

اثر مصرف سیلیسیوم بر صفات مرفوفیزیولوژیک، عملکرد و محتوای عناصر معدنی دانه گندم تحت شرایط تنش خشکی

عزیز کرملاجعب^{۱*}، عبدالمهدی بخشنده^۲، محمد حسین قرینه^۳،
محمدرضا مرادی تلاوت^۴ و قدرت اله فتحی^۵

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۸/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱/۲۱)

چکیده

به منظور بررسی تأثیر سیلیسیوم بر برخی صفات فیزیولوژیک، عملکرد و اجزای آن و کیفیت دانه گندم رقم چمران در شرایط تنش خشکی، آزمایشی در سال زراعی ۹۱-۱۳۹۰ در مزرعه دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان به صورت کرت های خرد شده در قالب بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. در این آزمایش سطوح تنش خشکی (آبیاری پس از تخلیه ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد رطوبت قابل استفاده خاک) در کرت های اصلی و سیلیسیوم (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم سیلیس خالص در هکتار) (از منبع پتاسیم سیلیکات) در کرت های فرعی جای داده شدند. نتایج نشان داد که تنش خشکی باعث افزایش میزان نشت الکترولیتی، موم کوتیکول، محتوای سیلیسیوم برگ و دانه و نیتروژن دانه شد، اما بر صفات عملکرد و اجزای آن و محتوای پتاسیم دانه تأثیر منفی داشت. تنش ملایم و شدید باعث کاهش به ترتیب ۱۷ و ۳۸ درصد عملکرد نسبت به شاهد بدون تنش شد. اثر کاربرد سیلیسیوم به جز بر صفت تعداد سنبله در مترمربع، بر سایر صفات معنی دار بود. سیلیسیوم بیشترین تأثیر را بر میزان نشت الکترولیتی داشته و سبب کاهش ۳۵ درصدی این شاخص گردید. هم چنین مصرف ۳۰ کیلوگرم سیلیسیوم سبب افزایش محتوای در برگ و دانه، پتاسیم دانه و عملکرد و اجزای آن شد. میزان افزایش عملکرد دانه با مصرف ۳۰ کیلوگرم سیلیسیوم، ۶ درصد بوده و در تنش شدید این میزان به ۱۴ درصد افزایش یافت. بنابراین با توجه به فراوانی و در دسترس بودن سیلیسیوم، مصرف این عنصر در شرایط تنش می تواند به عنوان یک عنصر مفید برای گیاه گندم مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی: تنش خشکی، صفات فیزیولوژیک، کاربرد سیلیسیوم، عملکرد دانه گندم

۱، ۲، ۳ و ۴. به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استاد، دانشیار، استادیار و استاد گروه زراعت دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان
*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: azizchaab@gmail.com

مقدمه

تنش های محیطی از جمله عواملی هستند که استفاده از حداکثر پتانسیل آب، خاک و گیاه در جهت حداکثر تولید را محدود می کنند. تنش خشکی مهم ترین عامل محدود کننده رشد و تولید محصولات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک جهان است (۳). ثابت شده که به دلیل اینکه مواد غذایی به صورت محلول در آب جذب گیاه می شود. بنابراین هرگونه محدودیت در منابع آبی، منجر به محدودیت در کلیه منابع غذایی شده و گیاه گندم مجبور به کم کردن رشد رویشی و اتمام زود هنگام آن مرحله و شروع مرحله زایشی می گردد. در نتیجه ارتفاع بوته، اجزای عملکرد و عملکرد کاهش می یابد (۱۶). به نظر می رسد که در شرایط کمبود آب استفاده و تنظیم غلظت برخی از عناصر می تواند به عنوان یک استراتژی برای جلوگیری از اثرات مخرب تنش خشکی مؤثر بوده و زمینه سازگاری گیاه را فراهم آورد. سیلیسیوم دومین عنصر از لحاظ فراوانی در سطح کره زمین، و مقدار آن بین ۰/۱ تا ۰/۶ میلی مول در دسی متر مکعب خاک می باشد، ولی به عنوان عنصر اساسی برای گیاهان محسوب نگردیده و نقش آن در بیولوژی گیاهان به طور کامل درک نشده است. سیلیسیوم به فرم های مختلف از جمله اسید مونوسیلیسیک $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ در خاک وجود دارد. در اندام هوایی با از دست دادن آب، اسید مونوسیلیسیک غلیظ شده، و به فرم ژل سیلیس $(\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ تبدیل و باعث افزایش تحمل گیاه به تنش می شود (۷).

لیانگ و همکاران (۱۲) به این نتیجه رسیدند که کاربرد سیلیسیوم سبب رسوب آن در غشاء سلولی و سیلیسی شدن، و کاهش معنی دار میزان نشت الکترولیتی می شود. دلیل این امر را در این می دانند که سیلیسیوم در درون گیاه یک عنصر غیر متحرک است و پس از رسوب در داخل سلول به صورت ژل سیلیکا پلیمر شده در می آید و دیگر برای گیاه غیر قابل استفاده می شود و تنها نقش استحکام و پایداری را خواهد داشت. ما و یاماجی (۱۵) بیان نمودند که سیلیسیوم با رسوب در زیر لایه کوتیکولی (با ضخامت ۰/۱ میکرومتر) برگ و تشکیل لایه دوگانه کوتیکول-سیلیس به ضخامت ۲/۵ میکرومتر و در نتیجه افزایش ضخامت لایه کوتیکول و موم آن باعث

کاهش تعرق از سطح برگ و پوست گیاهی که در شرایط تنش خشکی قرار دارد می شود. در نتیجه این عمل محتوای آب گیاه افزایش و توسعه برگ و عملکرد نیز افزایش می یابد. طالع احمد و حداد (۱۹) در آزمایشی بر روی دو ژنوتیپ گندم در شرایط تنش خشکی گزارش دادند که تنش خشکی اعمال شده باعث کاهش معنی دار محتوای نسبی آب برگ شده و کاربرد سیلیسیوم در این شرایط، محتوای نسبی آب برگ را در سطح ۱ درصد افزایش داد. گنگ و همکاران (۸) گزارش کردند که در شرایط تنش خشکی در گندم، کاربرد ۲/۱۱ میلی مول سدیم سیلیکات در کیلوگرم خاک در کشت گلدانی، باعث افزایش محتوای نسبی آب برگ ها نسبت به حالت تنش خشکی گردید. سودمندی سیلیسیوم در تحمل تنش خشکی در غلات مربوط به فعالیت بیشتر $\text{H}^+ - \text{ATPase}$ موجود در غشاء و $\text{H}^+ - \text{PPase}$ در تونوپلاست و جذب بیشتر یون پتاسیم، افزایش غلظت داخل سلول و جذب و نگهداری آب و تأثیر بر فعالیت برخی آنزیم ها و فرایندهای فیزیولوژیکی می باشد (۱۱). سیلیسیوم سبب می شود که دیواره سلول های آندودرمی ریشه سیلیسی شده و بعد از اینکه ظرفیت این قسمت ها جهت سیلیسی شدن تکمیل شد، قسمت عمده سیلیسیوم به اندام هوایی ارسال شده و در آنجا تجمع کرده و باعث افزایش غلظت این عنصر می شود (۴).

