

تأثیر محلول پاشی سیلیسیم بر ویژگی‌های مورفو- فیزیولوژیک و فعالیت آنتی‌اکسیدانی گندم در شرایط کم‌آبایی

سوسن کوه‌درنگی^۱ و یحیی امام^{۲*}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۵/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱/۲۱)

چکیده

تنش کم‌آبایی مهم‌ترین تنش غیرزنده اثرگذار در تولید محصولات زراعی است. سیلیسیم دومین عنصر موجود در خاک است که دارای اثرات مفیدی در افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های زنده و غیرزنده است. به‌منظور بررسی اثر این عنصر در افزایش تحمل به شرایط کم‌آبایی در گندم، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در سال ۹۵-۱۳۹۴ اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل چهار رقم گندم شیراز، افق، سیروان و بهاران و محلول پاشی سیلیسیم در دو سطح صفر (شاهد) و سه میلی‌مولار و سه سطح تنش کم‌آبایی (ظرفیت مزرع‌های، ۴۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه) بودند. نتایج نشان داد که تنش کم‌آبایی موجب کاهش طول سنبله (۳۱ درصد)، ماده خشک هر بوته (۴۱ درصد)، عملکرد دانه (۲۵ درصد)، شاخص سبزیگی (۱۱ درصد)، محتوای نسبی آب برگ پرچم (۲۴ درصد)، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (۲۴ درصد)، پراکسیداز (۷۰ درصد) و سوپراکسید دیسموتاز (۴۱ درصد) شد. ارقام بهاران و سیروان از نظر شاخص سبزیگی و فعالیت آنزیم پراکسیداز برتری نشان دادند. لیکن، کاربرد سیلیسیم به‌صورت محلول پاشی در غلظت سه میلی‌مولار باعث جبران خسارت ناشی از تنش کم‌آبایی شد. محلول پاشی سیلیسیم با افزایش تمامی ویژگی‌های بالا از جمله آنتی‌اکسیدان‌ها همراه بود. برتری رقم‌های بهاران و سیروان، به‌عنوان ارقام متحمل به تنش کم‌آبایی و افق در بیشتر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده بر رقم شیراز مشهود بود. نتایج نشان داد که محلول پاشی سیلیسیم با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی موجب کاهش اثرات منفی تنش کم‌آبایی شد.

واژه‌های کلیدی: آنزیم آنتی‌اکسیدان، تنش کم‌آبایی، سیلیسیم، شاخص سبزیگی، محتوای نسبی آب برگ

۱ و ۲. به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و استاد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Yaemam@shirazu.ac.ir

مقدمه

از دیدگاه کارشناسان تولیدات کشاورزی، افزایش تولید غذا تنها راه حل مشکل گرسنگی است و به ویژه در کشورهای در حال توسعه بایسته است سرمایه گذاری بیشتری در امر تولید غذا صورت گیرد. غلات، پایه اصلی تغذیه و بقای بشر به شمار می روند و مهم ترین گیاهان زراعی کره زمین و تأمین کننده ۷۰ درصد غذای مردم جهان هستند. دو غله گندم و برنج روی هم تقریباً ۶۰ درصد انرژی مورد نیاز بشر را تأمین می کنند و در حال حاضر تقریباً نیمی از اراضی کشاورزی جهان زیر کشت غلات است (۱۲). بیشترین تلاش پژوهشگران برای دستیابی به عملکرد بیشتر گندم در واحد سطح از راه تنظیم رشد و نمو این گیاه است (۴۲).

گیاهان در طول دوره رشد خود در معرض تنش های گوناگونی قرار دارند و در این میان تنش کم آبیاری بزرگترین چالش در تولید محصولات زراعی به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک دنیا از جمله ایران است (۲ و ۱۴). تنش کم آبیاری، یکی از تنش های چندبعدی است که باعث ایجاد واکنش های فیزیولوژیک گوناگونی در گیاهان زراعی می شود (۲۰ و ۳۴). نتایج مطالعات نشان داده است که در شرایط تنش، حتی در غلظت های بالای CO₂ محیط، فتوسنتز کاهش می یابد که نشان دهنده آن است که اجزای غیر روزنه ای فتوسنتز نیز، تحت تأثیر مستقیم تنش کم آبیاری قرار می گیرد. در شرایط تنش کمبود آب، به دنبال بسته شدن روزنه ها غلظت CO₂ در بافت مزوفیل کاهش می یابد و در نتیجه واکنش های تاریکی فتوسنتز مختل شده و محصول واکنش های روشنایی، یعنی ATP و NADPH، مورد مصرف قرار نمی گیرد. این شرایط منجر به شکل گیری رادیکال های آزاد می شود (۷، ۸، ۳۶ و ۴۰). فعالیت گونه های فعال اکسیژن (ROS) ممکن است سبب بروز آسیب هایی همچون اکسید شدن لیپیدها، تغییر ساختمان پروتئین ها و اکسید شدن گروه های سولفیدریل (SH-)، غیر فعال شدن آنزیم ها، بی رنگ شدن و یا از بین رفتن رنگدانه هایی مانند کلروفیل و سایر ترکیبات رنگیزه ای و اختلال در رشته های DNA شود (۱۸، ۲۸ و ۳۲).

یکی از راه های فیزیولوژیک مقابله با تنش کم آبیاری، تنظیم رشد گیاه با استفاده از ماده سدیم سیلیکات است تا بتوان تحمل تنش را برای گیاه زراعی آسان کرد (۲۶). سیلیسیم دومین عنصر معدنی در خاک پس از اکسیژن است و تقریباً ۳۱ درصد پوسته زمین را تشکیل می دهد (۲۵). اگرچه سیلیسیم عنصر ضروری برای بیشتر گیاهان محسوب نمی شود، لیکن اثرات سودمندی بر رشد گیاه دارد، هرچند درباره نقش سیلیسیم در گیاهان زراعی هنوز اطلاعات زیادی در دست نیست (۱۹). در پژوهشی اثرات سیلیسیم بر گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت تنش کم آبیاری مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که در شرایط تنش کاربرد سیلیسیم باعث افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان (از قبیل SOD، CAT و GR) شد و منجر به تعدیل اثرات تنش کم آبیاری در افزایش میزان پراکسید هیدروژن (H₂O₂) فعالیت اسید فسفولپاز (AP) شد (۱۶). لی و همکاران (۲۱) اثرات سیلیسیم را بر میزان تحمل به کم آبیاری گیاه ذرت مورد مطالعه قرار دادند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که در شرایط تنش ملایم و شدید آبی کاربرد سیلیسیم به ترتیب باعث افزایش ۳۳ درصد و ۴۰ درصد عملکرد دانه می شود. در تیمار سیلیسیم محتوای کلروفیل و فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز در مقایسه با نمونه های شاهد افزایش یافت. به علاوه، سیلیسیم باعث حفظ پایداری غشای سلول که منجر به کاهش نشت مواد سلولی و در نتیجه تداوم جریان انتقال مواد فتوسنتزی می شود (۶، ۱۵ و ۳۷). اصغری و همکاران نیز گزارش کردند که تنش کم آبیاری سبب کاهش بیشتر در محتوای نسبی آب (RWC) رقم حساس در مقایسه با رقم متحمل شد (۳۹). با توجه به اهمیت زیاد گیاه زراعی گندم و نیاز شدید مردم به این محصول و نیز با در نظر گرفتن غالبیت آب و هوای خشک در اغلب نقاط گندم خیز کشور، انجام چنین پژوهش هایی با هدف تعدیل اثرات تنش کم آبیاری از اهمیت زیادی برخوردار خواهد بود. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر سدیم سیلیکات بر ویژگی های مرفو-فیزیولوژیک و فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی چهار رقم گندم به تنش کم آبیاری به اجرا درآمد.

مواد و روش‌ها

به منظور مطالعه تأثیر محلول پاشی سیلیسیم در شرایط کم آبیاری بر ویژگی‌های مورفو- فیزیولوژیک گندم، پژوهشی گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی بخش زراعت و اصلاح نباتات دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در باجگاه در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ به اجرا در آمد. تیمارهای این آزمایش شامل چهار رقم گندم شیراز، سیروان، بهاران و افق، کاربرد سدیم سیلیکات به صورت محلول پاشی در سطوح شاهد (محلول پاشی با آب مقطر)، سه میلی مولار و سه سطح تنش کم آبیاری (ظرفیت مزرعه‌ای، ۴۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه)، بودند. در این آزمایش از گلدان‌هایی پنج کیلوگرمی که با نسبت دو به یک خاک مزرعه و ماسه پر شده بودند، استفاده شد.

