نشریه بوم شناسی کشاورزی
جلد ۵، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۲، ص. ۴۴۲-۴۳۳

Agroecology
Vol. 5, No. 4, Winter 2014, p. 430-442

تأثیر کاربرد سیلیسیوم بر صفات فیزیولوژیکی و رشد گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت شرایط تنش خشکی آخر فصل

عزیز کرملاچعب[1*]، محمد حسین قرینه[2]، عبدالمهدی بخشنده[3]، محمدرضا مرادی تلاوت[4] و قدرت اله فتحی[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰٤/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۸/۰۸

چکیده

به‌منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف سیلیسیوم بر برخی صفات فیزیولوژیکی و رشد گندم نان (*Triticum aestivum* L.) در شرایط تنش خشکی آخر فصل، آزمایشی گلدانی در سال ۱۳۹۱ به صورت فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. در این آزمایش تیمارها شامل سطوح تنش خشکی آخر فصل (آبیاری پس از تخلیه ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد رطوبت قابل استفاده خاک) و سطوح سیلیسیوم (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم سیلیس خالص در کیلوگرم خاک) می‌باشد. نتایج نشان داد که اثر خشکی بر تمام صفات مورد بررسی معنی‌دار بود، به طوری که در اثر تنش میزان نشت الکترولیتی، مقدار پرولین، موم کوتیکول و غلظت سیلیسیوم برگ افزایش و فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، پتاسیم دانه و نسبت اندام هوایی به ریشه کاهش یافتند. تنش خشکی شدید بیشترین تأثیر را بر میزان نشت (افزایش ۵۳ درصد) داشت. کاربرد سیلیسیوم نیز به‌جز نسبت اندام هوایی به ریشه تمام صفات مورد بررسی را تحت تأثیر خود قرار داد، به‌نحوی‌که کاربرد ۳۰ میلی‌گرم سیلیسیوم سبب کاهش ۲۲/۵ درصدی میزان نشت و افزایش پرولین، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، موم موتیکول، غلظت پتاسیم دانه و سیلیسیوم برگ به‌ترتیب ۲۵، ۱۲/۸، ۲۱، ۱۷ و ۳۰ درصد نسبت به شاهد گردید. به‌طورکلی، نتایج نشان داد که تأثیر مثبت سیلیسیوم بر گندم در شرایطی که گیاه تحت تنش قرار داشت بسیار بیشتر از شرایط بدون تنش است.

واژه‌های کلیدی: سوپراکسید دیسموتاز، غلظت پتاسیم دانه، کاربرد سیلیسیوم، نشت الکترولیتی

مقدمه

تنش خشکی مهم‌ترین عامل محدودکنندهٔ رشد و تولید محصولات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک جهان است (Ashraf, 2009). در اثر خشکی، گیاهان علاوه بر واکنش‌های فیزیولوژیکی، تغییرات مرفولوژیکی نیز از خود نشان می‌دهند. طی آزمایشی اعلام شده که به دلیل این‌که عناصر غذایی به صورت محلول در آب جذب گیاه می‌شود. بنابراین، محدودیت در منابع آبی سبب محدودیت در کلیه منابع غذایی می‌شود و گیاه گندم مجبور به کم کردن رشد رویشی و اتمام زود هنگام آن مرحله و شروع مرحله زایشی می‌گردد در نتیجه برخی صفات فیزیولوژیکی کاهش و در نهایت دوره رشد و عملکرد کاهش می‌یابد (Mohammadi et al., 2006).

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی است که منجر به تولید فراورده‌های زیان آور شده که سبب افزایش تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود. این ترکیبات به‌طور بالقوه دارای پتانسیلی است که با بسیاری از ترکیبات سلولی واکنش داده و سبب خسارت به غشاء و سایر ماکرومولکول‌های ضروری از قبیل رنگدانه‌های فتوسنتزی، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و لیپیدها می‌شود. گیاهان با دارا بودن سیستم آنتی‌اکسیدانت که شامل ترکیبات‌های آنزیمی سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، پراکسیداز، گلوتاتیون پراکسیداز، آسکوربیت پراکسیداز و گلوتاتیون ردوکتاز و غیر آنزیمی معمولاً سطوح گونه‌های فعال اکسیژن را در سلول در حد متعادل نگه می‌دارند (Tale Ahmad & Haddad, 2011).

به نظر می‌رسد که در شرایط کمبود آب استفاده و تنظیم غلظت برخی از عناصر می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی برای جلوگیری از اثرات مخرب تنش خشکی مؤثر باشد و زمینه سازگاری گیاه را فراهم آورد. سیلیسیوم دومین عنصر از لحاظ فراوانی در سطح کره زمین است که مقدار آن بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۶ میلی‌مول بر مترمکعب می‌باشد،

۱، ۲، ۳ و ۴- به‌ترتیب دانشجوی دکتری زراعت، دانشیار، استاد و استادیار گروه زراعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رامین، خوزستان
(*- نویسنده مسئول: Email: zizchaab@gmail.com)

ولی به عنوان عنصر اساسی برای گیاهان محسوب نگردیده و نقش آن در بیولوژی گیاهان به‌طور کامل درک نشده است. سیلیسیوم به فرم‌های مختلف از جمله اسید مونوسیلیسیک [$Si(OH)_4$] وجود دارد و جذب آن مستقیماً از این فرم می‌باشد. در اندام هوایی با از دست دادن آب (تعرق)، اسید مونوسیلیسیک غلیظ شده، و به فرم ژل سیلیس ($SiO_2.nH_2O$) تبدیل و باعث تحمل گیاه به تنش می‌شود. گیاهانی مانند خانواده غلات و سیپراسه می‌توانند مقادیر زیادی از سیلیسیوم را در خود انباشته کنند، و کاربرد سیلیسیوم در این گیاهان متضمن رشد بهتر آن‌ها می‌باشد (Epstien, 1999).

