوای نسبی آب برگ پرچم در سطح احتمال ۰/۰۶۱۸ در مرحله‌ی شیری و در سطح احتمال پنج درصد در مرحله‌ی خمیری نرم معنی‌دار بود (جدول ۳). در هر دو مرحله از رشد، کاربرد سیلیکون در شرایط مطلوب رطوبتی تاثیر معنی‌داری بر این صفت نداشت. اما، در شرایط تنش آبی، سبب افزایش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ پرچم در مرحله‌ی شیری (۱۳ درصد) و خمیری نرم (۱۸ درصد) نسبت به عدم کاربرد سیلیکون شد. این برهم‌کنش از نمایی دیگر نشان داد که، تنش آبی در هر دو مرحله از رشد، سبب کاهش محتوای نسبی آب برگ پرچم در شرایط کاربرد و عدم کاربرد سیلیکون شد. اما، در هر دو مرحله‌ی رشدی، این کاهش در شرایط کاربرد سیلیکون کمتر از شرایط عدم کاربرد سیلیکون بود (۲۳ و ۱۴ درصد کاهش به‌ترتیب در شرایط عدم کاربرد و کاربرد سیلیکون در مرحله‌ی شیری و ۲۸ و ۱۵ درصد کاهش به‌ترتیب در شرایط عدم کاربرد و کاربرد سیلیکون در مرحله‌ی خمیری نرم) (جدول ۵).

تنش آبی غشای پلاسمایی و سایر غشاهای درونی را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Agarie et al., 1998). برخی از محققین Liang و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که در شرایط تنش آبی بوته‌های گندم دچار تخریب غشای سلولی شده و نهایتاً پلاسمولیز رخ می‌دهد. این پدیده سبب حذف یا کاهش مکانیسم‌های سلولی در برابر از دست دادن آب شده و در نهایت تعرق را افزایش و به‌طور مشخص محتوای نسبی آب

برگ را کاهش خواهد داد. Pei و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که کاربرد سیلیکون سبب حفظ یکپارچگی غشای سلولی در گیاه گندم شد. در همین راستا، Liang و همکاران (۲۰۱۵) اثبات کرد که در برگ‌های گندمی که با سیلیکون تیمار شده بودند، مقدار پلاسمولیز نسبت به شرایط عدم استفاده از سیلیکون کاهش یافت. فرض دیگری که ممکن است در توجیه کاهش کمتر محتوای نسبی آب برگ با کاربرد سیلیکون در شرایط تنش خشکی نسبت به شرایط نرمال وجود داشته باشد، اثرات مثبت سیلیکون در جذب بیشتر آب است. در این راستا Hattori و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که کاربرد سیلیکون می‌تواند جذب و انتقال آب را در گیاه در شرایط تنش خشکی افزایش داده و سبب بهبود وضعیت آبی گیاه شود.

عملکرد دانه

عملکرد دانه همبستگی مثبت با فتوستتزی و صفات وابسته به آن در مرحله‌ی شیری و خمیری نرم داشت (جدول ۶) که نشان‌دهنده‌ی نقش پررنگ فتوستتزی جاری برگ پرچم در شکل‌گیری وزن دانه‌ها و نهایتاً عملکرد دانه تربیتکاله در شرایط آزمایش حاضر بود. بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس، برهم‌کنش رژیم آبیاری $\times$ کود نیتروژن بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). این برهم‌کنش نشان داد که، تنش آبی انتهای فصل عملکرد دانه را در تمامی سطوح کود نیتروژن کاهش داد. اما، بالاترین سطح کود نیتروژن، بیشترین کاهش (۴۶ درصد) را در مقایسه با شاهد (۲۴ درصد) و ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار (۲۶ درصد) سبب شد (شکل ۲).