در هر گلدان ابتدا ۱۰ بذر گندم کاشته شد که بعد از تنک کردن در مرحله سه برگی، به پنج بوته کاهش یافت. با بررسی رشد بوته‌ها، محلول پاشی سدیم سیلیکات در پایان مرحله پنجه زنی ($ZGS=30$) با غلظت صفر (آبیاری با آب مقطر) و سه میلی مولار انجام شد. عمل محلول پاشی با محلول پاش دستی به صورت یکنواخت در دو طرف برگ انجام شد و تا زمانی ادامه یافت که از نوک برگ‌ها قطره‌های محلول شروع به چکیدن کرد.

اعمال تیمار تنش کم آبیاری از مرحله گل دهی تا رسیدگی فیزیولوژیک انجام شد (۱۶ و ۲۶). تا قبل از این مرحله تمام گلدان‌ها در حد ظرفیت مزرعه آبیاری شدند. محاسبه ظرفیت زراعی با استفاده از روش وزنی به صورت تجربی (وزن کردن مداوم گلدان‌ها تا زمانی که تغییر وزن ثابت شود) انجام شد.

اندازه‌گیری شاخص سبزی‌نگی، یک ماه بعد از محلول پاشی سیلیسیم و دو هفته بعد از اعمال تیمار کم آبیاری در ساعت‌های اولیه روز از برگ پرچم بوته‌ها با استفاده از دستگاه اسپد (SPAD-502, Minolta, Japan) انجام شد و محتوای نسبی آب برگ با انتخاب جوان‌ترین برگ توسعه یافته زیر برگ پرچم، از هر یک از ارقام و در هر تکرار صورت گرفت. برگ‌ها پس از

قطع شدن از انتهای پهنک در کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شدند و تا زمان رسیدن به آزمایشگاه (حدود نیم ساعت بعد) در فلاسک یخ قرار گرفتند. در آزمایشگاه وزن تازه تعیین و سپس برگ‌ها در آب مقطر به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق و در تاریکی قرار گرفتند. آنگاه وزن آماس تعیین شد. در مرحله بعد، برگ‌ها به مدت ۷۲ ساعت در آون تهویه‌دار در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و خشک شدند. RWC , Relative Water Content) از رابطه (۱) به دست آمد (۳۵ و ۳۶).

$$RWC = \frac{(FW - DW)}{(SW - DW)} \times 100\% \quad [1]$$

RWC (%): محتوای نسبی آب، FW : وزن تر برگ، DW : وزن خشک برگ، SW : وزن اشباع برگ.

برای اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز از روش بیچامپ و فریدوویچ استفاده شد (۱۰). براساس این روش ۵۰ میکرولیتر از عصاره استخراج و با یک میلی‌لیتر محلول اندازه‌گیری سوپراکسید دیسموتاز که شامل ۵۰ میلی‌مول بافر فسفات پتاسیم، ۷۵ میکرومولار NBT ، ۱۳ میلی‌مولار ال- میتونین، ۱/۰ میلی‌مولار $EDTA$ و دو میکرومولار ریوفلاوین بود، واکنش داده شدند. برای انجام این واکنش کوات حاوی این مخلوط به مدت ۱۵ دقیقه در اتاقک نور قرار داده شد، سپس محلول حاصل در دستگاه اسپکتروفتومتر (JENWAY-7315, UK) قرار گرفت و میزان جذب در طول موج ۵۶۰ nm به عنوان میزان فعالیت این آنزیم در نظر گرفته شد (۱۰). از روش دهیندزا و همکاران برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز استفاده شد (۱۱). براساس این روش ۵۰ میکرولیتر از عصاره استخراج را با یک میلی‌لیتر محلول اندازه‌گیری کاتالاز که شامل ۵۰ میلی‌مول بافر فسفات پتاسیم و ۱۵ میلی‌مول پراکسید هیدروژن است، مخلوط شد. سپس جذب آن در طول موج ۲۴۰ nm به مدت یک دقیقه با دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. یک واحد آنزیمی کاتالاز برابر با تجزیه یک میلی‌مول پراکسید هیدروژن در یک دقیقه

در شرایط تنش، طول محور سنبله گندم کاهش می‌یابد (۳۱). محلول‌پاشی سه میلی‌مولار سیلیسیم نسبت به عدم کاربرد آن ۹/۴ درصد طول سنبله را افزایش داد (جدول ۲). در برنج افزایش طول سنبله، که به‌دنبال تیمار بوته‌ها با سیلیسیم رخ داده، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است که با نتایج این پژوهش مطابقت داشت (۱).

تعداد دانه در هر سنبله

اثر تنش کم‌آبیاری، رقم، سیلیسیم و برهمکنش اثر رقم و سیلیسیم بر تعداد دانه در هر سنبله در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). میانگین تعداد دانه در سنبله رقم بهاران نسبت به رقم شیراز ۲۱/۴۱ درصد بیشتر بود (جدول ۳). اثرات سوء ناشی از تنش کم‌آبیاری بر تعداد دانه در سنبله با کاربرد سیلیسیم تعدیل یافت. کاربرد سیلیسیم موجب افزایش تعداد دانه در سنبله گندم شد، به‌طوری‌که محلول‌پاشی سه میلی‌مولار سیلیسیم موجب افزایش ۱۸/۳۶ درصدی نسبت به عدم کاربرد سیلیسیم شد (جدول ۳). همچنین محلول‌پاشی سه میلی‌مولار اثر مثبت معنی‌داری بر تعداد دانه در سنبله ارقام گندم بهاران و سیروان نسبت به افق و شیراز داشت (شکل ۱- الف).

کمبود آب باعث عدم تلقیح و ناباروری گلچه‌ها در سنبله می‌شود. علاوه‌بر آن، در اثر تنش کم‌آبیاری تعدادی از تخمک‌های تلقیح شده، سقط می‌شوند و در نهایت تعداد دانه در سنبله کاهش می‌یابد (۳۰). به‌طورکلی، تعداد سنبله در واحد سطح و تعداد دانه در سنبله از اجزای حساس عملکرد نسبت به تنش کم‌آبیاری هستند (۱۲). کاهش تعداد سنبلک در اثر تنش موجب کاهش تعداد دانه در سنبله می‌شود که برخی پژوهشگران این موضوع را به ناباروری دانه‌های گرده در اثر تنش کم‌آبیاری نسبت داده‌اند (۳۰). کمبود آب در مرحله گل‌دهی، باعث کاهش شدید عملکرد از طریق نمو غیرطبیعی کیسه جنینی، عقیمی دانه گرده و در نهایت کاهش تعداد دانه‌های بارور در سنبله می‌شود (۱۶).

است (۱۱). فعالیت آنزیم پراکسیداز از روش مک‌آدم و همکاران محاسبه شد، در این روش ۳۳ میکرولیتر عصاره استخراج با یک میلی‌لیتر از محلول که شامل ۱۳ میلی‌مولار گوایکول، پنچ میلی‌مولار پراکسید هیدروژن و ۵۰ میلی‌مولار بافر فسفات پتاسیم است مخلوط شده و به‌مدت یک دقیقه با فواصل ۱۰ ثانیه در طول موج ۴۷۰nm آن جذب قرائت می‌شود (۲۴). از هر گل‌دان به‌طور تصادفی چند سنبله انتخاب شد و طول سنبله با استفاده از خط‌کش تعیین شد. دانه‌های سنبله‌های برداشت شده پس از عملیات بوجاری، با ترازوی دیجیتال وزن شد و عملکرد دانه محاسبه شد. در برداشت نهایی، بوته‌ها از سطح خاک قطع شده و پس از گذاشتن به‌مدت ۲۴ ساعت در آون تهویه‌دار در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. وزن کل هر بوته به‌عنوان ماده خشک در نظر گرفته شد. تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS با نسخه (۲،۹) و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. نمودارها با استفاده از برنامه اکسل با نسخه (۱۴،۰،۷۰۱۵،۱۰۰۰) رسم شد.