در آزمایشی گزارش شده که کاربرد سیلیسیوم در شرایط تنش خشکی باعث افزایش در فعالیت آنزیم‌های ضداکسنده (سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و گلوتاتیون ردوکتاز) می‌شود. همچنین کاهش مقدار پراکسید هیدروژن در شرایط تنش خشکی بر اثر اعمال سیلیسیوم احتمالاً به دلیل اثر مثبت سیلیسیوم بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و زدودن رادیکال‌های آزاد می‌باشد (Gong et al., 2005). ما و یاماجی (Ma & Yamaji, 2006) 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 می‌شود. سودمندی سیلیسیوم در مقاومت به تنش خشکی در غلات مربوط به فعالیت بیشتر H^+-ATPase موجود در غشاء و H^+-PPase در تونوپلاست و جذب بیشتر یون پتاسیم، افزایش غلظت داخل سلول و جذب و نگهداری آب و تأثیر بر روی فعالیت برخی آنزیم‌ها و فرآیندهای فیزیولوژیکی می‌باشد (Liang et al., 2007).

طالع احمد و حداد (Tale Ahmad & Haddad, 2011) در آزمایشی بر روی دو ژنوتیپ گندم نان (*Triticum aestivum* L.) در شرایط تنش خشکی گزارش دادند که کاربرد سیلیسیوم در این شرایط باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در میزان پرولین و پروتئین‌های محلول و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتی مانند کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز شده است. بهتاش و همکاران (Behtash et al., 2010) در آزمایش خود روی چغندر قند (*Beta vulgaris* L. cv. DarK Red) با کاربرد سیلیسیوم و کادمیوم در کشت هیدروپونیک اعلام نمودند که افزایش کاربرد سیلیسیوم باعث افزایش معنی‌دار غلظت آن در برگ و ریشه گیاه شده است. همچنین سیلیسیوم در شرایط تنش خشکی در برنج باعث افزایش معنی‌دار غلظت یون پتاسیم در اندام هوایی و ریشه نسبت به تیمار شاهد و تیمار تنها کاربرد سیلیسیوم شده است. که این افزایش ممکن است به دلیل افزایش فعالیت H^+-ATP_{ase} در ریشه گیاه باشد (Chen et al., 2010). آزمایشی که کایا و همکاران (Kaya et al., 2006) روی گیاه ذرت (*Zea mays* L.) انجام دادند، نشان داد که در شرایط تنش خشکی، وزن‌تر و خشک گیاه کاهش می‌یابد و کاربرد سیلیسیوم در این شرایط منجر به افزایش این پارامترها شده، رشد گیاه را بهبود و مقدار عملکرد را افزایش می‌دهد.

به‌طورکلی، استان خوزستان یکی از مهم‌ترین مناطق از لحاظ تولید گندم کشور محسوب می‌شود 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 مختلف سیلیسیوم بر برخی فیزیولوژیکی و رشد گندم در شرایط تنش خشکی آخر فصل طراحی و اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در گلدان‌هایی در محیط آزاد در دانشگاه کشاورزی و منابع رامین خوزستان در سال ۱۳۹۱ اجرا گردید. گلدان‌ها از جنس پلاستیک (PVC)[1]، به قطر ۳۰ (مساحت ۷۰۶ سانتی‌متر مربع) و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر می‌باشد و حدود ۲۰ کیلوگرم خاک خشک در آن قرار داده شد. برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده این آزمایش در جدول ۱ آمده است.

آزمایش به صورت فاکتوریل و 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، به ترتیب آبیاری پس از تخلیه ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد رطوبت قابل استفاده خاک می‌باشد. 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 گلدان هر روز وزن و درصد رطوبت وزنی خاک مشخص شد. در صورت تخلیه رطوبت خاک به حد مورد نظر، حجم آب مورد نیاز برای هر بار آبیاری در هر گلدان با استفاده از معادله (۱) محاسبه و آبیاری شد (Alizadeh, 2008).

$$V = [(FC - \theta_m) \times P_b \times D_{root} \times A] / E_i \quad \text{معادله (۱)}$$

V: حجم آب آبیاری (m^3)، E_i: راندمان آبیاری در گلدان، θ_m: درصد رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری، P_b: وزن مخصوص ظاهری خاک ($g.cm^{-3}$)، A: سطح گلدان (m^2) و D_{root}: عمق گلدان (m) است.

مقادیر مختلف سیلیسیوم شامل صفر، ۰/۷۵، ۱/۵ و ۲/۲۵ گرم سیلیسیوم در گلدان (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم سیلیس در کیلوگرم خاک) به‌عنوان 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

1- Polyvinyl chloride

آن ۱۴۰ میلی‌گرم نیتروژن خالص در کیلوگرم خاک (به صورت پایه و دو مرحله سرک) در اختیار گیاه قرار گرفت.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

Table 1- Some of soil chemical and physical characteristics

بافت خاک Soil texture	ماده آلی (٪) Organic matter (%)	سیلیسیوم کل* (پی‌پی‌ام) Total silicon (ppm)	عناصر قابل جذب (پی‌پی‌ام) Available nutrients (ppm)				هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) EC ($dS.m^{-1}$)	اسیدیته pH
			سیلیسیوم Si	نیتروژن N	فسفر P	پتاسیم K		
لومی رسی Clay loam	0.76	72.4	22.3	5.4	7.2	214	3.6	7.4

* سیلیسیوم اندازه‌گیری شده به‌وسیله بافر استات سدیم و pH= 4

* Silicon measured by sodium acetate buffer and pH= 4

کود فسفره مورد نیاز به میزان ۱۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک از منبع فسفات آمونیوم و پتاسیم نیز با در نظر گرفتن مقدار پتاسیم مصرف شده همراه با سیلیسیوم و از منبع سولفات پتاسیم در زمان کاشت مصرف شد. گلدان‌ها از جنس پلاستیک و قطر و ارتفاع آن‌ها به ترتیب ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر بود.