لی و همکاران (۱۰) بیان نمودند که سیلیسیوم به علت سخت و سیلیسی کردن سلول های برگ، باعث افزایش دوام و پایداری غشاء سلول و در نتیجه افزایش فتوستتیز آن می گردد. این امر سبب اولاً افزایش دوام برگ و دوره پر شدن دانه در شرایط تنش می شود و امکان رشد و افزایش وزن دانه ها فراهم می گردد. ثانیاً حفظ پایداری غشاء سلول منجر به حفظ محتوای نسبی آب و کاهش نشت مواد سلولی و در نتیجه تداوم جریان انتقال مواد فتوستتیزی ذخیره شده به دانه و ثالثاً حفظ جریان فتوستتیز و افزایش مواد فتوستتیزی جاری دانه و افزایش وزن دانه و عملکرد می گردد. آزمایشی که کایا و همکاران (۹) روی ذرت انجام دادند، نشان داد که در شرایط تنش خشکی، وزن تر و خشک گیاه کاهش می یابد و کاربرد سیلیسیوم در این شرایط منجر به افزایش این پارامترها شده، رشد گیاه را بهبود و مقدار

عملکرد را افزایش می‌دهد. گزارش شده حد بحرانی میزان سیلیسیوم در خاک برای گیاه برنج بطور متوسط ۳۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و یک هشتم این مقدار برای گیاه گندم مورد نیاز می‌باشد (۱۴). به‌طور کلی خوزستان یکی از مهم‌ترین مناطق از لحاظ تولید گندم کشور می‌باشد که با دارا بودن شرایط خاص آب و هوایی، همواره شرایط مساعدی برای وقوع تنش‌های مخرب محیطی به‌ویژه خشکی پایان دوره را در خود داشته است. به همین منظور پژوهش حاضر با هدف بررسی سطوح سیلیسیوم بر صفات مرفوفیزیولوژیک، عملکرد و اجزای آن در گندم در شرایط تنش خشکی انتهای فصل اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۹۱-۱۳۹۰ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه کشاورزی و منابع رامین خوزستان اجرا گردید. این منطقه جزء مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود و برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. شهر رامین با داشتن متوسط بارندگی سالانه حدود ۱۶۹ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت ۲۳ درجه سانتی‌گراد، از لحاظ اقلیمی جزء مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود.

آزمایش به‌صورت کرت‌های یکبار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تنش خشکی پایان دوره رشد در سه سطح بدون تنش خشکی، تنش خشکی ملایم و تنش خشکی شدید، به‌ترتیب آبیاری پس از تخلیه ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد رطوبت قابل استفاده خاک، به‌عنوان فاکتور اصلی در نظر گرفته شد. سطوح مختلف تیمار تنش از ابتدای مرحله گل‌دهی گیاه تا زمان رسیدگی اعمال شدند. تنش خشکی از طریق روش وزنی اعمال گردید و جهت تعیین دقیق زمان آبیاری برای هر تیمار هر دو روز یکبار به‌وسیله مته از کرت‌های فرعی در عمق نفوذ ریشه نمونه‌برداری به‌عمل آمد تا درصد رطوبت وزنی خاک مشخص شود. در صورت تخلیه رطوبت خاک به حد مورد نظر، حجم آب مورد نیاز برای هر بار آبیاری در هر تیمار محاسبه و آبیاری شد (۲).

مقادیر مختلف سیلیسیوم (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم

سیلیس در هکتار) به عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شدند و از منبع پتاسیم سیلیکات (دارای ۳۰ درصد سیلیس و ۳۰ درصد پتاسیم) تأمین و قبل از کشت به خاک اضافه شد. نیتروژن مورد نیاز از منبع اوره، و میزان آن ۱۴۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار (به‌صورت پایه و دو مرحله سرک) در اختیار گیاه قرار گرفت. کود فسفره مورد نیاز به‌میزان ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار از منبع فسفات آمونیوم در زمان کاشت مصرف شد. طول و عرض هر کرت فرعی دو متر و دارای ۱۰ خط کاشت با فاصله ۲۰ سانتی‌متر بود. برای جلوگیری از تأثیر تیمارها بر هم، بین کرت‌های اصلی و فرعی به‌ترتیب ۲ و ۱ متر فاصله منظور شد. پس از شخم و تهیه مناسب زمین، بذر گندم رقم چمران با تراکم ۳۵۰ بذر در متر مربع به صورت خطی با فاصله ۲۰ سانتی‌متر خطوط کشت و عمق ۳ تا ۵ سانتی‌متری به‌صورت دستی در دهه اول آذر ماه کشت و آبیاری صورت گرفت. برداشت نهایی با توجه به‌زمان رسیدگی دانه و در رطوبت ۱۴ درصد از طریق اندازه‌گیری رطوبت بذرها به‌وسیله رطوبت‌سنج در تیمارهای مختلف از ۲۰ تا ۳۰ اردیبهشت ماه طی سه نوبت به‌صورت دستی و با داس از سطح زمین و از دو خط میانی هر کرت فرعی با در نظر گرفتن نیم متر حاشیه از هر طرف انجام شد.

اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک: میزان نشت الکترولیتی (EL) به‌روش لوتس و همکاران (۱۳) محاسبه گردید. بدین ترتیب که نمونه‌های تهیه شده از جوان‌ترین برگ توسعه یافته به آزمایشگاه انتقال و با استفاده از پانچ از هر برگ دیسک‌های دایره‌ای تهیه شد. قطعات حاصل پس از آنکه سه مرتبه با آب مقطر شسته، به لوله‌های آزمایش حاوی ۱۰ میلی لیتر آب مقطر انتقال داده شدند. این نمونه‌ها در دمای آزمایشگاه بر روی شیکر با ۱۰۰ دور در دقیقه برای مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند و هدایت الکتریکی (EC_1) آنها با استفاده از دستگاه EC سنج تعیین گردید. سپس نمونه‌ها در اتوکلاو با دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفتند و EC_2 اندازه‌گیری و درصد EL نمونه‌های با استفاده از رابطه EC_2/EC_1 تعیین شد.

برای اندازه‌گیری مقدار موم کوتیکول سه نمونه یک

جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد نظر در زمان شروع آزمایش

عمق خاک (cm)	pH	EC (dS m ⁻¹)	عناصر قابل جذب (ppm)				سیلیسیوم کل* (ppm)	مواد آلی (%) O.M	بافت خاک
			Si	N	P	K			
۰-۳۰	۷/۴	۳/۶	۲۲/۳	۵/۴	۷/۲	۱۶۴	۷۲/۴	۰/۷۶	لومی رسی