نتایج و بحث

طول سنبله

اثر تیمار تنش کم‌آبیاری و رقم بر طول سنبله در سطح احتمال یک درصد و اثر محلول‌پاشی سیلیسیم بر طول سنبله در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۱)، به‌طوری‌که در نیاز آبی ۴۰ درصد، کاهش ۳۱ درصدی در طول سنبله در مقایسه با آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد طول سنبله رقم سیروان و افق به‌طور معنی‌داری بیشتر از رقم شیراز بود که با توجه به حساسیت بیشتر رقم شیراز به تنش کم‌آبیاری (۱۲) و این موضوع قابل انتظار بود. در همین راستا محققان دریافتند که تنش کم‌آبیاری باعث کاهش طول سنبله گندم می‌شود (۱۲ و ۳۰). نتایج برخی پژوهش‌ها حاکی از آن است که در شرایط بدون تنش، فاصله میان‌گره‌ها روی محور سنبله گندم بیشتر شده و از تراکم سنبله کاسته می‌شود (۱۲). برعکس،

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس تنش کم آبیاری و سیلیسیم بر طول سنبله، تعداد دانه در سنبله، ماده خشک هر بوته و عملکرد دانه ارقام گندم

میانگین مربعات					
منابع تغییرات	درجه آزادی	طول سنبله	تعداد دانه در سنبله	ماده خشک هر بوته	عملکرد دانه
سیلیسیم	۱	۹/۲۴*	۴۶۰/۰۵**	۰/۸۴*	۹/۲۴**
رقم	۳	۱۹/۷**	۱۳۸/۱۶**	۲/۳۸**	۲/۳۷*
تنش کم آبیاری	۲	۵۰/۷۷**	۱۵۴/۵۲**	۲/۳۸**	۷/۱۴**
سیلیسیم × رقم	۳	۴/۷۸ ^{ns}	۳۱۵/۵**	۵/۱۷**	۰/۲۲ ^{ns}
سیلیسیم × تنش کم آبیاری	۲	۲/۳۸ ^{ns}	۰/۲۶ ^{ns}	۰/۹۶**	۰/۴ ^{ns}
رقم × تنش کم آبیاری	۶	۱/۲۴ ^{ns}	۱/۳۱ ^{ns}	۰/۰۳ ^{ns}	۰/۵۴ ^{ns}
سیلیسیم × رقم × تنش کم آبیاری	۶	۱/۹۵ ^{ns}	۳۳/۳۷ ^{ns}	۰/۰۹ ^{ns}	۰/۳۱ ^{ns}
خطا	۴۸	۲/۲۲	۳۱/۵۹	۰/۱۶	۰/۶۸
CV (%)		۱۸/۸۷	۲۲/۷۱	۲۲/۱۸	۲۲/۲۲

ns, * و ** به ترتیب غیرمعنی دار، معنی دار در سطح یک و پنج درصد

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس تنش کم آبیاری و سیلیسیم بر محتوای نسبی آب برگ، شاخص سبزیگی و میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان پراکسیداز، کاتالاز و سوپر اکسید دیسموتاز ارقام گندم

میانگین مربعات						
منابع تغییرات	درجه آزادی	محتوای نسبی آب برگ	شاخص سبزیگی	فعالیت پراکسیداز	فعالیت کاتالاز	فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز
سیلیسیم	۱	۱۷۳۵/۸۱**	۷۹/۱۷**	۲۷۵۷/۳۹**	۷/۳۹**	۲۱۲۸/۰۲**
رقم	۳	۳۹۳/۷۷**	۴۲/۲۲**	۶۶۴/۴۶**	۳۷/۸۰*	۲۲۱۲/۶۲*
تنش کم آبیاری	۲	۳۰۵۳/۴۲**	۲۴۵/۱۰*	۷۴۱۲/۲۸**	۸/۱۵**	۲۲۹۵/۵۵**
سیلیسیم × رقم	۳	۱۷/۲۷*	۱۲/۹۸ ^{ns}	۴۲۳/۷۵*	۷/۹۳ ^{ns}	۴۶۰/۳۴*
سیلیسیم × تنش کم آبیاری	۲	۱۳۵/۹۰**	۲/۱۹ ^{ns}	۹۷/۶۵**	۳/۶۲*	۱۸۰/۱۴*
تنش کم آبیاری × رقم	۶	۱۸۳/۱۲*	۱۲/۷۶*	۲۸۹/۵۱*	۱۶/۸۶*	۴۷۰/۵۷ ^{ns}
سیلیسیم × رقم × تنش کم آبیاری	۶	۴۱/۶۳**	۳/۷۰ ^{ns}	۸۰/۲۳ ^{ns}	۱۲/۸۷*	۸۷۳/۳۸*
خطا	۴۸	۰/۷۷	۵/۲۲	۱۲/۷۹	۰/۵۶	۰/۳۷
CV (%)		۱/۱۲	۴/۲۱	۱۳/۳۶	۲۰/۲۵	۱/۶۱

ns, * و ** به ترتیب غیرمعنی دار، معنی دار در سطح یک و پنج درصد

گلرنگ اثرات تنش کم آبیاری را کاهش داده و همچنین منجر به افزایش رشد ساقه، برگ و دیگر اندام‌های گیاه نظیر تعداد دانه در طبق شد. نتایج آزمایش گانگ (۱۶) روی گندم نیز نشان داد که مصرف سیلیسیم باعث افزایش تعداد دانه در سنبله گندم شد که با نتایج این پژوهش هماهنگ است و افزایش تعداد دانه در اثر

محمدی و همکاران (۳۱)، اعلام کردند که تعداد دانه در مرحله گرده‌افشانی با تنش کم آبیاری کاهش یافت و همچنین به این نتیجه رسیدند که تنش تقریباً تمام اجزای عملکرد گندم، وزن هزار دانه، تعداد دانه در سنبله و شاخص برداشت را کاهش داده بود. نتایج آزمایش ما (۲۳) نشان داد مصرف سیلیسیم در گیاه

جدول ۳. اثر تنش کم آبیاری، سیلیسیم و رقم بر طول سنبله، تعداد دانه در هر سنبله، ماده خشک هر بوته و عملکرد دانه ارقام گندم

تیمار	طول سنبله (cm)	تعداد دانه در هر سنبله	ماده خشک هر بوته (g)	عملکرد دانه (g/Pot)
آبیاری (رطوبت قابل استفاده)				
۱۰۰FC	۹/۳۳ ^a	۳۲/۶۲ ^a	۲/۴۳ ^a	۴/۲۹ ^a
۶۰FC	۷/۹۶ ^b	۲۵/۰۴ ^b	۱/۷۴ ^b	۳/۶۷ ^b
۴۰FC	۶/۴۲ ^c	۱۶/۵۸ ^c	۱/۴۳ ^c	۳/۲ ^b
سیلیسیم (میلی مولار)				
صفر	۷/۵۵ ^b	۲۲/۲۲ ^b	۱/۷۳ ^b	۳/۳۶ ^b
۳	۸/۲۶ ^a	۲۷/۲۷ ^a	۱/۹۵ ^a	۴/۰۸ ^a
ارقام				
افق	۷/۹۷ ^b	۲۳/۳۳ ^b	۲/۰۱ ^a	۳/۷ ^{ab}
بهاران	۷/۴۱ ^{bc}	۲۸/۷۷ ^a	۲/۱۱ ^a	۳/۹۳ ^a
سیروان	۹/۳۱ ^a	۲۴/۲۷ ^b	۱/۹۴ ^a	۴/۰۴ ^a
شیراز	۶/۹۳ ^c	۲۲/۶۱ ^b	۱/۳ ^b	۳/۲۲ ^b

حروف مشابه در هر تیمار برای هر ویژگی نشانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون LSD است.