پس از آماده‌سازی خاک و قرار دادن آن در گلدان‌ها، بذر گندم رقم چمران با تراکم ۲۰ بذر در گلدان و عمق ۵-۳ سانتی‌متری خاک به صورت دستی در دهه اول آذر ماه در محیط آزاد کشت و آبیاری صورت گرفت.

اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی

میزان نشت الکترولیتی (EL) به روش لوتس و همکاران (Lutts et al., 1996) 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 میلی‌لیتر آب مقطر انتقال یافتند. 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 به مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفتند و EC_2 اندازه‌گیری و درصد EL نمونه‌ها با استفاده از رابطه EC_1 / EC_2 تعیین شد.

مقدار پرولین به روش ارائه شده توسط بیتس و همکاران (Bates et al., 1973) تعیین شد. ابتدا ۰/۵ گرم از برگ پرچم تازه در زمان وقوع تنش را با هاون له کرده و درون فالکون ریخته شد، سپس ۱۰ میلی‌لیتر سولفوسالیسلیک اسید سه درصد به آن اضافه و نمونه درون یخ قرار داده شد. فالکون را در ۷۵۰۰ دور به مدت ۳۰ دقیقه و دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفوژ کرده تا مواد اضافی از محلول جدا گردد. دو میلی‌لیتر از عصاره صاف شده را درون فالکون جدید ریخته و دو میلی‌لیتر اسید نین هیدرین و دو میلی‌لیتر اسید استیک گلایسیال به آن اضافه شد. نمونه‌ها را به مدت یک ساعت در حمام آب گرم حرارت داده سپس درون یخ قرار گرفتند. چهار میلی‌لیتر تولوئن به محلول‌ها اضافه و به مدت ۲۰ ثانیه ورتکس شدند و نمونه‌ها را در طول موج ۵۲۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شدند.

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز از طریق عصاره‌گیری از برگ پرچم و به وسیله نیتروبلو تترازولیوم و رنگ‌آمیزی اختصاصی به روش گاینوپولیتیس و رایس (Giannopolitis & Ries., 1977) از طریق قرائت در طول موج ۵۶۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر انجام شد. سه نمونه یک سانتی‌متر مربعی از برگ تیمارهای مختلف جدا کرده و پس از شستشو با آب مقطر و حذف گرد و غبار موجود روی سطح برگ، این نمونه‌ها را یکی بعد از دیگری در یک ظرف حاوی ۱۰ میلی‌لیتر محلول تتراکلرید کربن، هر کدام به مدت ۳۰ ثانیه شستشو و خارج کردیم. سپس عصاره حاصل که حاوی موم می‌باشد را روی حرارت کم‌تر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده تا تبخیر صورت بگیرد. باقی‌مانده را با ترازوی سه رقم اعشار وزن و تقسیم بر سه شد و مقدار موم برای هر سانتی‌متر مربع بر حسب میلی‌گرم گزارش شد (Ahmad et al., 2011). جهت محاسبه میزان سیلیسیوم از روش رنگ سنجی آمینومولیبدات آبی استفاده شد. به این صورت که از طریق تهیه عصاره از بافت خشک نمونه مورد نظر طبق روش الیوت و سنیدر (Elliot & Snyder, 1991) با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۵۰ نانومتر قرائت گردید. همچنین میزان پتاسیم نمونه‌های مورد نظر به وسیله دستگاه فلیم‌فتومتر اندازه‌گیری شد. همچنین در زمان رسیدگی فیزیولوژی تیمارهای مختلف، ریشه به دقت از خاک جدا شده و نسبت وزن خشک اندام هوایی به ریشه اندازه‌گیری شده است.

کلیه محاسبات آماری با استفاده از نرم افزار SAS 9.1 انجام گرفت (Amirabadi et al. 2012) و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار LSD در سطح احتمال پنج درصد

استفاده گردید. در نهایت، جهت رسم شکل‌ها از نرم افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که اثرات ساده تنش خشکی و کاربرد سیلیسیوم بر میزان نشت الکترولیتی معنی‌دار (p≤۰/۰۱) است، اما اثر متقابل آن‌ها غیر معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که اعمال تنش خشکی باعث افزایش میزان نشت الکترولیتی شده است؛ به‌طوری‌که میزان نشت در شرایط بدون تنش ۲۳/۵ درصد بوده و تنش خشکی ملایم و شدید باعث افزایش آن به ترتیب ۴۱ و ۵۹ درصد نسبت به تیمار بدون تنش خشکی گردید (جدول ۳). به نظر می‌رسد که تنش خشکی از طریق آسیب رساندن به غشاء سلولی و تخریب ساختار آن باعث نشت بیشتر مواد داخل سلولی و واکوئلی به محیط بیرون در زمان اندازه‌گیری شده و منجر به غلیظ شدن و بالا رفتن هدایت الکتریکی بیرون سلول شده است. کاربرد سیلیسیوم باعث کاهش میزان نشت شده، به‌طوری‌که مقادیر ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم سیلیسیوم در کیلوگرم خاک باعث کاهش معنی‌دار میزان نشت به ترتیب ۲۱/۴ و ۲۹ درصد نسبت به تیمار شاهد شده، ولی بین این دو مقدار تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۱). زهو و همکاران (Zhu et al., 2004) دلیل این امر را رسوب سیلیسیوم در غشاء سلولی و سیلیسی و سخت شدن، و افزایش معنی‌دار پایداری آن می‌داند.