یافته‌های برخی دیگر از پژوهشگران در مورد گندم نان (Frederick and Camberato, 1995) و جو (Barati et al., 2015) نیازی اردکانی و همکاران، ب ۱۳۹۹) نیز نشان داد که تنش آبی سبب کاهش بیشتر عملکرد دانه در بالاترین سطح کود نیتروژن شد، که نشان دهنده‌ی حساسیت بیشتر گیاهان دریافت‌کننده‌ی سطوح بالای کود نیتروژن به تنش آبی بود. همچنین، Garabet و همکاران (۱۹۹۸) نشان دادند که در شرایط مطلوب رطوبتی بالاترین عملکرد دانه گندم نان در

سطوح بالای کود نیتروژن حاصل شد. اما، در شرایط تنش آبی استفاده از سطوح بالای نیتروژن سبب افزایش حساسیت به تنش آبی و کاهش عملکرد دانه شد. بنابراین، با توجه به نتایج پژوهش حاضر در مورد تربیتکاله و نتایج پژوهش‌های دیگر در مورد سایر غلات، سطح بهینه‌ی کاربرد کود نیتروژن بستگی به رژیم آبیاری و فهم دقیق پاسخ گیاه به اثر متقابل آب و کود نیتروژن دارد.

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس برهم‌کنش تیمار رژیم آبیاری $\times$ سیلیکون در سطح احتمال پنج درصد بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). این برهم‌کنش نشان داد که تنش آبی سبب کاهش عملکرد دانه در شرایط کاربرد و عدم کاربرد سیلیکون شد. اما، مقدار کاهش در شرایط کاربرد سیلیکون (۲۸ درصد) کمتر از شرایط عدم کاربرد (۴۳ درصد) آن بود (شکل ۳). کاربرد سیلیکون می‌تواند با کاهش اثرات مخرب تنش آبی سبب افزایش میزان فتوسنتز و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه شده و در نهایت بر وزن دانه و عملکرد دانه تأثیرگذار باشد (Epstein and Bloom, 2005). همچنین، رضا بیگی و همکاران (۱۳۹۹) نیز نشان دادند که کاربرد برگی سیلیکون در مرحله‌ی گلدهی سبب افزایش عملکرد دانه گندم دوروم و نان به‌ویژه در شرایط تنش رطوبتی انتهای فصل شد.

نتیجه‌گیری

بیشترین مقدار فتوسنتز در شرایط مطلوب رطوبتی و در سطح ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار به‌دست آمد. تنش آبی (قطع آبیاری پس از گلدهی) سبب کاهش فتوسنتز و ویژگی‌های وابسته به آن در گیاه تربیتکاله شد. اما، این کاهش در سطوح مختلف کود نیتروژن متفاوت و تابعی از کاربرد کود نیتروژن

منابع

- رضا بیگی، س.، بیژن زاده، ا.، بهپوری، ع. و براتی، و. (۱۳۹۹) اثر کاربرد برگی سیلیکون بر صفات بیوشیمیایی و عملکرد دو رقم گندم در شرایط تنش خشکی آخر فصل. تنش‌های محیطی در علوم زراعی ۱۳: ۸۴۳-۸۲۹.
- نیازی اردکانی، م.، براتی، و. و بیژن زاده، ا. (الف ۱۳۹۹) اثرات کود زیستی و بقایای گیاهی بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه جو در شرایط تنش آبی. مجله فرآیند و کارکرد گیاهی ۹: ۲۹۸-۲۷۹.

بود. به‌طوری‌که، با افزایش سطح کود نیتروژن، اثرات منفی تنش آبی تشدید شد. با توجه به همبستگی مثبت و معنی‌دار فتوسنتز با عملکرد دانه در مراحل پس از گلدهی، عملکرد دانه نیز روندی مشابه با فتوسنتز را نشان داد. از این رو، بیشترین عملکرد دانه در شرایط مطلوب رطوبتی و سطح ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار (۷۰۹/۷ گرم بر مترمربع) به‌دست آمد. اما، در شرایط تنش آبی بیشترین عملکرد دانه (۴۱۲/۸ گرم بر مترمربع) در سطح ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار به‌دست آمد. مقدار فتوسنتز و صفات وابسته به آن در شرایط کاربرد برگی سیلیکون کمتر تحت تأثیر تنش آبی قرار گرفت. از اینرو، عملکرد دانه نیز کاهش کمتری به‌واسطه‌ی تنش در شرایط کاربرد سیلیکون (۲۸ درصد) نسبت به شرایط عدم کاربرد آن (۴۳ درصد) داشت. اما، اثر سیلیکون بر فتوسنتز و صفات وابسته به آن مستقل از اثر کود نیتروژن بود. بنابراین، فرض اولیه‌ی این پژوهش در مورد اثرات مطلوب سیلیکون در کاهش تنش آبی تشدید شده به‌واسطه‌ی کاربرد سطوح بالای کود نیتروژن رد می‌شود. به‌طورکلی، برای دستیابی به بیشینه‌ی فتوسنتز و عملکرد دانه، کاربرد ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار به‌ترتیب در شرایط تنش آبی و مطلوب رطوبتی پیشنهاد می‌شود. همچنین، کاربرد برگی سیلیکون به مقدار ۳ میلی‌مولار در اواسط مرحله‌ی گلدهی سبب کاهش اثرات مخرب تنش شدید آبی پس از گلدهی شد. از این رو، در صورت تایید این نتیجه توسط مطالعات مشابه، می‌توان این تیمار را برای کاهش اثرات تنش در مناطق جنوبی ایران توصیه کرد.