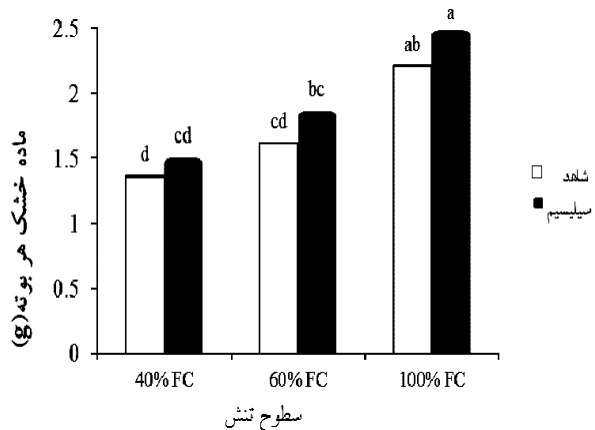
این موضوع می تواند منجر به تولید میزان کمتری زیست توده (بیوماس) شود (۲۲).

محمدی و همکاران (۳۱) گزارش کردند که بروز تنش کم آبیاری در محیط رشد گندم باعث کاهش اندازه بوته ها، کم شدن دوام سطح برگ ها، کاهش وزن خشک اندام ها و در نتیجه کاهش ماده خشک می شود. محلول پاشی سیلیسیم تأثیر معنی داری در سطح احتمال پنج درصد بر ماده خشک هر بوته داشت (جدول ۳)؛ به نحوی که محلول پاشی سه میلی مولار سیلیسیم با آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بیشترین ماده خشک را به خود اختصاص داد و کمترین آن از عدم محلول پاشی سیلیسیم در نیاز آبی ۴۰ درصد به دست آمد (شکل ۱-ب). به نظر می رسد مصرف سیلیسیم باعث تغییر جهت زاویه برگ ها در مقابل آفتاب و در نتیجه افزایش فتوسنتز و عملکرد گیاه شود (۱۷). این اثر مفید سیلیسیم به تغییرات آناتومیک از راه رسوب سیلیسیم در

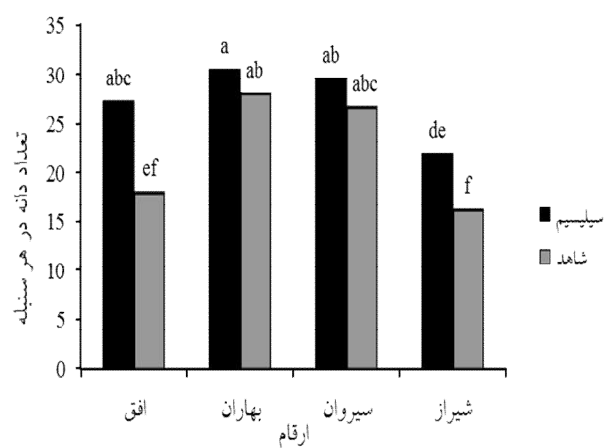
کاربرد سیلیسیم می تواند به دلیل افزایش اسیمیلات ها به واسطه افزایش سطح برگ و فتوسنتز در مرحله پر شدن دانه باشد.

ماده خشک هر بوته

تأثیر تنش کم آبیاری، رقم و برهمکنش سیلیسیم و تنش کم آبیاری بر ماده خشک هر بوته در سطح یک درصد و اثر سیلیسیم در سطح پنج درصد معنی دار شد (جدول ۱). تیمار نیاز آبی ۴۰ درصد با میانگین (۱/۴۳ g/pot) و آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی با میانگین (۲/۴۳ g/pot) ماده خشک تولید کرد (جدول ۳). رقم بهاران با تفاوت معنی داری ماده خشک بیشتری را نسبت به رقم شیراز تولید کرد، هر چند نسبت به دو رقم افق و سیروان تفاوت معنی داری نشان نداد (جدول ۳). در شرایط تنش کم آبیاری میزان فتوسنتز خالص بوته کاهش می یابد و همچنین هدایت روزنه ای و میزان کلروفیل نیز کمتر می شوند که



(ب)



(الف)

شکل ۱. الف) تأثیر غلظت‌های مختلف سیلیسیم بر تعداد دانه در هر سنبله ارقام گندم، ب) تأثیر غلظت‌های مختلف سیلیسیم بر ماده خشک هر بوته ارقام گندم در شرایط تنش کم آبیاری. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بین تیمارها است. (FC: ظرفیت زراعی مزرعه)

طریق کاهش اجزای عملکرد می‌شود (۴). علاوه بر این، اعمال تنش کم آبیاری در طول دوره پر شدن دانه ممکن است از طریق کاهش دوره پر شدن دانه و یا سرعت پر شدن دانه، عملکرد را کاهش دهد (۹). در پژوهش حاضر، کاهش عملکرد دانه به دنبال کاهش تعداد دانه در سنبله اتفاق افتاد که با نتایج سایر پژوهشگران مطابقت دارد (۱۶). رقم سیروان نسبت به رقم بهاران، عملکرد دانه بیشتری داشت ولی از لحاظ آماری معنی‌دار نشد (جدول ۳). بالاتر بودن عملکرد دانه رقم‌های سیروان و بهاران در مقایسه با دو رقم افق و شیراز در این شرایط، بیانگر پتانسیل عملکرد دانه زیاده‌تر و توان بیشتر این رقم‌ها در بهره‌برداری از شرایط محیطی به‌ویژه رطوبت خاک بوده است (۱۲).

در شرایط تنش کم آبیاری، کاهش عملکرد بوته‌هایی که با سیلیسیم محلول پاشی نشده بودند نسبت به بوته‌های تیمار شده با سیلیسیم بیشتر بود. نتایج بسیاری از پژوهش‌ها حاکی از اثر مثبت سیلیسیم بر عملکرد گیاه است (۴). سیلیسیم با کاهش تعرق باعث ایجاد تحمل به تنش کم آبیاری می‌شود (۲۶). به نظر می‌رسد سیلیسیم در غلات با افزایش میزان محصول و همچنین افزایش پر شدن دانه‌ها منجر به بهبود عملکرد اقتصادی می‌شود.

دیواره سلولی برگ‌ها نسبت داده شده است (۲۳). طبق گزارش‌های برخی پژوهشگران با افزایش مصرف سیلیسیم، ماده خشک در گیاه گندم افزایش یافته است. بنابراین این ماده با کاهش هدررفت آب و افزایش راندمان فتوسنتزی باعث افزایش وزن خشک هر بوته می‌شود (۴).

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر تنش کم آبیاری و اثر سیلیسیم در سطح یک درصد و اثر رقم در سطح پنج درصد بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۱). تیمارهای نیاز آبی ۴۰ و ۶۰ درصد در مقایسه با آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی باعث کاهش معنی‌دار عملکرد دانه شدند و این کاهش در نیاز آبی ۴۰ درصد مشهودتر بود (جدول ۳).

مشابه نتایج ارائه شده در این پژوهش، کاهش عملکرد دانه گندم در اثر تنش کم آبیاری در مطالعات دیگر هم گزارش شده است (۱۲ و ۲۶). نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که اعمال تنش کم آبیاری، با کاهش آب برگ و در نتیجه بسته شدن روزنه‌ها و افت فتوسنتز از یک سو و اثرگذاری فعالیت‌های آنزیمی و فرایندهای مربوطه از سوی دیگر، موجب افت عملکرد دانه از

محتوای نسبی آب برگ (RWC)

اثر تنش کم آبیاری، رقم، سیلیسیم و برهمکنش سیلیسیم، رقم و کم آبیاری بر محتوای نسبی آب برگ در سطح یک درصد معنی دار شد (جدول ۲). تیمار تنش کم آبیاری موجب کاهش معنی دار محتوای نسبی آب برگ پرچم شد، به طوری که در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی محتوای نسبی آب برگ پرچم ۲۵ درصد بیشتر از تیمار نیاز آبی ۴۰ درصد بود. به طور کلی ارقام بهاران، سیروان و افق در تیمارهای نیاز آبی ۱۰۰ و ۶۰ با کاربرد سه میلی مولار سیلیسیم، محتوای نسبی آب برگ بیشتری نسبت به رقم شیراز نشان داد (جدول ۴). اسکافیلد و همکاران (۳۸) دریافتند که با افزایش تنش کم آبیاری در گندم، RWC کاهش پیدا می کند و معمولاً، هر چند نه همیشه، ارقام مقاوم به کم آبیاری دارای RWC بالاتری در شرایط تنش هستند و همچنین طی آزمایشی اثر تنش کم آبیاری را روی ارقام متحمل و حساس گندم مورد مطالعه قرار دادند. آنان گزارش کردند که دیواره سلولی ارقام متحمل گندم نسبت به ارقام حساس سخت تر است و همین امر سبب می شود محتوای نسبی آب ارقام متحمل بیش از ارقام حساس باشد (۲۶).