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی گندم تحت تیمارهای آزمایشی

Table 2- Variance analysis of measured traits of wheat under examine treatments

منابع تغییرات Source of variations	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares						
		نشت الکترولیتی Electrolyte leakage	مقدار پرولین Proline content	سوپراکسید دیسموتاز SOD	موم کوتیکول Cuticular wax	پتاسیم دانه Grain potassium	سیلیسیوم برگ Leaf silicon	ریشه/اندام هوایی Root/shoot
بلوک Block	2	24.71 ns	0.10 ns	0.128 ns	0.75 ns	8.19 na	17.61 ns	0.015 ns
آبیاری Irrigation	2	2286.01 **	180.06 **	2.432 *	20.71 **	376.23 *	879.51 **	7.40 **
سیلیسیوم Silicon	3	175.45 **	8.48 **	0.856 **	7.47 **	216.58 **	326.89 **	0.148 ns
Irrigation×silicon	6	23.84 ns	2.32 *	0.479 *	0.09 ns	11.34 ns	46.84 **	0.255 *
خطای آزمایشی Experimental error	22	13.07	0.83	0.174	0.26	38.54	14.64	0.075
ضریب تغییرات (%) CV (%)		9.54	12.40	8.47	7.74	10.41	9.51	11.17

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

ns, * and **: not significant and significant at 5% and 1% probability levels respectively.

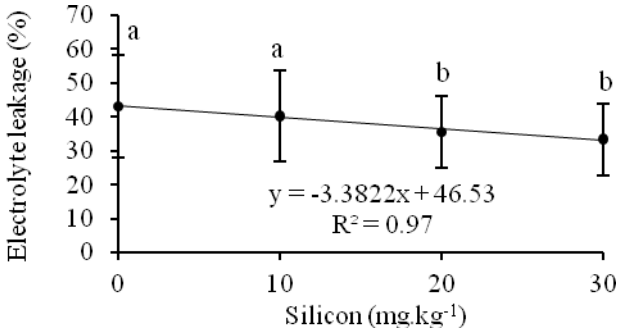
جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین اثرات سطوح تنش خشکی بر برخی صفات فیزیولوژیکی مورد بررسی گندم

Table 3- Means comparison of effects of drought on some physiological characteristics of wheat

سطوح تنش خشکی Drought stress levels	نشت الکترولیتی (٪) Electrolyte leakage (%)	مقدار موم کوتیکول (میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع) Cuticular wax ($mg.cm^{-2}$)	پتاسیم دانه (میلی‌گرم بر گرم وزن خشک) Grain K ($mg.g^{-1}$ DW)
بدون تنش Without stress	23.5 c *	5.25 c	65.37 a
تنش ملایم Mild stress	39.8 b	6.97 b	59.27 ab
تنش شدید Severe stress	57.0 a	7.84 a	54.19 b

* میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار براساس آزمون LSD است (p≤۰/۰۵).

* Within each column, means followed by the letters are not significantly different based on LSD test (p≤0.05).



شکل ۱- اثر سیلیسیوم بر میزان نشت الکترولیتی برگ گندم

Fig. 1- Effect of silicon on leaf electrolyte leakage of wheat

لیانگ و همکاران (Liang et al., 2007) به این نتیجه رسیدند که سیلیسیوم در درون گیاه یک عنصر غیرمتحرک است و پس از رسوب در داخل سلول به صورت ژل سیلیکا پلیمر شده در می‌آید و دیگر برای گیاه غیر قابل استفاده می‌شود و تنها نقش استحکام و پایداری را خواهد داشت.

در میان مکانیسم‌های سلولی متفاوتی که در طی مواجه شدن با تنش وجود دارند، تجمع اسید آمینه‌های سازگارکننده همانند پرولین اهمیت خاصی دارد. این اسید آمینه با اسیدیته خنثی و حلالیت بالا در آب، در طی بروز تنش می‌تواند تا ۸۰ درصد اسیدآمینه‌های سلول را تشکیل دهد (Valadiani et al., 2003). اثر تیمارهای آزمایشی بر مقدار پرولین برگ پرچم معنی‌دار ($p\leq$۰/۰۵) بود (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل در جدول ۴، در شرایط بدون تنش خشکی، کاربرد سیلیسیوم اثر معنی‌دار بر مقدار پرولین نداشته و با افزایش شدت تنش، اثر سیلیسیوم نیز افزایش یافته است. کاربرد ۳۰ میلی‌گرم سیلیسیوم در کیلوگرم خاک در شرایط تنش ملایم و شدید باعث افزایش مقدار پرولین به‌ترتیب ۳۵ و ۲۴ درصد شده است. همچنین تفاوت معنی‌داری بین کاربرد مقادیر ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم سیلیسیوم در شرایط مختلف رطوبتی مشاهده نشد. به‌نظر می‌رسد که گیاه وقتی در شرایط تنش قرار می‌گیرد، مقدار پرولین در سلول آن افزایش می‌یابد تا با افزایش غلظت داخل سلول، جذب و نگهداری آب داخل سلول را حفظ کند. اثر افزایش تولید پرولین بر روی مقاومت به تنش خشکی هنوز قابل بحث است و علاوه بر افزایش سنتز پرولین کاهش کاتابولیسم پرولین می‌تواند به تجمع آن در پتانسیل آب پایین مربوط باشد (Mansourifar et el., 2005).