* : سیلیسیوم اندازه گیری شده به وسیله بافر استات سدیم و pH = ۴

سانتی مترمربع از برگ را جدا کرده و پس از شستشو با آب مقطر و حذف گرد و غبار موجود روی سطح برگ، این نمونه ها یکی بعد از دیگری در یک ظرف حاوی ۱۰ میلی لیتر محلول تتراکلرید کربن، هر کدام به مدت ۳۰ ثانیه شستشو انجام داده و خارج شدند. سپس عصاره حاصل که حاوی موم می باشد را روی حرارت کم تر از ۱۰۰ درجه سانتی گراد قرار داده تا تبخیر صورت بگیرد. باقی مانده را با ترازوی سه رقم اعشار وزن و تقسیم بر سه شد، و مقدار موم برای هر سانتی مترمربع برحسب میلی گرم در واحد سطح برگ گزارش شد (۱). جهت تعیین درصد رطوبت نسبی برگ پرچم از هر واحد آزمایشی تعداد ۳ عدد برگ پرچم انتخاب و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شدند، به قطعات ۲ سانتی متری تقسیم و با دقت ۰/۰۰۱ گرم توزین گردیدند (FW). سپس این قطعات به منظور تعیین وزن تورژسانس به مدت ۴ ساعت در شدت نور کم در داخل آب مقطر قرار داده شدند و وزن اشباع آنها اندازه گیری شد (SW). در نهایت این برگ ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد در آون نگهداری و سپس وزن خشک آنها تعیین گردید (DW). درصد رطوبت نسبی برگ پرچم با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (۱۸).

$$RWC = (FW - DW / SW - DW) \times 100$$

جهت محاسبه میزان سیلیسیوم برگ پرچم از روش رنگ سنجی آمینومولیدات آبی استفاده شد. به این صورت که از طریق تهیه عصاره نمونه مورد نظر طبق روش الیوت و سنیدر (۵) با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Spectronic Genesys U.S.A) 5, در طول موج ۶۵۰ نانومتر قرائت گردید. هم چنین میزان پتاسیم نمونه های به وسیله دستگاه فلیم فتومتر (Jenway PFP-7) و درصد نیتروژن نمونه ها به وسیله دستگاه کجلدال (2300 Kjeltac Analyzer unit, Germany) اندازه گیری شد.

اندازه گیری میزان عملکرد و اجزای آن: دو خط وسطی کرت را جدا نموده و تعداد پنجه بارور (تعداد سنبله) تعیین و به طور تصادفی ۲۰ سنبله از آن دو خط جدا شد و دانه ها از سنبله جدا و شمارش و به عنوان تعداد دانه در سنبله گزارش شد. برداشت نهایی از دو خط وسطی و به طور جداگانه در زمان رسیدگی فیزیولوژیکی و در رطوبت ۱۴ درصد صورت گرفت. دو نمونه ۵۰۰ عددی از بذرها جدا و توزین شدند و در صورت کمتر بودن میزان تفاوت از ۴ درصد، مجموع وزن آن دو نمونه به عنوان وزن هزار دانه گزارش شد. میزان عملکرد در هکتار برحسب کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

کلیه محاسبات آماری با استفاده از نرم افزار SAS انجام گرفت و برای مقایسه میانگین ها از آزمون حداقل اختلاف معنی دار LSD در سطح ۵ درصد استفاده گردید. در صورت معنی داری اثرات متقابل از روش برش دهی جهت تفسیر اثر استفاده گردید سپس میانگین ها با روش L.S.Means مقایسه گردیدند. جهت رسم منحنی ها از نرم افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

آنالیز داده ها نشان داد که اثر متقابل تنش خشکی و سیلیسیوم بر میزان نشت الکترولیتی در سطح ۵ درصد معنی دار بوده است (جدول ۲). برش دهی اثر متقابل نیز نشان داد که با افزایش سطوح تنش، تفاوت معنی داری میان سطوح سیلیسیوم وجود داشت (جدول ۴). نتایج نشان داد که بیشترین و کم ترین درصد نشت از تیمارهای به ترتیب تنش خشکی شدید بدون سیلیسیوم و تیمار بدون تنش و بدون سیلیسیوم به دست آمده است. کاربرد ۳۰ کیلوگرم سیلیسیوم در شرایط تنش خشکی ملایم و شدید باعث کاهش معنی دار نشت به ترتیب ۲۴/۵ و ۲۵/۵ درصد گردید. هم چنین در شرایط

بدون سیلیسیوم تنش ملایم و شدید باعث افزایش نشت به میزان به ترتیب ۳۵/۵ و ۴۹/۰ درصد نسبت به شاهد گردید. بیشترین تفاوت مقدار نشت در بین سطوح تنش خشکی در تیمار بدون کاربرد سیلیسیوم بوده و با افزایش مقدار سیلیسیوم این تفاوت کاهش یافته است. کاربرد سیلیسیوم در شرایط بدون تنش خشکی اثر معنی داری بر درصد نشت الکترولیتی نداشته و با افزایش سطوح تنش اثر آن بیشتر و معنی دار شده است (جدول ۵). بنابراین می توان بیان نمود که در شرایط تنش خشکی، جهت حفظ پایداری غشاء سلول، نیاز به سیلیسیوم قابل توجه خواهد شد. زهو و همکاران (۲۱) گزارش دادند که کاربرد سیلیسیوم در شرایط تنش شوری در گیاه خیار باعث کاهش درصد نشت و علت آن را کاهش تولید پراکسیداتیو لیپید و پراکسید هیدروژن بیان کردند. همچنین یادآور شدند که کاربرد سیلیسیوم در این شرایط باعث افزایش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز و دهیدرو آسکوربات ردوکتاز می شود، که نتیجه آن کاهش تخریب غشاء سلول و افزایش پایداری آن و کاهش نشت الکترولیتی و افزایش تحمل گیاه به اثرات منفی ناشی از تنش و افزایش رشد می شود. در این زمینه نتایج مشابهی در آزمایشی روی سورگوم (۱) گزارش شده است.

اثر تنش خشکی بر مقدار موم کوتیکول معنی دار بود (جدول ۲) و تنش ملایم و شدید باعث افزایش به ترتیب ۱۰ و ۲۰ درصد مقدار موم کوتیکول نسبت به شاهد گردید (جدول ۳). با توجه به اینکه تبخیر و تعرق گیاهی هم از طریق روزنه ها برگ و هم از طریق کوتیکول صورت می گیرد، می توان چنین بیان نمود که گیاه در شرایط تنش جهت جلوگیری از خروج آب از طریق برگ، با وجود آسیب به غشاء سلولی، اقدام به کاهش تبخیر و تعرق از طریق کوتیکول به واسطه افزایش موم کوتیکول می نماید. معمولاً تلفات از کوتیکول نسبتاً کم است، ولی در شرایط تنش خشکی همین مقدار اندک می تواند نقش مؤثری به خصوص در مراحل بحرانی رشد گیاه داشته باشد. کاربرد ۱۰ کیلوگرم سیلیسیوم تأثیر معنی داری بر موم کوتیکول نداشته، لیکن مقادیر ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم باعث افزایش معنی دار به مقادیر به ترتیب ۱۸/۰ و

۲۳/۵ درصد نسبت به تیمار شاهد گردید. نتایج نشان دهنده وجود یک همبستگی مثبت بین مقدار کاربرد سیلیسیوم و موم کوتیکول می باشد (شکل ۱). در این زمینه احمد و همکاران (۱) یافتند که سیلیسیوم با رسوب در زیر کوتیکول برگ ها و تشکیل لایه دوگانه کوتیکول- سیلیس، از انجام تعرق گیاهی از راه کوتیکول به دلیل افزایش غلظت سیلیسیوم و موم روی آن، جلوگیری به عمل می آورد.