مقصودی و همکاران (۲۶)، تأثیر تنش کم آبیاری را در ارقام گندم بررسی و مشاهده کردند که در تنش، محتوای نسبی آب برگ به طور معنی داری کاهش می یابد. کاربرد سیلیسیم موجب افزایش معنی دار محتوای نسبی آب برگ پرچم نسبت به تیمار عدم کاربرد سیلیسیم شد، بدین صورت که محلول پاشی سیلیسیم توانست باعث افزایش محتوای نسبی آب نسبت به تیمار عدم کاربرد سیلیسیم شود.

یکی از دلایل افزایش محتوای RWC به دنبال کاربرد سیلیسیم در شرایط تنش کم آبیاری، افزایش استحکام بافت برگی است. بررسی های صورت گرفته در این زمینه نشان می دهد که در بافت های گیاهی سیلیسیم به فرم سیلیکا در آپوپلاست دیواره سلولی رسوب کرده و باعث استحکام بافت می شود (۳۶). زمانی که دیواره سلولی سخت تر شود در اثر پسابیدگی برگ، کاهش بیشتری در پتانسیل آب اتفاق می افتد (۱۳ و ۱۹).

سیلیسیم با رسوب در دیواره خارجی سلول های اپیدرم برگ میزان کاهش آب از طریق روزنه ها را پایین می آورد. در بررسی های صورت گرفته مشخص شده است که برگ های گندمی که در شرایط تنش کم آبیاری با سیلیسیم تیمار شده اند، در مقایسه با نمونه های شاهد دارای بافت زبرتر و ضخیم تری هستند، بنابراین، سیلیسیم با کاهش تعرق باعث تحمل بیشتر تنش توسط گیاه می شود (۱۵).

شاخص سبزینگی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد شاخص سبزینگی تحت تأثیر سیلیسیم و رقم در سطح احتمال یک درصد و تنش کم آبیاری در سطح پنج درصد قرار گرفت و همچنین برهمکنش تنش کم آبیاری و رقم نیز معنی دار شد (جدول ۲). در مطالعه حاضر شاخص سبزینگی در اثر نیاز آبی ۴۰ درصد حدود ۱۳ درصد کاهش پیدا کرد (جدول ۵). با محلول پاشی سیلیسیم شاخص سبزینگی گیاه نیز افزایش یافت به نحوی که کاربرد سیلیسیم (سه میلی مولار) با بیشترین شاخص سبزینگی (۵۵/۲۷) همراه بود (جدول ۵). رقم بهاران در آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی با تفاوت معنی داری نسبت به تیمار نیاز آبی ۴۰ درصد، بیشترین شاخص سبزینگی را نسبت به افق و شیراز به خود اختصاص داد، هر چند با رقم سیروان تفاوت معنی داری نداشت (جدول ۶). در شرایط تنش کم آبیاری میزان تولید رادیکال های فعال و در نتیجه پراکسیداسیون های لیپیدی افزایش می یابد و مشخص شده است که تخریب کلروفیل نتیجه پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء است (۱۵). برخی شواهد حاکی از آن است که تنش کم آبیاری میزان کلروفیل برگ را کاهش می دهد (۵).

امیری و همکاران (۴) نیز گزارش کردند که تنش کم آبیاری موجب افزایش شاخص سبزینگی در ارقام گلرنگ پاییزه شده است. ایشان با اشاره به وجود رابطه مثبت قوی بین میزان نیتروژن، کلروفیل و SPAD، افزایش عدد کلروفیل متر را نشانه افزایش میزان کلروفیل در واحد سطح برگ دانسته اند. همچنین گانگ و همکاران ابراز عقیده کرده اند که عدد کلروفیل متر تحت

جدول ۴. نتایج برهمکنش رقم، تنش کم آبیاری و سیلیسیم بر محتوای نسبی آب برگ، فعالیت کاتالاز و سوپر اکسید دیسموتاز ارقام گندم

تنش کم آبیاری	ارقام	سیلیسیم	محتوای نسبی آب برگ (درصد)	فعالیت کاتالاز (واحد بر میلی گرم پروتئین)	فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز (واحد بر میلی گرم پروتئین)
/۱۰۰ FC	افق		۹۰/۹۵ ^b	۲/۶۹ ^{hij}	۴۸/۵۳ ^e
	بهاران		۸۸/۷۱ ^c	۶/۶۵ ^{bc}	۳۴/۶۳ ^{cd}
	سیروان	۰	۸۴/۵۵ ^e	۳/۰۸ ^{ghi}	۵۳/۹۳ ^b
	شیراز		۸۳/۵۸ ^e	۲/۵۴ ^{hij}	۳۱ ^j
	افق		۹۴/۶۳ ^a	۲/۲۰ ^{hij}	۵۶/۴۰ ^b
	بهاران		۹۴/۱۸ ^a	۸/۶۳ ^a	۵۱/۵۶ ^d
	سیروان	۳	۹۳/۶۲ ^a	۷/۵۶ ^{ab}	۶۰/۲۳ ^a
	شیراز		۹۱/۹۹ ^b	۱/۶۳ ⁱ	۴۷/۳۰ ^e
/۶۰ FC	افق		۸۴/۰۲ ^e	۱/۹۳ ^{hij}	۴۴/۱۳ ^d
	بهاران	۰	۷۷/۸۳ ^f	۵/۹۸ ^{cd}	۲۴ ^{kl}
	سیروان		۶۵/۸۶ ⁱ	۲/۲۶ ^{hij}	۴۶/۲۰ ^{de}
	شیراز		۵۴/۵۹ ^k	۱/۹۲ ^{ij}	۲۲/۲۶ ^{lm}
	افق		۹۴/۵۷ ^a	۳/۱۵ ^{gh}	۴۶/۲ ^{de}
	بهاران	۳	۸۶/۶۵ ^d	۵/۳۶ ^{def}	۴۲/۳ ^{fg}
	سیروان		۸۶/۵۰ ^d	۴/۱۵ ^{fg}	۵۴/۱۰ ^b
	شیراز		۷۵/۷۵ ^g	۲/۹۸ ^{ghi}	۳۸/۱ ^{hi}
/۴۰ FC	افق	۰	۷۰/۱۵ ^h	۲/۰۶ ^{hij}	۲۵ ^{kl}
	بهاران		۶۵/۳۲ ⁱ	۴/۷۶ ^{def}	۱۸/۶۰ ^t
	سیروان		۶۰/۲۹ ^j	۴/۷۳ ^{ef}	۲۷/۶۶ ^{jk}
	شیراز		۶۰/۱۷ ^j	۲/۰۵ ^{hij}	۱۱ ⁿ
	افق		۷۵/۱۳ ^g	۲/۳۳ ^{hij}	۲۸/۲۰ ^{jk}
	بهاران	۳	۷۴/۳۳ ^g	۲/۹۲ ^{ghi}	۲۰/۱۱ ^{lm}
	سیروان		۷۱/۴۰ ^h	۵/۵۶ ^{cde}	۳۳/۳۱ ^{cd}
	شیراز		۶۵/۰۹ ⁱ	۱/۸۷ ^{ij}	۸/۹۸ ^{mp}

حروف مشابه در هر تیمار برای هر ویژگی نشانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون LSD است.

جدول ۵. اثر تنش کم آبیاری، سیلیسیم و رقم بر محتوای نسبی آب برگ، کلروفیل و فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی ارقام گندم

تیمار	محتوای نسبی آب برگ (درصد)	شاخص سبزی‌نگی (SPAD)	فعالیت پراکسیداز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین)	فعالیت کاتالاز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین)	فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین)	آبیاری (رطوبت قابل استفاده)	
						FC ۱۰۰٪	FC ۶۰٪
							سیلیسیم (میلی‌مولار)
							۳
							صفر
							ارقام
							افق
							بهاران
							سیروان
							شیراز

حروف مشابه در هر تیمار برای هر ویژگی نشانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون LSD است.