جدول ٤- نتایج مقایسه میانگین اثرات تیمارهای آزمایشی بر برخی صفات مورد بررسی گندم

Table 4- Means comparison of Interactions effects of treatments on some measured traits of wheat

تیمارهای آزمایشی Treatments		پرولین (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) Proline ($mg.g^{-1}$ FW)	سوپراکسید دیسموتاز (میلی‌گرم بر پروتین) SOD ($mg.Pro^{-1}$)	سیلیسیوم برگ (میلی‌گرم بر گرم وزن خشک) Leaf Si ($mg.g^{-1}$ DW)	ریشه/ اندام هوایی Root/shoot
تنش خشکی Drought stress	سیلیسیوم (میل‌گرم بر کیلوگرم) Silicon ($mg.kg^{-1}$)				
بدون تنش Without stress	0	3.40 f *	5.3 a	28.3 g	3.4 a
	10	3.27 f	5.4 a	31.5 fg	3.3 ab
	20	3.60 f	5.1 a	31.8 fg	3.2 abc
	30	3.47 f	5.2 a	33.0 fg	2.9 bcd
تنش ملایم Mild stress	0	6.20 e	4.7 ab	32.5 fg	2.2 ef
	10	6.57 de	5.0 a	40.0 de	2.5 de
	20	7.97 cd	5.3 a	44.0 cd	2.6 d
	30	9.50 bc	5.4 a	48.8 bc	2.8 cd
تنش شدید Severe stress	0	9.27 c	3.6 c	37.5 ef	1.2 h
	10	10.83 ab	4.1 bc	43.4 cde	1.5 gh
	20	12.37 a	5.0 a	53.6 ab	1.9 fg
	30	12.23 a	5.0 a	58.1 a	1.9 fg

* میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

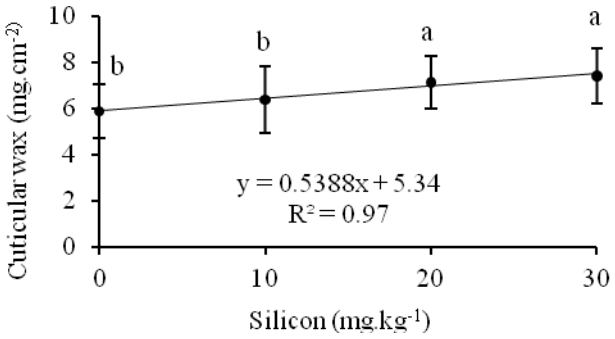
* Within each column, means followed by the letters are not significantly different ($p\leq0.05$).

طالع احمد و حداد (Tale Ahmad & Haddad, 2011) به این نتیجه رسیدند که احتمالاً افزایش فعالیت آنزیم‌های ضداکسنده مانند کاتالاز و سوپر اکسید دیسموتاز باعث کاهش گونه‌های فعال اکسیژن شده همچنین مقدار پراکسید هیدروژن به شدت کاهش می‌یابد و به همین دلیل یکی از عوامل کاتابولیسم پرولین از بین رفته و مقدار پرولین در حضور سیلیسیوم افزایش می‌یابد.

سوپر اکسید دیسموتاز آنزیمی فلزی است که عدم تناسب رادیکال‌های آزاد سوپراکسید را به پراکسید هیدروژن و اکسیژن کاتالیز می‌کند و به‌نظر می‌رسد که نقش مهمی را در حفاظت از سلول‌ها در مقابل اثرات زیان‌بخش غیر مستقیم ناشی از این رادیکال‌ها بر عهده دارد (Liang et al., 2007). در این آزمایش نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارها در جدول ۴ نشان می‌دهد که در شرایط بدون تنش و تنش ملایم کاربرد سیلیسیوم اثر معنی‌داری بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز نداشت، امّا در شرایط تنش شدید کاربرد ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم سیلیسیوم باعث افزایش فعالیت این آنزیم تا حد تیمار شاهد شده است. کم‌ترین فعالیت آن در تیمار تنش شدید بدون کاربرد سیلیسیوم به اندازه ۳/۶۱ واحد در میلی‌گرم پروتئین و با تیمار تنش شدید و کاربرد ۱۰ میلی‌گرم سیلیسیوم در یک گروه آماری قرار گرفته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در شرایط بدون تنش، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در حضور و عدم حضور سیلیسیوم به یک اندازه بوده است و در شرایط تنش ملایم، کاربرد سیلیسیوم باعث افزایش فعالیت این آنزیم شد، اما این افزایش معنی‌دار نبوده است. همچنین در شرایط تنش شدید کاربرد سیلیسیوم دارای بیشترین تأثیر بر میزان فعالیت آن بوده است، به طوری که در شرایط تنش شدید کاربرد ۳۰ میلی‌گرم سیلیسیوم باعث افزایش ۲۸ درصدی فعالیت آن نسبت به تیمار بدون سیلیسیوم شده است. طالع احمد و حداد (Tale Ahmad & Haddad, 2011) اعلام کردند که آنزیم سوپراکسید دیسموتاز اولین خط دفاعی سلول در برابر حمله رادیکال‌های آزاد در شرایط تنش است و کاربرد سیلیسیوم در شرایط تنش خشکی باعث افزایش بسیار زیاد آن می‌شود.