نتایج مقایسه میانگین ها نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش معنی دار محتوای نسبی آب برگ نسبت به تیمار شاهد گردید. تنش ملایم و شدید باعث کاهش به ترتیب ۱۳ و ۲۶ درصد محتوای نسبی آب برگ نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۳). اثر سیلیسیوم بر محتوای نسبی آب معنی دار اما اثر متقابل آن با تنش خشکی غیر معنی دار بود (جدول ۲) و سیلیسیوم باعث افزایش معنی دار محتوای نسبی آب برگ ها گردید، به طوری که بیشترین مقدار محتوای نسبی آب در تیمار کاربرد ۳۰ کیلوگرم سیلیسیوم و کم ترین درصد آن مربوط به شاهد می باشد. رابطه مثبت معنی داری بین سیلیسیوم و محتوای نسبی آب دارد. افزایش مقدار کاربرد سیلیسیوم باعث افزایش بسیار زیاد محتوای نسبی آب برگ ها گردید. به طوری که بیشترین مقدار سیلیسیوم باعث افزایش ۱۶ درصدی آن نسبت به شاهد گردید (شکل ۲). به نظر می رسد که حضور سیلیسیوم از طریق افزایش غلظت داخل سلول به واسطه افزایش زیاد یون های پتاسیم و سیلیسیوم، باعث افزایش محتوای نسبی آب می شود.

در گیاهان با وقوع تنش، تطابق اسمزی رخ خواهد داد یعنی در اثر تجمع یون های، مواد محلول و نیز مواد آلی، محتوای مواد محلول در سلول های برگ افزایش می یابد. این بالا بودن محتوای مواد محلول باعث می شود که وقتی برگ گیاه در آب مقطر غوطه ور می شود (برای اندازه گیری محتوای نسبی آب)، مواد سیتوپلاسمی به محیط آپوپلاستی نشت می کند و آبیگری بیشتری در مقایسه با برگ شاهد داشته و در نتیجه محتوای آب برگ در گیاه تنش دیده پایین می باشد. در حضور عناصری مانند سیلیسیوم و روی در تنش، عناصر در تعادل خواهند بود و سلول قدرت حفظ ساختار خود را پیدا

جدول ۲. تجزیه واریانس صفات مورد بررسی گندم تحت تیمارهای تنش خشکی و مصرف سیلیسوم

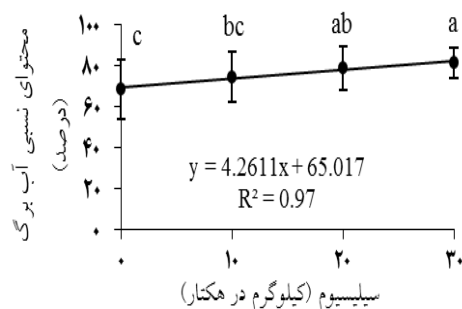
میانگین مربعیات									
منابع تغییرات	درجه آزادی	نشت الکترولیسی	موم کوتیکول	محتوی نسبی آب برگ	متر مربع	سنبله در	دانه در سنبله	وزن هزار دانه	عملکرد دانه
غلظت سیلیسوم	پتانسیم	غلظت سیلیسوم	برگ پرچم	غلظت سیلیسوم	برگ پرچم	غلظت سیلیسوم	برگ پرچم	غلظت سیلیسوم	برگ پرچم
نیروژن دانه	دانه	دانه	دانه	دانه	دانه	دانه	دانه	دانه	دانه
۰/۰۱۴ ^{ns}	۰/۴۵ ^{ns}	۰/۰۳۸ ^{ns}	۱۹/۴۲ ^{ns}	۸۱۴۰۴/۱۴ ^{ns}	۱۱۳۹ ^{ns}	۲/۴۱ ^{ns}	۲۷۷/۶ ^{ns}	۳/۱۳ ^{ns}	۱/۰۳ ^{ns}
۰/۰۶۳ ^{**}	۳۳۳۸۸ [*]	۲/۲۴ [*]	۸۶/۳۵ ^{**}	۱۰۴۴۱۴۱/۳۷ ^{**}	۵۵۱۰ ^{**}	۱۰۶/۸۸ ^{**}	۴۶۲۷/۹ [*]	۱۵۲۴/۹۵ ^{**}	۷/۸۵ [*]
۰/۰۱۸	۴۶/۴۱	۰/۳۰	۱۸/۷۹	۱۱۶۶۲/۰۴	۰/۷۵	۱/۰۹	۵۲۷/۹	۲۱/۴۸	۰/۴۶
۰/۰۶۷ ^{ns}	۱۷۲/۱۹ [*]	۱/۴۶ ^{**}	۲۸۹/۸۶ ^{**}	۱۰۷۱۵۰/۶۴ [*]	۷/۶۷ [*]	۹/۱۳ [*]	۶۷/۳۳ ^{ns}	۱۷۹/۱۶ ^{**}	۶/۳۸ ^{**}
۰/۰۶۸ [*]	۹/۶۴ ^{ns}	۰/۲۳ ^{ns}	۵۱/۲۱ ^{**}	۱۰۳۴۶۹/۸۴ [*]	۱/۴۰ ^{ns}	۰/۰۸ ^{ns}	۳۷۲/۰ ^{ns}	۴۴/۷۱ ^{ns}	۰/۲۴ ^{ns}
۰/۰۶۳	۵۰/۶۹	۰/۲۴	۱۱/۵۶	۳۲۳۰۰/۰۲	۱/۹۱	۲/۶۱	۱۲۷۳/۹	۴۵/۲۲	۰/۵۷
۷/۲۱	۱۱/۴۳	۲۰/۳۲	۸/۵۰	۴/۵۲	۳/۴۴	۶/۱۹	۷/۹۰	۸/۸۸	۱۰/۷۴
ضرب تغییرات (درصد)									
۱۲/۱۹									

* و **: به ترتیب معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد و ns غیر معنی دار

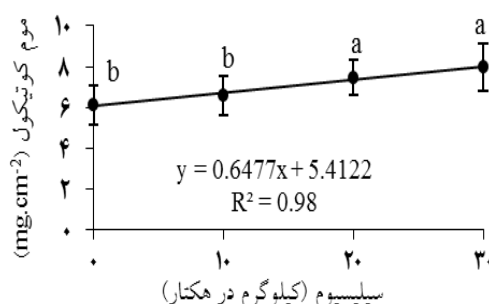
جدول ۳. نتایج مقایسه میانگین اثرات سطوح مختلف تنش خشکی بر برخی صفات مورد بررسی گندم

سطح تنش	موم کوتیکول (mg cm ⁻²)	محتوی نسبی آب (درصد)	تعداد سنبله در متر مربع	تعداد دانه در سنبله	وزن هزار دانه (گرم)	پتانسیم دانه (mg g ⁻¹ DW)	غلظت سیلیسوم دانه (mg g ⁻¹ DW)
بدون تنش	۶/۲۵ ^c	۸۷/۱ ^a	۴۳۰/۸ ^a	۲۸/۹ ^a	۴۲/۴ ^a	۶۷/۸ ^a	۱/۹ ^b
تنش ملایم	۶/۹۷ ^b	۷۵/۴ ^b	۳۹۹/۵ ^b	۲۶/۶ ^b	۴۰/۴ ^b	۶۱/۸ ^{ab}	۲/۶ ^a
تنش شدید	۷/۸۷ ^a	۶۴/۵ ^c	۳۹۴/۴ ^b	۲۲/۹ ^c	۳۷/۹ ^c	۵۷/۴ ^b	۲/۸ ^a

در هر صفت میانگین‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد با یکدیگر ندارند.