پراکسیداز

براساس نتایج جدول تجزیه واریانس اثر تیمار تنش کم آبیاری، رقم، محلول‌پاشی سیلیسیم و برهمکنش اثر سیلیسیم و تنش کم آبیاری بر میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). با اعمال تنش کم آبیاری فعالیت آنزیم پراکسیداز در برگ کاهش یافت، به گونه‌ای که تیمار نیاز آبی ۴۰ درصد، فعالیت آنزیم پراکسیداز را ۷۰ درصد کاهش داد (جدول ۵). فعالیت آنزیم در رقم بهاران با میانگین ۳۱/۳۰ واحد بر میلی‌گرم پروتئین نسبت به رقم شیراز و افق بیشتر بود ولی از لحاظ آماری با رقم سیروان معنی‌دار نبود (جدول ۵).

کاربرد تیمار سیلیسیم در مطالعه حاضر با افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز موجب افزایش تحمل به تنش کم آبیاری شده است. کاربرد سه میلی‌مولار سیلیسیم، با آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز را ۳۰ درصد نسبت به تیمار عدم کاربرد سیلیسیم با نیاز آبی ۴۰ درصد

تأثیر ضخامت برگ گیاه تغییر می‌کند، این پژوهشگران خاطر نشان کردند که ضخامت برگ ممکن است با توجه به نوع محصول، مرحله رشد، رقم و شرایط محیطی تغییر کند. بنابراین شاید بتوان تفاوت بین ارقام گندم را از نظر عدد کلروفیل متر در شرایط شاهد (عدم تنش کم آبیاری) به تفاوت موجود میان ضخامت برگ ارقام ارتباط داد (۱۶). طی آزمایشی که انجام شده بود به این نتیجه رسیدند که در شرایط تنش، شاخص سبزی‌نگی کاهش یافت ولی کاربرد سیلیسیم سبب افزایش این شاخص در گیاه شد که با نتایج این پژوهش مطابقت داشت (۳۳). گزارش شده است که در صورت کمبود سیلیسیم، میزان کلروفیل کم شده و در نتیجه آن، فتوسنتز در گیاه کاهش می‌یابد و دلیل این امر را به نقش سیلیسیم در زنجیره فتوسنتزی و ممانعت از تخریب زنجیره کلروفیلی مرتبط می‌دانند (۲۶). در این پژوهش، برهمکنش تنش کم آبیاری و سیلیسیم از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری را نشان ندادند.

گزارش کردند که در گیاه ذرت تحت شرایط تنش کم آبیاری تفاوت معنی داری در میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در مقایسه با نمونه‌های شاهد مشاهده نشد. در این پژوهش تیمار سیلیسیم باعث افزایش در میزان فعالیت آنزیم ضد اکسند کاتالاز شد.

گانگ و همکاران (۱۶) مشاهده کردند که اضافه کردن سیلیسیم فعالیت دو آنزیم کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز را در گیاه گندم تحت تنش کم آبیاری افزایش می‌دهد. این پژوهشگران در آزمایش‌های دیگری در گندم (۱۵ و ۲۷) مشاهده کردند که در شرایط آبیاری مناسب، فعالیت سوپراکسید دیسموتاز با مصرف سیلیسیم تغییر نمی‌کند، در حالی که فعالیت آنزیم کاتالاز کاهش می‌یابد. بنابراین سیلیسیم با تحریک افزایش فعالیت این آنزیم‌ها در شرایط تنش، سبب حفاظت بیشتر سلول و بافت‌ها و افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش‌های اکسند می‌شود. شائو و همکاران (۴۰) به این نتیجه رسیدند که در حضور سیلیسیم، فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی مانند کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز، افزایش یافته و به دنبال آن غلظت گونه‌های فعال اکسیژن کاهش می‌یابد. همچنین، میزان پراکسید هیدروژن نیز به شدت کاهش می‌یابد. به این ترتیب، یکی از عوامل گیاهی تحریک کننده تولید اسیدهای آمینه آزاد پرولین از بین رفته و میزان آن کاهش می‌یابد.

سوپراکسید دیسموتاز

بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر تیمار تنش کم آبیاری و محلول پاشی سیلیسیم در سطح احتمال یک درصد و اثر رقم و برهمکنش رقم و سیلیسیم و تنش در سطح احتمال پنج درصد بر میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز معنی دار شد (جدول ۲). تنش کم آبیاری باعث کاهش معنی دار فعالیت این آنزیم در برگ نسبت به تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی شد. به طوری که نیاز آبی ۴۰ درصد، میزان فعالیت این آنزیم را ۴۱ درصد کاهش داد (جدول ۵).

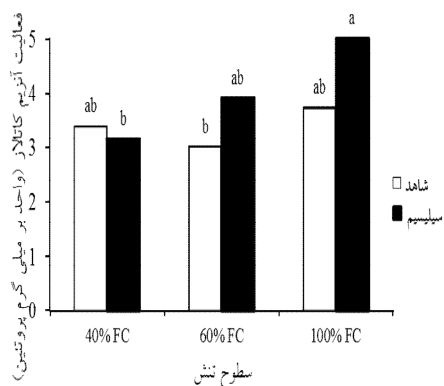
کاربرد تیمار سیلیسیم در مطالعه حاضر نیز همچون دو آنزیم کاتالاز و پراکسیداز باعث افزایش این آنزیم شده است.

افزایش داده است (شکل ۲- الف). برخی یافته‌های پژوهشی حاکی از تأثیر مثبت تیمار سیلیسیم بر فعالیت آنزیم پراکسیداز است که در نتیجه محتوای H_2O_2 سلول کاهش یافته و در نهایت به کاهش خسارت ناشی از اثر اکسیدکنندگی H_2O_2 ختم می‌شود (۳). بر اساس نتایج، مشاهده شد که میزان فعالیت این آنزیم با نیاز آبی ۴۰ و ۶۰ درصد در ارقام بهاران و سیروان نسبت به افق و شیراز برتری نشان دادند (جدول ۶). نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داده است (۳۵ و ۳۶)، ژنوتیپ‌های متحمل به کم آبیاری گندم در شرایط تنش از میزان شاخص سبزیگی بالاتری برخوردار هستند، همچنین فعالیت بیشتری از آنزیم پراکسیداز را در مقایسه با ارقام حساس تحت شرایط تنش کم آبیاری از خود نشان دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نیز با گزارش پژوهشگران مطابقت داشت.

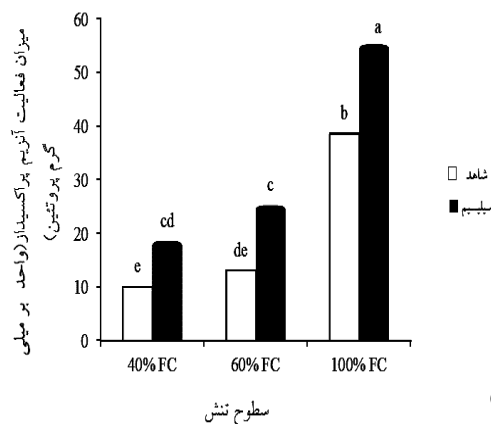
فعالیت کاتالاز

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمار تنش کم آبیاری، محلول پاشی سیلیسیم در سطح یک درصد و رقم در سطح احتمال پنج درصد بر فعالیت آنزیم کاتالاز معنی دار شد (جدول ۲). برهمکنش سیلیسیم، رقم و تنش کم آبیاری در سطح پنج درصد معنی دار شد. در تیمار نیاز آبی ۴۰ درصد فعالیت کاتالاز با میانگین $3/28$ واحد بر میلی گرم پروتئین نسبت به آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی با میانگین $4/37$ واحد بر میلی گرم پروتئین به طور معنی داری کمتر بود. همچنین مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز مربوط به رقم بهاران در تیمار نیاز آبی ۱۰۰ درصد و سیلیسیم سه میلی مولار حاصل شد (جدول ۴). رقم بهاران میزان فعالیت آنزیمی بیشتری را نسبت به رقم شیراز نشان داد (جدول ۵).