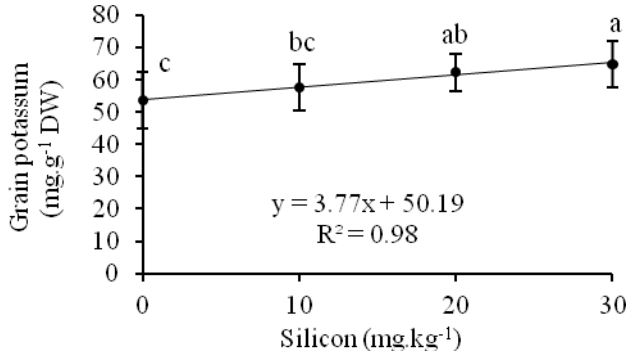
اثر تنش خشکی بر مقدار موم کوتیکول معنی‌دار ($p\leq$۰/۰۱) بود (جدول ۲) و تنش ملایم و شدید باعث افزایش به ترتیب ۲۴ و ۳۳ درصد مقدار موم کوتیکول نسبت به شاهد گردید (جدول ۳). با توجه به اینکه تبخیر و تعرق گیاهی هم از طریق روزنه‌های برگ و هم از طریق کوتیکول صورت می‌گیرد، می‌توان چنین بیان نمود که گیاه در شرایط تنش جهت جلوگیری از خروج آب از طریق برگ، با وجود آسیب به غشاء سلولی، اقدام به کاهش تبخیر و تعرق از طریق کوتیکول به‌واسطه افزایش موم کوتیکول می‌نماید. معمولاً تلفات از کوتیکول نسبتاً کم است، ولی در شرایط تنش خشکی همین مقدار اندک می‌تواند نقش مؤثری به خصوص در مراحل بحرانی رشد گیاه داشته باشد. کاربرد ۱۰ میلی‌گرم سیلیسیوم تأثیر معنی‌داری بر موم کوتیکول نداشت، لیکن مقادیر ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم باعث افزایش معنی‌دار مقدار موم به ترتیب ۱۷ و ۲۱ درصد نسبت به تیمار شاهد گردید. نتایج نشان‌دهنده وجود یک همبستگی مثبت بین مقدار کاربرد سیلیسیوم و موم کوتیکول می‌باشد (شکل ۱). در این زمینه احمد و همکاران (Ahmad et al., 2011) دریافتند که سیلیسیوم با رسوب در زیر کوتیکول برگ‌ها 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 می‌آورد.

نتایج مقایسه میانگین داده‌های این آزمایش نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش غلظت پتاسیم در دانه گردید، به‌طوری‌که تنش شدید باعث کاهش معنی‌دار آن (۱۷ درصد)، اما تنش ملایم اثر معنی‌دار بر آن نسبت به شاهد نداشته است (جدول ۳). لیانگ و همکاران (Liang et al., 2007) بیان نمودند که جذب و انتقال پتاسیم نیازمند ATP می‌باشد، با توجه با این‌که در شرایط تنش مقدار ATP کاهش می‌یابد، غلظت این عنصر در گیاه نیز تنزل پیدا می‌کند.



شکل ۲- اثر سیلیسیوم بر میزان موم کوتیکول برگ گندم

Fig. 2- Effect of silicon on leaf cuticular wax of wheat



شکل ۳- اثر سیلیسیوم بر غلظت پتاسیم در دانه گندم

Fig. 3- Effect of silicon on grain potassium of wheat

براساس نتایج این آزمایش کاربرد ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم سیلیسیوم در کیلوگرم خاک باعث افزایش معنی‌دار غلظت پتاسیم دانه (به ترتیب برابر با ۱۴ و ۱۷ درصد) نسبت به شاهد شد. نتایج شکل ۳ وجود رابطه مثبت بین مقدار کاربرد سیلیسیوم و غلظت پتاسیم در دانه را نشان می‌دهد.

گزارش شده که کاربرد سیلیسیوم در تنش خشکی، باعث فعالیت بیشتر آنزیم H^+-ATP_{ase} موجود در غشاء پلاسمایی ریشه و H^+-PP_{ase} در تونوپلاست ریشه، و در نتیجه جذب و انتقال بیشتر پتاسیم و افزایش غلظت پتاسیم در گیاه می‌شود (Kaya et al., 2006). به‌علاوه، کاربرد سیلیسیوم در شرایط تنش خشکی باعث افزایش غلظت پتاسیم در اندام هوایی، و پتاسیم باعث می‌شود که روزنه‌ها به طور مطلوب به وظایف خود عمل کنند و فرایند فتوسنتز بدون اختلال انجام بگیرد (Ahmad et al., 2011).