- نیازی اردکانی، م.، براتی، و.، بیژن‌زاده، ا. و بهپوری، ع. (ب ۱۳۹۹) تأثیر منابع مختلف کود نیتروژن و بقایای گیاهی بر عملکرد و اجزای عملکرد جو (*Hordeum vulgare* L.) در شرایط تنش آبی انتهای فصل. نشریه بوم‌شناسی کشاورزی ۱۲: ۱۰۷-۱۲۶.
- Agarie, S., Hanaoka, N., Ueno, O., Miyazaki, A., Kubota, F., Agata, W. and Kaufman, P. B. (1998) Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.), monitored by electrolyte leakage. *Plant Production Science* 1: 96-103.
- Ahmadi, S. H., Anderses, M. N., Plauborg, F., Poulsen, R. T., Jensen, C. R., Sepaskhah, A. R. and Hansen, S. (2010) Effect of irrigation strategies and soils on field-grown potatoes: Gas exchange and xylem [ABA]. *Agricultural Water Management* 97: 1469-1486.
- Barati, V. and Bijanzadeh, E. (2021). Grain yield and its components of triticale as affected by silicon foliar application, nitrogen fertilizer and water stress in reproductive phase. *Iranian Journal of Field Crops Research* 18: 435-449.
- Barati, V., Bijanzadeh, E. and Zinati, Z. (2020). Nitrogen source and deficit irrigation influence on yield and nitrogen translocation of triticale in an arid mediterranean agroecosystem. *Journal of Agricultural Sciences and Technology* 22: 1295-1311.
- Barati, V. and Ghadiri, H. (2017) Assimilate and nitrogen remobilization of six-rowed and two-rowed winter barley under drought stress at different nitrogen fertilization. *Archives of Agronomy and Soil Science* 63:841-855.
- Barati, V., Ghadiri, H., Zand-Parsa, Sh. and Karimian, N. (2015) Nitrogen and water use efficiencies and yield response of barley cultivars under different irrigation and nitrogen regimes in a semi-arid Mediterranean climate. *Archives of Agronomy and Soil Science* 61: 15-32.
- Barker, A. V. (2016). *Science and Technology of Organic Farming*. CRC Press.
- Blackman, P. G. and Davies, W. J. (1985) Root to shoot communication in maize plants of the effects of soil drying. *Journal of Experimental Botany* 36: 38-48.
- Chen, W., Yao, X. Q., Cai, K. Z. and Chen, J. (2011) Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biological Trace Element Research* 142: 67-76.
- Epstein, E. (1994) Silicon. *Plant physiology*. 50: 641 -664.
- Epstein, E. and Bloom, A. J. (2005) *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives*. 2nd ed. Sinauer Associates, Sunderland.
- Ercoli, L., Lulli, L., Mariotti, M., Masoni, A. and Arduini, I. (2008) Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen supply and soil water availability. *European Journal of Agronomy* 28: 138-147.
- Frederick, J. R. and Camberato, J. J. (1994) Leaf net CO₂-exchange rate and associated leaf traits of winter wheat grown with various spring nitrogen fertilization rates. *Crop Science* 34: 432-439.
- Fredrick, J. R. and Camberato, J. J. (1995) Water and nitrogen effects on winter wheat Southeastern central plain. II. Physiological responses. *Agronomy Journal* 87: 527-533.
- Gao, X., Zou, C., Wang, L. and Zhang, F. (2006) Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. *Jornal of Plant Nutrition*. 29: 1637-1647.
- Garabet, S., Wood, M. and Ryan, J. (1998) Nitrogen and water effects on wheat yield in a Mediterranean type climate. I. Growth, water-use and nitrogen accumulation. *Field Crops Research* 57: 309-318.
- Gong, H. and Chen, K. (2012) The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions. *Acta Physiologiae Plantarum* 34: 1589-1594.
- Hattori, T., Sonobe, K., Inanaga, S., An, P., Tsuji, W., Araki, H., Eneji, A. E. and Morita, S. (2007) Short term stomatal responses to light intensity changes and osmotic stress in sorghum seedlings raised with and without silicon. *Environmental and Experimental Botany* 60:177-182.
- Hattori, T., Inanaga, S., Araki, H., An, P., Morita, S., Luxova, M. and Lux, A. (2005) Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiologia Plantarum* 123: 459-466.
- Hattori, T., Sonobe, K., Araki, H., Inanaga, S., An, P. and Morita, S. (2008) Silicon application by sorghum through the alleviation of stress-induced increase in hydraulic resistance. *Journal of Plant Nutrition* 31: 1482-1495.
- Hunt, L. A. and Van Der Poorten, G. (1985) Carbon dioxide exchange rates and leaf nitrogen contents during ageing of the flag and penultimate leaves of five spring-wheat cultivars. *Canadian Journal of Botany* 63: 1605-1609.
- Huseynova, I. M. (2012) Photosynthetic characteristics and enzymatic antioxidant capacity of leaves from wheat cultivars exposed to drought. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) Bioenergetics* 1817: 1516-1523.
- Karrou, M. and Maranville, W. (1995) Response of wheat cultivars to different soil nitrogen and moisture regimes; III. Leaf water content, conductance and photosynthesis. *Journal of Plant Nuttition* 18: 777-791.
- Lawlor, D. W., Boyle, F. A., Keys, A. J., Kendall, A. C. and Young, A. T. (1988) Nitrate nutrition and temperature effects on wheat: a synthesis of plant growth and nitrogen uptake in relation to metabolic and physiological processes. *Journal of Experimental Botany* 39: 329-343.
- Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H. and Song, A. (2015) *Silicon in Agriculture: from Theory to Practice*. Springer Dordrecht Heidelberg, New York, London.