شکل ۲. اثر سطوح سیلیسیوم بر محتوای نسبی آب برگ پرچم. حروف مشترک نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار بین سطوح سیلیسیوم است.



شکل ۱. اثر سطوح سیلیسیوم بر مقدار موم کوتیکول. حروف مشترک نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار بین سطوح سیلیسیوم است.

جدول ۴. برش دهی اثر متقابل تنش خشکی و سیلیسیوم در تیمارهای تنش خشکی بر میزان نشت الکترولیتی، عملکرد دانه و غلظت سیلیسیوم برگ و نیتروژن دانه گندم

سطوح تنش خشکی	درجه آزادی	نشت الکترولیتی	عملکرد دانه	غلظت سیلیسیوم برگ	نیتروژن دانه
بدون تنش	۳	۹/۶۱ ^{ns}	۳۲۸۸۴ ^{ns}	۶/۰۸ ^{ns}	۰/۲۰۱ ^{**}
تنش ملایم	۳	۶۴/۷۶ [*]	۱۵۳۳۰۳ [*]	۱۳۴/۱۳ ^{**}	۰/۰۰۲ ^{ns}
تنش شدید	۳	۱۰۶/۰۲ ^{**}	۱۲۷۹۰۲ [*]	۲۵۲/۰۷ ^{**}	۰/۰۰۱ ^{ns}

* و ** به ترتیب معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد و ns غیر معنی دار

کرده و نشت مواد کم تر صورت می گیرد و در نتیجه محتوای نسبی آب آن افزایش می یابد (۱۱).

نتایج آزمایش نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش تعداد سنبله در مترمربع شد. تنش ملایم و شدید باعث کاهش به ترتیب ۷ و ۷/۵ درصد این جزء نسبت به شاهد گردید (جدول ۳). مطالعات نشان داده که ساقه اصلی گندم در شرایط تنش به فتوستنز و تولید مواد آسیمیلات ادامه داده و تولیدات خود را برای مصرف و رشد خود نگهداری می کند و در این شرایط انتقال مواد به ساقه های فرعی کاهش و ناباروری آنها افزایش می یابد (۶). تعداد دانه در سنبله حساس ترین جزء عملکرد به کمبود آب است. اثر تنش خشکی بر تعداد دانه در سنبله معنی دار بود (جدول ۲)، و مقایسه میانگین اثرات ساده تنش خشکی نشان داد که تعداد دانه در سنبله نیز تحت تأثیر تنش قرار گرفت. به طوری که تنش ملایم و شدید باعث کاهش معنی دار آن نسبت به تیمار بدون تنش گردید. بیشترین و کم ترین مقادیر تعداد دانه در سنبله از تیمارهای به ترتیب شاهد

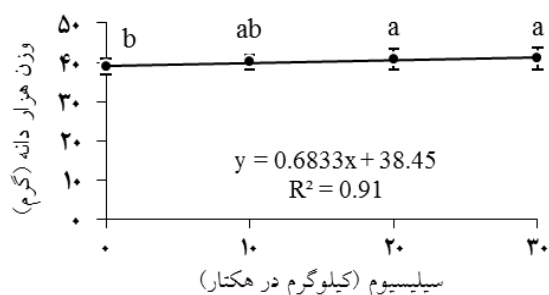
و تنش خشکی شدید حاصل شد (جدول ۳). احتمالاً تنش خشکی اعمال شده به خروج گرده صدمه زده و باعث خشکی آنها شده و تعداد دانه های تشکیل شده در سنبله را کاهش داده است. کاربرد سیلیسیوم به مقدار ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم در هکتار باعث افزایش معنی دار تعداد دانه در سنبله نسبت به تیمار شاهد شده، اما ۱۰ کیلوگرم سیلیسیوم اثر معنی داری بر روی آن نداشته است. هم چنین افزایش سیلیسیوم باعث افزایش تعداد دانه در سنبله شده و این روند تا مقدار ۲۰ کیلوگرم سیلیسیوم مشاهده شده و در مقدار بیشتر از آن تعداد دانه در سنبله ثابت باقی ماند (شکل ۳).

وزن هزار دانه معمولاً بیشتر تحت تأثیر ژنوتیپ و محیط می باشد. بنابراین شرایط محیطی به ویژه شرایط پس از مرحله تشکیل دانه تأثیر قابل ملاحظه ای بر وزن دانه خواهد داشت. وقتی که گیاه در معرض تنش خشکی قرار می گیرد، برای این که از اثرات تنش فرار کند، اقدام به کوتاه کردن چرخه زندگی خود می کند. بنابراین به دلیل کوتاه شدن طول دوره پرشدن دانه، وزن

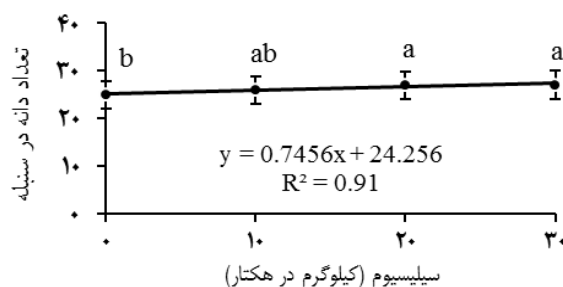
جدول ۵. نتایج مقایسه میانگین اثرات تیمارهای آزمایشی بر برخی صفات مورد بررسی گندم

نیتروژن دانه (درصد)	غلظت سیلیسیوم برگ (mg g ⁻¹ DW)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	نشت الکترولیتی (درصد)	تیمارهای آزمایشی	
				سیلیسیوم (kg ha ⁻¹)	سطوح تنش
۱/۶۳ ^b	۲۸/۹ ^a	۴۹۵۸/۳ ^a	۲۶/۲ ^a	صفر	بدون تنش
۱/۸۵ ^b	۳۱/۵ ^a	۴۹۴۷/۷ ^a	۲۷/۵ ^a	۱۰	
۲/۱۵ ^a	۳۱/۵ ^a	۴۸۱۱/۴ ^a	۲۹/۰ ^a	۲۰	
۲/۱۶ ^a	۳۲/۲ ^a	۴۷۴۴/۷ ^a	۳۰/۳ ^a	۳۰	
۲/۰۸ ^a	۳۲/۴ ^c	۳۲۳۹/۱ ^b	۴۰/۷ ^a	صفر	تنش ملایم
۲/۰۹ ^a	۴۰/۰ ^b	۳۹۵۳/۹ ^{ab}	۳۶/۰ ^{ab}	۱۰	
۲/۰۵ ^a	۴۳/۸ ^{ab}	۴۱۹۳/۸ ^a	۳۱/۴ ^b	۲۰	
۲/۰۴ ^a	۴۸/۲ ^a	۴۲۵۲/۲ ^a	۳۰/۷ ^b	۳۰	
۲/۳۶ ^a	۳۷/۵ ^b	۲۸۰۰/۰ ^c	۵۱/۳ ^a	صفر	تنش شدید
۲/۴۰ ^a	۴۳/۳ ^b	۲۸۶۵/۲ ^{bc}	۴۵/۱ ^{ab}	۱۰	
۲/۴۰ ^a	۵۳/۱ ^a	۳۱۱۰/۸ ^{ab}	۴۰/۵ ^{bc}	۲۰	
۲/۴۱ ^a	۵۷/۶ ^a	۳۲۳۹/۸ ^a	۳۷/۶ ^c	۳۰	

در هر صفت میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر سطح تنش اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد با یکدیگر ندارند.