نتایج آزمایشات مختلف حاکی از این بود که در شرایط تنش خشکی گیاه جهت افزایش غلظت محلول داخل سلول مقدار بیشتری سیلیسیوم جذب می‌کند (Tuna et al., 2008). براساس نتایج این آزمایش با افزایش تنش خشکی، اثر سیلیسیوم بر غلظت آن بیشتر و معنی‌دار شد. کاربرد ۳۰ میلی‌گرم سیلیسیوم در هکتار در شرایط تنش ملایم و شدید باعث افزایش غلظت سیلیسیوم در برگ پرچم به ترتیب ۳۳/۴ و ۳۵/۴ درصد نسبت به تیمار بدون سیلیسیوم گردید. همچنین تیمارهای تنش ملایم بدون کاربرد سیلیسیوم تأثیر معنی‌داری بر غلظت سیلیسیوم نداشت، اما تنش شدید باعث افزایش معنی‌دار آن (۲۴/۳ درصد) نسبت به تیمار شاهد گردید. بنابراین، نتایج نشان‌دهنده رابطه مثبت معنی‌داری بین سطوح تنش و سیلیسیوم بر غلظت سیلیسیوم در برگ پرچم می‌باشد، به‌طوری‌که بیشترین غلظت این عنصر در شدیدترین تنش و بیشترین مقدار کاربرد سیلیسیوم و کم‌ترین مقدار آن از پایین‌ترین سطوح دو تیمار حاصل گردید (جدول ۴). نتایج آزمایشات محققان (Tuna et al., 2008; Chen et al., 2010; Ahmad et al., 2011) روی گیاهان مختلف نشان داد که کاربرد سیلیسیوم باعث افزایش غلظت آن در اندام هوایی گیاه می‌گردد، که با نتایج این پژوهش همسو می‌باشد.

بررسی‌ها نشان داده‌اند که در برخی موارد که بخشی از ریشه در معرض کمبود آب قرار می‌گیرد، توسعه برگ‌ها بدون هیچ تغییری در وضعیت آب برگ، کاهش پیدا می‌کند. مشخص شده است که این اثر غیر هیدرولیکی در رشد برگ توسط یک پیام شیمیایی که از ریشه منشاء می‌گیرد و از طریق آوندهای چوبی به بخش هوایی انتقال پیدا می‌کند، القاء می‌گردد و باعث کاهش اندازه اندام هوایی می‌شود. همچنین گزارش شده است که وقتی ریشه در شرایط تنش خشکی قرار می‌گیرد علائمی منتشر می‌کند که سبب کاهش رشد برگ‌ها شوند که به نظر می‌رسد این واکنش به‌عنوان یک راهبرد سازگاری به خشکی مفید باشد، زیرا یک رشد مهار نشده می‌تواند باعث تخلیه سریع آب خاک شود که این شرایط منجر به خشکی شدید در مرحله رسیدن دانه‌ها خواهد شد (Khazaie & Kafi, 2003).

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارها نشان می‌دهد که بیشترین و کم‌ترین نسبت اندام هوایی به ریشه در تیمارهای به ترتیب شاهد (۳/۴۵) و تنش خشکی بدون کاربرد سیلیسیوم (۱/۲۲) مشاهده شد. در شرایط بدون تنش کاربرد سیلیسیوم باعث کاهش نسبت اندام هوایی به ریشه شده است. کاربرد سیلیسیوم اثر معنی‌داری بر اندام هوایی در شرایط بدون تنش نداشت و به نظر می‌رسد کاهش این نسبت به دلیل افزایش وزن خشک ریشه می‌باشد. در شرایط تنش ملایم بدون کاربرد سیلیسیوم، نسبت اندام هوایی به ریشه به اندازه ۳۶ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت، اما کاربرد سیلیسیوم باعث افزایش معنی‌دار این نسبت گردید، به طوری که مقادیر ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم باعث افزایش به ترتیب ۱۷ و ۲۰ درصد این نسبت شده است. همچنین این مقادیر در تنش شدید باعث افزایش معنی‌دار آن به‌ترتیب ۳۵/۵ و ۳۷ درصدی نسبت به تیمار تنش شدید بدون سیلیسیوم گردید. نتایج نشان‌دهنده وجود روابط مثبت بین مقادیر سیلیسیوم و نسبت اندام هوایی به ریشه در شرایط تنش ملایم و شدید

می‌باشد (جدول ۴).

به‌طورکلی، نتایج نشان داد که در شرایط تنش، تغییرات نسبت اندام هوایی به ریشه زیاد می‌باشد و این تغییرات ناشی از تغییر در اندام هوایی می‌باشد و این بیان می‌کند که سیلیسیوم از طریق جذب و رسوب در اندام گیاه، بر روی اعمال حیاتی مانند تبخیر و تعرق، فتوسنتز و رشد اثر گذاشته و در حضور آن افزایش اندام‌های انجام دهنده این فعالیت‌ها افزایش می‌یابد و این نسبت افزایش می‌یابد.