- Li, F., Kang, S. and Zhang, J. 2004. Interactive effects of elevated CO₂, nitrogen and drought on leaf area, stomatal conductance, and evapotranspiration of wheat. *Agricultural Water Management* 67: 221-233.
- Lobato, A. K. S., Coimbra, G. K., Neto, M. A. M., Costa, R. C. L., Filho, B. G. S., Neto, C. F.O., Luz, L. M., Barreto, A. G. T., Pereira, B. W. F., Alves, G. A. R., Monteiro, B. S. and Marochio, C. A. (2009) Protective action of silicon on water relations and photosynthetic pigments in pepper plants induced to water deficit. *Research Journal of Biological Sciences* 4: 617-623.
- Morgan, J. A. (1986) The effects of N nutrition on the water relations and gas exchange characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology* 80: 52-58.
- Pei, Z. F., Ming, D. F., Liu, D., Wan, G. L., Geng, X. X., Gong, H. J. and Zhou, W. J. (2010) Silicon improves the tolerance to water deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation* 29: 106-115.
- Radin, J. W. and Boyer, J. S. (1982) Control of leaf expansion by nitrogen nutrition in sunflower plants. *Plant Physiology* 69: 771-775.
- Radin, J. W. and Parker, L. (1979) Water relations of cotton plants under nitrogen deficiency. I. Dependence upon leaf structure. *Plant Physiology* 64: 495-498.
- Ritchie, J. T. (1983) Efficient water use in crop production: discussion on the generality of relations between biomass production and evapotranspiration. In *Limitations to efficient water use in crop production* (eds. Taylor, H. M., Jordan, W. R. and Sinclair, T. R.) Pp. 29-43. ASA Spec. Publ., ASA, CSSSA, and SSSA, Madison
- Roohi, E., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Modarres-Sanavy, S. A. M. and Siosemardeh, A. 2013. Comparative study on the effect of water stress on photosynthetic function of triticale, bread wheat, and barley. *Journal of Agricultural Sciences and Technology* 15: 215-228.
- SAS. (2004) Statistical Analysis Software. Version 9. Cary (NC): SAS Institute.
- Shabani, A., Sepaskhah, A. R. and Kamgar-Haghighi, A. A. (2013) Growth and physiologic response of rapeseed (*Brassica napus* L.) to deficit irrigation, water salinity and planting method. *International Journal of Plant Production* 7: 569-596.
- Shangguan, Z. P., Shao, M. A., Ren, S. J., Zhang, L. M. and Xue, Q. (2004) Effect of nitrogen on root and shoot relations and gas exchange in winter wheat. *Botanical Bulletin of Academia Sinica Taipei* 45: 49-54.
- Shangguan, Z. P., Shao, M. A. and Dyckmans, J. (2000) Nitrogen nutrition and water stress effects on leaf photosynthetic gas exchange and water use efficiency in winter wheat. *Environmental and Experimental Botany* 44: 141-149.
- Sugiharto, B., Miyata, K., Nakamoto, H., Sasakawa, H. and Sugiyama, T. (1990) Regulation of expression of carbon assimilating enzymes by nitrogen in maize leaf. *Plant Physiology* 92: 963-969.
- Van Herwaarden, A. F., Farquhar, G. D., Angus, J. F., Richards, R. A. and Howe, G. N. (1998) 'Haying-off', the negative grain yield response of dryland wheat to nitrogen fertilizer: I. Biomass, grain yield, and water use. *Australian Journal of Agricultural Research* 49: 1067-1082.
- Wall, G. W., Garcia, R. L. Wechsung, F. and Kimball, B. A. (2011) Elevated atmospheric CO₂ and drought effects on leaf gas exchange properties of barley. *Agriculture Ecosystems & Environment* 144: 390-404.
- Yin, L. N., Wang, S. W., Liu, P., Wang, W. H., Cao, D., Deng, X. P. and Zhang, S. Q. (2014) Silicon-mediated changes in polyamine and 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid are involved in silicon-induced drought resistance in *Sorghum bicolor* L. *Plant Physiology and Biochemistry* 80: 268-277.
- Zadoks, J. C., Chang, T. T. and Konzak, C. F. (1974) A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14: 11-16.
- Zhang, B., Li, F. M., Huang, G., Cheng, Z. Y. and Zhang, Y. (2006) Yield performance of spring wheat improved by regulated deficit irrigation in an arid area. *Agricultural Water Management* 79: 28-42.