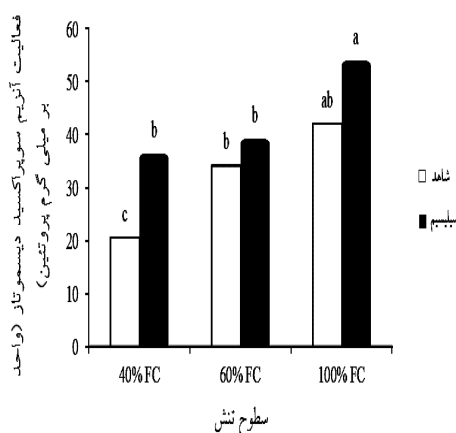
برهمکنش سیلیسیم و تنش کم آبیاری نیز در سطح احتمال پنج درصد بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز معنی دار شد. به طوری که محلول پاشی بوته‌ها با غلظت سه میلی مولار در شرایط تنش باعث افزایش معنی دار فعالیت این آنزیم نسبت به حالت عدم کاربرد سیلیسیم شد (شکل ۲- ب). لی و همکاران (۲۱)



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۲. الف) برهمکنش سیلیسیم و تنش کم آبیاری بر میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز ارقام گندم، ب) برهمکنش سیلیسیم و تنش کم آبیاری بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز ارقام گندم، ج) اثر برهمکنش سیلیسیم و تنش کم آبیاری بر میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز ارقام گندم. حروف مشترک نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار بین تیمارها است. (FC: ظرفیت زراعی مزرعه)

داد که رقم سیروان در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد و محلول پاشی سه میلی مولار سیلیسیم، بیشترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را دارا بود (جدول ۴). بنابراین این مطلب گواه این نظریه است که در اثر اعمال تنش کم آبیاری با کاهش محتوای نسبی آب برگ، محدودیت‌های غیر روزنه‌ای به‌عنوان عامل اصلی، موجب کاهش فتوسنتز ارقام مورد بررسی شده است. بنابراین به نظر می‌رسد افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز در ارقام متحمل بهاران و سیروان عمدتاً به دلیل مقابله با تنش اکسیداتیو ایجاد شده ناشی از تنش کم آبیاری است که این موضوع با نتایج گانگ و همکاران مطابقت دارد (۱۵).

کاربرد تیمار سه میلی مولار سیلیسیم، میزان آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را ۲۶ درصد افزایش داده است (جدول ۵). همچنین برهمکنش تنش کم آبیاری و سیلیسیم در سطح احتمال پنج درصد بر میزان فعالیت این آنزیم معنی دار شد (جدول ۲). به طوری که فعالیت این آنزیم در حالت آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و محلول پاشی بوته‌ها با غلظت سه میلی مولار سیلیسیم بیشترین میزان بود و نسبت به تیمار عدم کاربرد سیلیسیم در تنش کم آبیاری ۲۲ درصد بیشتر بود (شکل ۲-ج). رقم سیروان نسبت به ارقام بهاران، افق و شیراز میزان فعالیت آنزیم بیشتری را نشان داد (جدول ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان

جدول ۶. اثر برهمکنش رقم و تنش کم آبیاری بر شاخص سبزینگی و میزان فعالیت پراکسیداز ارقام گندم در شرایط تنش کم آبیاری

تنش کم آبیاری	ارقام	شاخص سبزینگی (SPAD)	فعالیت پراکسیداز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین)
%۱۰۰FC	افق	۵۷/۳۳ ^{ab}	۲۹/۱۰ ^b
	بهاران	۵۸/۲۵ ^a	۵۳/۶۲ ^a
	سیروان	۵۸/۱۸ ^a	۵۵/۳۳ ^a
	شیراز	۵۵/۹۰ ^{abc}	۴۹/۳۹ ^a
%۶۰FC	افق	۵۳/۷۲ ^c	۱۴/۷۸ ^{cd}
	بهاران	۵۵/۳۶ ^{abc}	۲۱/۹۸ ^{bc}
	سیروان	۵۵/۹۰ ^{abc}	۲۵/۸۵ ^b
	شیراز	۵۳/۵۸ ^{cd}	۱۳/۹۱ ^{cd}
%۴۰FC	افق	۴۷/۸۳ ^e	۱۱/۶۷ ^{cd}
	بهاران	۵۴/۵۱ ^{cd}	۱۸/۶۴ ^{bcd}
	سیروان	۵۰/۷۵ ^{ed}	۱۸/۰۹ ^{bcd}
	شیراز	۵۵ ^{bc}	۸/۰۸ ^d

حروف مشابه در هر تیمار برای هر ویژگی نشانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون LSD است.

معنی دار طول سنبله، شاخص سبزینگی، محتوای نسبی آب برگ و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شد. رقم بهاران، سیروان و افق از نظر بیشتر شاخص‌های اندازه‌گیری شده بر رقم شیراز برتری داشت. سیلیسیم با افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، مانع از خسارت اکسند به سلول‌های گیاهی شد، همچنین این ماده با حفظ تعادل آبی سلول از کاهش شدید محتوای نسبی آب برگ جلوگیری کرد که این امر سبب پایداری ساختار سلول در برابر تنش کم آبیاری شد. با توجه به اینکه، این پژوهش در شرایط گلخانه‌ای انجام شد، پیشنهاد می‌شود که در شرایط مزرعه‌ای و در شرایط تنش‌های مختلف محیطی در مورد گندم و سایر گیاهان نیز، مورد ارزیابی قرار گیرد تا بتوان با اطمینان بیشتری در مورد کاربرد سیلیسیم، اظهار نظر کرد.

پژوهشگران گزارش کردند که تنش کم آبی باعث کاهش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز در گیاه گلرنگ می‌شود، درحالی‌که در تیمار سیلیسیم فعالیت این دو آنزیم افزایش پیدا کرد. آنان بیان داشتند افزایش این آنزیم‌ها تحت تیمار سیلیسیم باعث کاهش در محتوای H_2O_2 سلول می‌شود (۴).

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که اگرچه تیمار کم آبیاری می‌تواند ویژگی‌های فیزیولوژیک و ماده خشک هر بوته گیاه گندم را تحت تأثیر قرار دهد، اما میزان تأثیر آن بر هریک از ویژگی‌ها متفاوت است. تنش کم آبیاری باعث کاهش

منابع مورد استفاده

1. Agarie, S., H. Uchida, H. Agata, F. Kubota and P. B. Kaufman. 1993. Effect of silicon on growth, dry matter production and photosynthesis in rice (*Oryza sativa* L.). *Crop Production and Improvement Technology* 34: 225-234.
2. AREEO. 2016. Agricultural Research, Education and Extension Organization. Available online at: <http://www. areo. ir.> (In Farsi).