شکل ۴. اثر سطوح سیلیسیوم بر وزن هزار دانه
حروف مشترک نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین سطوح سیلیسیوم است.



شکل ۳. اثر سطوح سیلیسیوم بر تعداد دانه در سنبله
حروف مشترک نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین سطوح سیلیسیوم است.

بیشتر از آن باعث افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه به ترتیب ۳/۴ و ۳/۸ درصد نسبت به تیمار شاهد گردید. وجود یک رابطه مثبت بین مقادیر سیلیسیوم و وزن هزار دانه در این شکل قابل توجه است. اما این رابطه در سطوح بالاتر سیلیسیوم ثابت باقی ماند و افزایش سیلیسیوم تأثیری بر وزن هزار دانه ندارد. برش‌دهی اثرات متقابل تیمارها نشان دهنده تفاوت معنی‌دار عملکرد دانه در شرایط تنش ملایم و شدید، در میان مقادیر مختلف سیلیسیوم می‌باشد (جدول ۴). براساس نتایج مقایسه

نهایی دانه‌ها کم می‌شود. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار وزن هزار دانه گردید. تنش ملایم و تنش شدید هر دو باعث کاهش معنی‌دار وزن هزار دانه نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۴/۲ و ۱۰ درصد شده است (جدول ۳). نتایج موجود در شکل ۴ نشان می‌دهد که در حضور سیلیسیوم اعم از شرایط تنش و بدون تنش وزن هزار دانه به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. مقدار ۱۰ کیلوگرم سیلیسیوم اثر معنی‌داری بر وزن هزار دانه نداشته اما مقادیر

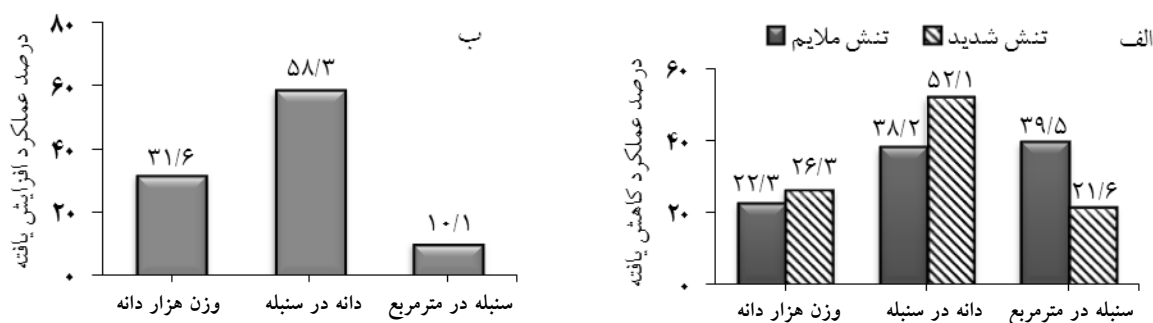
میانگین اثر متقابل تیمارها بر عملکرد دانه در جدول ۵، بیشترین و کمترین مقادیر عملکرد به ترتیب مربوط به تیمار شاهد به مقدار ۴۹۵۸ کیلوگرم در هکتار و تیمار تنش شدید بدون کاربرد سیلیسیوم (۲۸۰۰ کیلوگرم در هکتار) می باشد. در شرایط بدون تنش، کاربرد سیلیسیوم اثر معنی داری بر عملکرد دانه نداشته، اما در شرایط تنش ملایم بدون کاربرد سیلیسیوم مقدار عملکرد دانه ۳۷۶۲ کیلوگرم در هکتار می باشد. در این شرایط سیلیسیوم به مقادیر ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم در هکتار باعث افزایش معنی دار آن به مقادیر به ترتیب ۱۰/۳ و ۱۲ درصد شده است. البته اختلاف معنی دار بین این دو سطح از نظر افزایش عملکرد مشاهده نشد. هم چنین مقدار ۱۰ کیلوگرم سیلیسیوم در هکتار باعث افزایش ۴/۸ درصدی عملکرد شده، اما این افزایش معنی دار نیست. در شرایط تنش شدید بدون کاربرد سیلیسیوم عملکرد دانه ۲۸۰۰ کیلوگرم در هکتار به دست آمد و کاربرد ۱۰ کیلوگرم سیلیسیوم اثر معنی داری بر آن نداشته، لیکن دو مقدار ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم باعث افزایش معنی دار آن به مقادیر به ترتیب ۱۰ و ۱۴ درصد شده است. بنابراین در چنین شرایطی برای حصول عملکرد بالا کاربرد ۲۰ کیلوگرم سیلیسیوم در هکتار مناسب می باشد. به علاوه در شرایط بدون کاربرد سیلیسیوم تنش خشکی ملایم و شدید باعث کاهش عملکرد دانه به ترتیب ۲۴ و ۴۳/۵ درصد شده است. نتایج نشان دهنده وجود رابطه مثبت بین مقادیر سیلیسیوم و عملکرد دانه در هکتار در شرایط تنش ملایم و شدید می باشد. البته این رابطه در سطوح بالای سیلیسیوم ثابت و تفاوت بین مقادیر ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم سیلیسیوم هم در تنش ملایم و هم شدید غیر معنی دار می باشد.

به طور کلی مقدار عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی شدید و ملایم به ترتیب ۱۷ و ۳۸ درصد نسبت به تیمار بدون تنش کاهش یافته است. به طبع این کاهش ناشی از کاهش ایجاد شده در تک اجزای عملکرد می باشد. نتایج نمودار ۱- الف نشان دهنده تأثیر کاهشی هر یک از اجزای عملکرد بر مقدار کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی ملایم و شدید می باشد. نتایج نشان می دهد که در شرایط تنش ملایم بیشترین تأثیر را