Photosynthetic traits of triticale in grain filling period as affected by nitrogen fertilizer, silicon foliar application and water stress

Vahid Barati * and Ehsan Bijanzadeh

Agroecology Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Iran

(Received: 04/04/2022, Accepted: 22/11/2022)

Abstract

In order to investigate the interaction effect of nitrogen (N) and silicon foliar application on photosynthetic traits of triticale under water stress conditions, a split factorial experiment in a randomized complete block design with three replicates was conducted at the Experimental Farm of College of Agriculture and Natural Resources of Darab – Shiraz University in 2017-2018 growing season. Treatments included: two levels of irrigation as the main plots [normal irrigation; irrigation based on the plant's water requirement up to the physiological maturity (IR_N) and water deficit (water stress); irrigation based on the plant's water requirement up to the anthesis stage (withholding irrigation after anthesis) (IR_{DI})]. Also, sub plots included two levels of silicon foliar application [0, and 3 mM] and three N fertilizer levels [N_0 , no nitrogen fertilizer (control); N_{100} , 100 kg N ha⁻¹; N_{150} , 150 kg N ha⁻¹]. The results showed that the IR_{DI} reduced the photosynthesis at the milking and soft dough stages, however, this reduction was not constant in different N levels and the highest reduction was occurred in 150 kg N ha⁻¹ (44% and 55% reduction in the milking and soft dough stages, respectively). A similar trend was observed in the grain yield. Silicon foliar application caused the reduction of distractive effects of water stress on photosynthesis and related traits (stomatal conductance and instantaneous water use efficiency), independent of N fertilizer supply. Totally, application of 150 and 100 kg N ha⁻¹ is recommended for high photosynthesis rate of triticale in normal and water deficit, respectively. Furthermore, silicon foliar application (3 mM) is suggested for deminishing the harmful effects of the severe water stress after anthesis on photosynthesis and its related traits in South of Iran.

Keywords: Photosynthesis, Stomatal conductance, Water use efficiency

Corresponding author, Email: v.barati@shirazu.ac.ir