3. Al-aghabary, K., Z. Zhu and Q. Shi. 2005. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *Journal of Plant Nutrition* 27(12): 2101-2115.
4. Amiri, A., A. Bagheri, M. Khwaja and N. Najafabadi. 2013. The effect of silicon on yield and antioxidant enzymes safflower under drought stress. *Journal of Crop Production Research* 5(4): 361-372. (In Farsi).
5. Antolin, M. C., J. Yoller and M. Sanchez-Diaz .1995. Effects of temporary drought on nitrate-fed and nitrogen – fixing alfalfa plants. *Plant Science* 107: 159-165.
6. Arora, A., T. M. Byrem, M. G. Nair and G. M. Strasburg. 2000. Modulation of liposomal membrane fluidity by flavonoids and is flavonoids. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 373(1): 102-109.
7. Asada, K. 2000. The water–water cycle as alternative photon and electron sinks. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Biological Sciences* 355(1402): 1419-1431.
8. Ashraf, M., M. Shabaz, S. Mahmood and E. Rasul. 2001. Relationship between growth and photosynthetic characteristics in pearl millet (*Pennisetum glaucum*) under limited water deficit conditions with enhanced nitrogen supplies. *Belgian Journal of Botany* 134: 131-144.
9. Li-Ping, B. A. I., S. U. I. Fang-Gong, G. E. Ti-Da, S. U. N. Zhao-Hui, L. U. Yin-Yan, Z. H. O. Guang-Sheng and U. Gunang-Sheng. 2006. Effect of soil drought stress on leaf water status, membrane permeability and enzymatic antioxidant system of maize. *Pedosphere* 16: 326-332.
10. Beauchap, C. and I. Fridovich. 1971. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry* 44(1): 276-287.
11. Dhindsa, R. S., P. Plumb- Dhindsa and A. Thorpe .1981. Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *Journal of Experimental Botany* 32: 93-101.
12. Emam, Y. 2014. Cereal Crops Production. University Publication Center, Tehran, Iran. (In Farsi).
13. Estill, K., R. H. Delany, W. K. Smith and R. L. Ditterline. 1991. Water relations and productivity of alfalfa leaf chlorophyll variants. *Crop Science* 31: 1229-123.
14. Evans, L. T. 1996. Crop Evolution, Adaptation and Yield. Cambridge University Press, UK.
15. Gong, H., X. Zhu, K. Chen, W. Suomin and C. H. Zhang. 2005. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pot under drought. *Plant Science* 169(2): 313-321.
16. Gong, H. J., K. M. Chen, G. C. Chen, S. M. Wang and C. L. Zhang. 2003. Effects of silicon on growth of wheat under drought. *Journal of Plant Nutrition* 26: 1055-1063.
17. Gottardi, S., F. Iacuzzo, N. Tomasi, G. Cortella, L. Manzocco, R. Pinton and S. Cesco. 2012. Beneficial effects of silicon on hydroponically grown corn salad (*Valerianella locusta* L.) plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 56: 14-23.
18. Habibi, D., M. Mashdi Akbar Boojar, A. Mahmoudi, M. R. Ardakani and D. Taleghani. 2004. Antioxidative enzyme in sunflower subjected to drought stress. In: Proceeding of 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia. PP. 1-4.
19. Jamil, M., S. Rehman and E. S. Rha. 2007. Salinity effect on plant growth, PSII photochemistry and chlorophyll content in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) and cabbage (*Brassica oleraceacapitata* L.). *Pakistan Journal of Botany* 39: 753-760.
20. Johnson, R. C., H. T. Nguyen and L. Croy. 1984. Osmotic adjustment and solute accumulation in two wheat genotype differing in drought resistance. *Crop Science* 24: 947-962.
21. Li, Q. F., C. C. Ma and Q. L. Shang. 2007. Effects of silicon on photosynthesis and antioxidative enzymes of maize under drought stress. *Ying Yong Shen Tai XueBao* 18: 531-536.
22. Liu, F., M. N. Andersen and C. R. Jensen. 2004. Root signal controls pod growth in drought-stressed soybean during the critical, abortion-sensitive phase of pod development. *Field Crops Research* 85:159-166.
23. Ma, J. F. and E. Takahashi. 2002. Soil, Fertilizer and Plant Silicon Research in Japan. Elsevier Science. Japan.
24. Mac Adam, J. W., C. J. Nelson and R. E. Sharp. 1992. Peroxidase Activity in the leaf elongation zone of tall fescue I. Spatial distribution of ionically bound peroxidase activity in genotypes differing in length of the elongation zone. *Plant Physiology* 99(3): 872-878.
25. Maghsoudi, K. and Y. Emam. 2014. Effect of exogenous silicon on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under salt stress conditions. *Iran Agricultural Research* 35: 1-8. (In Farsi).
26. Maghsoudi, K., Y. Emam and M. Pesarakli. 2013. Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions. *Journal of Plant Nutrition* 39: 1001-1015.
27. Mayoral, M., L. D. Atsman, D. Shimshi and Z. Gromete - Elhanan. 1981. Effect of water stress of enzyme activities on wheat and related wild species: carboxylase activity, electron transport and phosphorylation in isolated chloroplasts. *Journal of Plant Physiology* 8: 358-393.
28. Mittler, R. 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science* 7(9): 405-410.

29. Mittler, R., S. Vanderauwera, M. Gollery and F. Van Breusegem. 2004. Reactive oxygen gene network of plants. *Trends in Plant Science* 9(10): 490-498.
30. Mohammadi, A., A. Majidi, M. R. Bihamta and H. Heidari Sharif abadi. 2006. Evaluation of drought stress on agronomic characteristics in a number of wheat varieties. *Research and Construction in Agriculture and Agronomic* 73: 185-192. (In Farsi).
31. Mohammadi, H., A. Ahmadi, F. Moradi, A. Abbasi and M. Judy. 2011. Evaluation of important traits to improve wheat yield under drought stress. *Iranian Journal of Crop Sciences* 42(2): 373-385. (In Farsi).
32. Mohanty, N. 2003. Photosynthetic characteristics and enzymatic antioxidant capacity of flag leaf and the grain yield in two cultivars of (*Triticum aestivum* L.) exposed to warmer growth conditions. *Journal of Plant Physiology* 160(1): 71-74.
33. Mussa, H. R. 2006. Influence of exogenous application of silicon on physiological response of salt stressed maize (*Zea mays* L.). *Journal Agriculture and Biology* 8(3): 293-297.
34. Paleg, I. G. and D. Aspinal. 1981. The physiology and biochemistry of drought resistance in plants. *Journal of Experimental Botany* 125: 285-288.
35. Sairam, R. K. and D. C. Saxena. 2000. Oxidative stress and antioxidant in wheat genotypes: possible mechanism of water stress tolerance. *Journal of Agronomy and Crop Science* 184(1): 55-61.
36. Sairam, R. K. and G. C. Srivastava. 2001. Water stress tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.): Variation in hydrogen peroxide accumulation and antioxidant activity in tolerant and susceptible genotype. *Journal of Agronomy and Crop Science* 186(1): 63-70.
37. Sang, G. K., W. K. Kio, W. Eun and C. Doil. 2002. Silicon- induced cell wall fortification of rice leaves: a possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast. *Phytopathology* 92: 1095-1103.
38. Schonfeld, M. A., R. C. Johnson, B. F. Carver and D. W. Mornhinweg. 1988. Water relations in winter wheat as drought resistance indicators. *Crop Science* 28:526-531.
39. Sgherri, C. L., M. Maffei and F. Navari-Izzo. 2000. Antioxidative enzymes in wheat subjected to increasing water deficit and rewatering. *Journal of Plant Physiology* 157(3): 273-279.
40. Shao, H., Z. Liang, M. Shao and Q. Sun. 2005. Dynamic changes of anti-oxidative enzymes of 10 wheat genotypes at soil water deficits. *Colloids and Surfaces Bio interfaces* 42(3): 187-195.
41. SPII. 2016. Seed and Plant Improvement Institute. Available online at: <http://Spil.ir>. (In Farsi).
42. Tahir, M. A., T. Rahmatullah, M. Aziz, S. Ashraf, M. Kanwal and M. A. Maqsood. 2006. Beneficial effects of silicon in wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *Pakistan Journal of Botany* 38(5): 1715-1722.

Effect of Silicon Foliar Application on Morpho-Physiological Characteristics and Antioxidant Activity of Wheat under Limited Irrigation Conditions

S. Kooh Derangi¹ and Y. Emam^{2*}

(Received: August 20-2016; Accepted: April 10-2018)

Abstract

Water stress is the most important abiotic stress in crop production. Silicon (Si) is the second most abundant element in the soil with beneficial effects on plant tolerance to biotic and abiotic stresses. In order to evaluate the effect of this element in increasing tolerance to water deficit in wheat, a factorial experiment was conducted based on a completely randomized design with three replications in the greenhouse of College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. Treatments included four wheat cultivars, Shiraz, Sirvan, Ofogh, Baharan, foliar silicon application in two-levels, zero (control), and 3 mM, and three levels of water deficit (field capacity, 40% and 60% of field capacity). The results showed that water deficit reduced spike length (31%), dry matter per plant (41%), grain yield (25%), greenness index (11%), flag leaf relative water content (24%), catalase (24%), peroxidase (70%) and superoxide dismutase activity (41%). Baharan and Sirvan cultivars were superior for greenness index and peroxidase activity. However, foliar silicon application at 3 mM concentration ameliorated the negative impacts of water deficit stress. Foliar application of silicon enhanced all the above parameters including antioxidants. For a majority of the measured characteristics, it was evident that Baharan and Sirvan, as water deficit tolerant cultivars, and Ofogh, were superior compared to Shiraz cultivar. The results showed that foliar application of silicon increased the activity of antioxidant enzymes and as a result ameliorated the negative impacts of water stress.

Keywords: Antioxidant enzyme, Greenness index, Relative leaf water content, Silicon, Water deficit stress

1, 2. MSc. Student and Professor, Respectively, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.

*: Corresponding Author, Email: Yaemam@shirazu.ac.ir