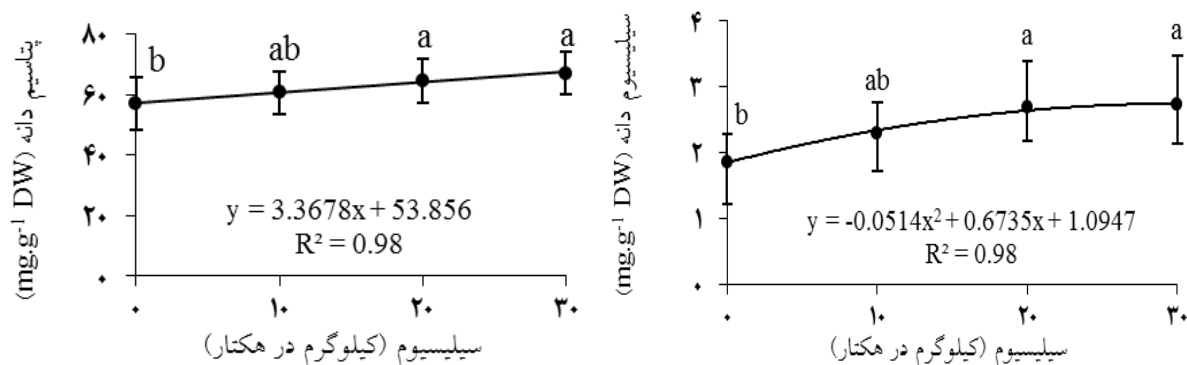
تعداد سنبله در مترمربع و دانه در سنبله را در کاهش عملکرد دارا می باشد و تأثیر جزء سوم عملکرد به مراتب پایین تر به دست آمده است. در شرایط تنش شدید نتایج متفاوت است. به طوری که کاهش دانه در سنبله، بیشترین تأثیر را در کاهش عملکرد دانه داشته است و کمترین تأثیر ناشی از تعداد سنبله در مترمربع می باشد. کاربرد سیلیسیوم باعث افزایش ۶ درصدی عملکرد دانه نسبت به شاهد شده است (۱۲ و ۱۴ درصد به ترتیب در تنش ملایم و شدید). بنابراین با توجه به نتایج شکل ۵- ب، صفت تعداد دانه در سنبله دارای بیشترین تأثیر، به اندازه ۵۸/۳ درصد در این افزایش نسبت به سایر اجزاء، بر عملکرد دانه می باشد. بنابراین می توان بیان نمود که سیلیسیوم از طریق افزایش تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه در شرایط تنش باعث افزایش عملکرد دانه شده است.

برش دهی اثر متقابل نشان داد که تنها در سطوح تنش خشکی ملایم و شدید، تفاوت معنی داری (در سطح ۵ درصد) میان سطوح سیلیسیوم بر غلظت سیلیسیوم در برگ پرچم وجود داشت (جدول ۴). نتایج به دست آمده حاکی از این بود که در شرایط تنش خشکی گیاه جهت افزایش غلظت داخل سلول مقدار بیشتری سیلیسیوم جذب می کند (۲۰). کاربرد ۳۰ کیلوگرم سیلیسیوم در هکتار در شرایط تنش ملایم و شدید باعث افزایش غلظت سیلیسیوم در اندام هوایی به ترتیب ۳۳ و ۳۵ درصد نسبت به تیمار بدون سیلیسیوم گردید. هم چنین تنش شدید بدون کاربرد سیلیسیوم باعث افزایش معنی دار غلظت سیلیسیوم برگ به اندازه ۲۲/۵ درصد نسبت به تیمار شاهد گردید. بنابراین نتایج نشان دهنده رابطه مثبت معنی داری بین سطوح تنش و سیلیسیوم بر غلظت آن در برگ پرچم می باشد. به طوری که بیشترین غلظت این عنصر در شدیدترین تنش و بیشترین مقدار کاربرد سیلیسیوم و کمترین مقدار آن از پایین ترین سطوح دو تیمار حاصل گردید (جدول ۵).

اثر تیمار تنش خشکی بر غلظت سیلیسیوم دانه در سطح ۵ درصد معنی دار بود (جدول ۲). با توجه به نتایج جدول ۳، تنش خشکی شدید و ملایم سبب افزایش معنی دار (تقریباً به یک



شکل ۵. سهم اجزای عملکرد در کاهش (الف) و افزایش (ب) عملکرد دانه تحت تیمارهای آزمایشی



شکل ۷. اثر سطوح سیلیسیم بر غلظت پتاسیم دانه

حروف مشترک نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار بین سطوح سیلیسیم است.

شکل ۶. اثر سطوح سیلیسیم بر غلظت سیلیسیم دانه

حروف مشترک نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار بین سطوح سیلیسیم است.

عنصر در برگ پرچم، جهت کاهش تعرق و تأثیر کم تر بر روی ترکیبات دانه، می تواند در این شرایط به عنوان عنصر مفید مورد استفاده قرار بگیرد. در حضور ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم سیلیسیم، غلظت آن در دانه به ترتیب ۳۱/۷ و ۳۰/۵ درصد افزایش یافت اما تیمار ۱۰ کیلوگرم تأثیر معنی داری بر آن نداشته است (شکل ۶). نتایج تحقیقات تونا و همکاران (۲۰) روی گندم، چن و همکاران (۴) روی برنج و احمد و همکاران (۱) روی سورگوم نشان داد که سیلیسیم باعث افزایش غلظت آن در اندام هوایی گیاه از جمله دانه می گردد.

تنش خشکی شدید باعث کاهش معنی دار پتاسیم دانه (۱۵ درصد)، اما تنش ملایم اثر معنی دار بر آن نسبت به شاهد نداشته است (جدول ۳). لیانگ و همکاران (۱۱) بیان نمودند که جذب و انتقال پتاسیم نیازمند ATP می باشد، و با توجه به اینکه

اندازه آن نسبت به شاهد شده است. بیشترین و کمترین غلظت سیلیسیم در دانه در تیمارهای تنش شدید (۲/۷ میلی گرم در گرم وزن خشک برگ) و شاهد (۱/۹ میلی گرم در گرم وزن خشک برگ) به دست آمد. میانگین غلظت سیلیسیم در دانه (۲/۴ میلی گرم در گرم وزن خشک برگ) کم تر از میانگین آن در برگ پرچم (۴۰ میلی گرم در گرم وزن خشک برگ) است، و نیز افزایش آن در بالاترین سطح تنش خشکی (۲۹/۵ درصد)، کم تر از افزایش آن در برگ پرچم (۳۵ درصد) نسبت به شاهد می باشد. با استناد به این نتایج می توان بیان نمود که غلظت سیلیسیم در برگ پرچم بیشتر از غلظت آن در دانه تحت تأثیر کاربرد سیلیسیم قرار گرفت و این نشان دهنده افزایش غلظت سیلیسیم در اندام هایی که دارای تعرق بیشتر هستند می باشد. بنابراین در شرایط تنش، سیلیسیم از طریق افزایش غلظت این

کاهش می‌یابد. بنابراین حتی در حضور سیلیسیوم امکان افزایش نیتروژن دانه وجود ندارد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی در هر سطحی که باشد باعث تخریب غشاء سلول و افزایش میزان نشت و در نتیجه کاهش پایداری غشاء می‌گردد. داده‌ها بیانگر آن هستند که علاوه بر اثرات مستقیم تنش، اثرات غیر مستقیم آن سبب کاهش کارایی غشاء سلول و در نتیجه کاهش فعالیت‌های فیزیولوژیکی و رشد می‌شود. همچنین تنش سبب کاهش معنی‌دار اجزای عملکرد و عملکرد (۳۸ درصد) و افزایش درصد نیتروژن دانه نسبت به تیمار شاهد شد. نتایج نشان داد که کاربرد سیلیسیوم در شرایط بدون تنش اثر معنی‌داری بر رشد گیاه نداشته، اما در شرایط تنش سبب کاهش میزان نشت و افزایش عملکرد و اجزای عملکرد گردید. در شرایط این پژوهش میزان افزایش عملکرد گندم در اثر کاربرد سیلیسیوم ۶ درصد (در شرایط تنش شدید افزایش ۱۴ درصد) بوده است. غلظت سیلیسیوم و پتاسیم در اثر کاربرد سیلیسیوم به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. این امر نشان می‌دهد که سیلیسیوم علاوه بر جذب و رسوب در گیاه سبب افزایش جذب پتاسیم می‌گردد. به‌نظر می‌رسد که سیلیسیوم علاوه بر اثرات مستقیم، به‌طور غیر مستقیم، از طریق افزایش پایداری غشاء سلول و موم کوتیکول و نیز تحریک جذب پتاسیم سبب افزایش تحمل گیاه به شرایط تنش و در نتیجه افزایش عملکرد گردد. با توجه به فراوان بودن این عنصر و عدم آلودگی زیست محیطی آن، می‌تواند به‌عنوان یک عنصر مفید در شرایط تنش، جهت کاهش خسارات تنش خشکی و دستیابی به عملکرد مطلوب مورد استفاده قرار بگیرد.

در شرایط تنش مقدار ATP کاهش می‌یابد، غلظت این عنصر در گیاه نیز تنزل پیدا می‌کند. نیاکانی و قربانلی (۱۷) یادآور شدند که کاهش پتانسیل آبی سبب کاهش جذب پتاسیم در ریشه شده که این خود سبب کاهش انتقال یون پتاسیم از ریشه به اندام هوایی می‌شود. براساس نتایج این آزمایش کاربرد ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم سیلیسیوم باعث افزایش معنی‌دار غلظت پتاسیم دانه به‌ترتیب ۱۱/۶ و ۱۴/۶ درصد نسبت به شاهد شد. نتایج شکل ۷ وجود رابطه مثبت بین مقادیر سیلیسیوم و غلظت پتاسیم در دانه را نشان می‌دهد. وفور مقادیر زیادی از پتاسیم در گیاه در شرایط تنش، نشانه تحمل گیاه به تنش می‌باشد. بنابراین کاربرد سیلیسیوم باعث افزایش پتاسیم دانه شده و می‌توان بیان نمود که تحمل گیاه به تنش افزایش یافته است.

در شرایط بدون تنش خشکی، مقادیر ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم سیلیسیوم در هکتار باعث افزایش نیتروژن به‌ترتیب ۲۴/۲ و ۲۴/۶ درصد نسبت به شاهد شد، اما مقدار ۱۰ کیلوگرم سیلیسیوم اثر معنی‌داری بر درصد آن نداشت. از طرفی نتایج برش‌دهی اثرات متقابل نشان داد که سیلیسیوم در تنش خشکی ملایم و شدید هیچ‌گونه اثر معنی‌داری بر درصد نیتروژن دانه ندارد (جدول ۴). به‌علاوه تنش ملایم و شدید بدون کاربرد سیلیسیوم باعث افزایش نیتروژن دانه به‌ترتیب ۲۱/۶ و ۳۱ درصد نسبت به شاهد گردید. نتایج نشان داد که سیلیسیوم تنها در شرایط بدون تنش تأثیر داشته و باعث افزایش بسیار زیاد نیتروژن دانه شده است، اما در شرایط تنش ملایم و شدید بی‌تأثیر بود (جدول ۵). احتمالاً عدم افزایش نیتروژن در حضور سیلیسیوم در شرایط تنش می‌تواند این دلیل باشد که با خشک شدن خاک، هم متصاعد شدن آمونیاک و هدر روی آن زیاد می‌شود و هم به‌علت افزایش pH محلول خاک میزان جذب آن

منابع مورد استفاده

1. Ahmad, M., F. Hassen., U. Qadeer and A. Aslam. 2011. Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum. *African Journal of Agricultural Research* 6(3): 594-607.
2. Alizadeh, A. 2008. Soil and Plant Water Relations. Compilation. Publication of Imam Reza. PP: 132-146. (In Farsi).
3. Ashraf, M. 2009. Biotechnological approach of improving plant salt tolerance using antioxidants as markers. *Biotechnology Advances* 27: 84-93.

4. Chen, W., X. Yao., K. Cai and J. Chen. 2010. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biological Trace Element Research* 142:67-76.
5. Elliot, C. L. and G. H. Snyder. 1991. Autoclave-induced digestion for the calorimetric determination of silicon in rice straw. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 39: 1118-1119.
6. Emam, Y., A. Ranjbari and M. J. Bahrani. 2007. Evaluation of grain yield and its components in wheat genotypes under drought stress after anthesis. *Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 1: 317-328. (In Farsi).
7. Epstein, E. 1999. Silicon. *Annu. Rev. Plant Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 50: 641-664.
8. Gong, H. J., K. M. Chen., G. Chen., S. Wang and C. L. Zhang. 2005. Effects of silicon on growth of wheat under drought. In: Proceeding of 13th International Soil Conservation Organisation Conference – Brisbane July. PP: 10-11.
9. Kaya, C., L. Tuna and D. Higgs. 2006. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water - stress condition. *Journal of Plant Nutrition* 29: 1469- 1480.
10. 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 Sheng Tai Xue Bao* 18: 531-536.
11. Liang, Y., Q. Chen., Q. Liu., W. Zhang and R. Ding. 2003. Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt stressed barely (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Plant Physiology* 160: 1157-1164.
12. Liang, Y., W. Sun., Y. G. Zhu and P. Christie. 2007. Mechanisms of Silicon-mediated alleviation of abiotic stress in higher plants, A Review. *Environmental Pollution* 147: 422-428.
13. Lutts, S., J. M. Kinet and J. Bouharmont. 1996. NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Annals of Botany* 78: 389-398.
14. Ma, J. F. and E. Takahashi. 2002. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. *Elsevier Science B.V.* First edition.
15. Ma, J. F. and N. Yamaji. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant science* 11(8): 1-6.
16. Mohammadi, A. A., A. Majid., M. R. Bihamta and H. Heydari Sharifabadi. 2006. Evaluation of drought stress on the morphological characteristics of cultivated wheat varieties. *Journal of Research and Development*. 73: 184-192. (In Farsi).
17. Neyakani, M. and M. Ghorbakli. 2007. The effect of drought stress on growth parameters, photosynthetic factors, content of protein, Na and K in shoot and root in two soybean cultivars. *Herbs*. 8(1): 17-31. (In Farsi).
18. Ritchie, S. W., H. T. Nguyen and A. S. Haloday. 1990. Leaf water content and gas exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Science* 30:105-111.
19. Tale Ahmadi, S. and R. Haddad. 2011. Study of silicon effects on antioxidant enzyme activities and osmotic adjustment of wheat under drought stress. *Journal of Genetic and Plant Breeding* 47(1): 17-27.
20. Tuna, A. L., C. Kaya., D. Higgs., B. Murillo-Amador., S. Aydemir and A. R. Girgin. 2008. Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. *Environmental and Experimental Botany* 62: 10-16.
21. Zhu, Z., G. Wei., J. Li., Q. Qian and J. Yu. 2004. Silicon alleviates salt stress and increase antioxidant enzymes activity in leaves of salt- stressed cucumber. *Journal of Plant Science* 167: 527-533.