همبستگی صفات

نتایج همبستگی بین صفات در جدول ۵ نشان داد که میزان نشت الکترولیتی با صفات فعالیت سوپراکسید دیسموتاز، پتاسیم دانه و نسبت اندام هوایی به ریشه دارای همبستگی منفی معنی‌داری می‌باشد. با افزایش میزان نشت الکترولیتی از سلول، بسیاری از فعالیت‌های فیزیولوژیکی آن دچار اختلال می‌شود و رشد گیاه به دلیل کاهش پایداری غشاء، کاهش می‌یابد به همین دلیل در این شرایط نسبت اندام هوایی به ریشه دارای رابطه منفی با میزان نشت (**۰/۹۰= r^2) می‌باشد. همچنین نسبت اندام هوایی به ریشه دارای همبستگی مثبت معنی‌دار بالایی با فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و غلظت پتاسیم دانه می‌باشد، اما رابطه آن با سایر صفات منفی می‌باشد. با توجه به نتایج مقایسات میانگین‌ها، صفات پرولین برگ، موم کوتیکول و غلظت سیلیسیوم در برگ پرچم در اثر تنش افزایش و کاربرد سیلیسیوم نیز باعث افزایش معنی‌دار آن‌ها شده است به همین دلیل دارای همبستگی مثبت معنی‌دار بالایی با همدیگر می‌باشند و نشان‌دهنده تغییرات مشابه این صفات تحت تیمارهای آزمایشی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست آمده از این آزمایش، تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار صفات فیزیولوژیکی مانند فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، غلظت پتاسیم در دانه و نیز نسبت اندام هوایی به ریشه و افزایش معنی‌دار مقدار پرولین سلول، موم کوتیکول و غلظت سیلیسیوم برگ پرچم نسبت به تیمار بدون تنش گردید. همچنین در شرایط تنش غشاء سلول دچار آسیب شدید شده و نشت مواد از داخل سلول به بیرون به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. به عبارت دیگر، پایداری غشاء کاهش یافته است. کاربرد سیلیسیوم در شرایط تنش از طریق تأثیر بر برخی فعالیت‌های فیزیولوژیکی باعث بهبود رشد و تحمل گیاه به تنش خشکی شده است. نتایج نشان داد که در اثر اعمال تنش خشکی و نیز کاربرد سیلیسیوم، میزان این عنصر در برگ گیاه به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. به‌علاوه این عنصر از طریق رسوب در داخل سلول و افزایش غلظت آن، سبب افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و موم کوتیکول شده است. بنابراین، می‌توان بیان نمود که کاربرد سیلیسیوم: ۱) از طریق جذب و رسوب در غشاء سلولی، سبب سخت و سیلیسی شدن آن می‌شود. این امر باعث می‌شود که در شرایط تنش، غشاء سلول، پایداری خود را حفظ کند و میزان نشت مواد الکترولیتی به‌طور معنی‌داری کاهش یابد.

جدول ۵- نتایج همبستگی بین صفات مورد بررسی گندم

Table 5- Correlation coefficients between measured traits in wheat

صفات فیزیولوژیکی Physiological characteristics	1	2	3	4	5	6	7
۱) نشت الکترولیتی 1) Electrolyte leakage	1						
۲) مقدار پرولین 2) Proline content	0.73 **	1					
۳) سوپراکسیددیسموتاز 3) Superoxide dismutase	-0.68 **	-0.34 *	1				
۴) موم کوتیکول 4) Cuticular wax	0.57 **	0.87 **	-0.26 ns	1			
۵) پتاسیم دانه 5) Grain potassium	-0.72 **	-0.38 *	0.65 **	-0.18 ns	1		
۶) سیلیسیوم برگ 6) Leaf Si concentration	0.42 *	0.83 **	-0.01 ns	0.78 **	-0.11 ns	1	
7) نسبت اندام هوایی به ریشه 7) Shoot/root	-0.90 **	-0.74 **	0.70 **	-0.68 **	0.68 **	-0.48 **	1

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

ns, * and **, not significant and significant at 5% and 1% probability levels respectively.

۲) سبب افزایش مقدار موم کوتیکول می‌گردد و در نتیجه کاهش میزان خروج آب از برگ از طریق تبخیر و تعرق و ادامه رشد گیاه. ۳) باعث افزایش غلظت پتاسیم در گیاه. این کار از طریق تحریک فعالیت برخی آنزیم‌های جذب کننده پتاسیم در ریشه صورت می‌گیرد. در نهایت، به نظر می‌رسد که سیلیسیوم از طریق تأثیر بر برخی فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه سبب افزایش تحمل و رشد گیاه می‌گردد. نکته‌ای قابل ذکر این است که تأثیر مثبت سیلیسیوم بر عملکرد گیاهی در شرایطی که گیاه تحت شرایط تنش قرار داشت بسیار بیشتر و چشمگیرتر از زمانی بود که گیاه تحت شرایط بدون تنش رشد کرده بود. پس می‌توان بیان نمود که در گندم در شرایط تنش خشکی، سیلیسیوم یک عنصر ضروری و حضور مقدار کافی از آن بقای گیاه را تضمین می‌کند. همچنین به دلیل فراوان بودن آن و عدم آلودگی محیط زیست، استفاده از این عنصر در شرایط مشابه تنش‌زا توصیه می‌گردد.

منابع

1. Ahmad, M., Hassen, F., Qadeer U., and Aslam, A. 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, Mashhad, Iran. p. 132-146. (In Persian)
3. Amirabadi, M., Seifi, M., Rejali, F., and Ardakani, M.R. 2012. Study the concentration of macroelements in forage mays (*Zea mays* L.) (SC 704) as effected by inoculation with mycorrhizal fungi and Azotobacter chroococcum under different levels of nitrogen. Journal of Agroecology 4(1): 33-40.
4. Ashraf, M. 2009. Biotechnological approach of improving plant salt tolerance using antioxidants as markers. Biotechnology Advances 27: 84-93.
5. Bates, L.S., Waldern, R.P., and Teare, I.D. 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. Plant and Soil 39: 205-207.
6. Behtash, F., Tabatabayi, S.J., Malekoti, M.J., Seroraldin, M.H., and Ostan, S. 2010. Effect of cadmium and silicon on growth and some physiological characteristics of beet. Journal of Sustainable Agriculture 2(1): 153-167. (In Persian)
7. Chen, W., Yao, X., Cai, K., and Chen, J. 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.
8. Elliot, C.L., and Snyder, G.H. 1991. Autoclave-induced digestion for the calorimetric determination of silicon in rice straw. Journal of Agricultural and Food Chemistry 39: 1118-1119.
9. Epstien, E. 1999. Silicon. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 50: 641-664.
10. Giannopolitis, C.N., and Ries, S.K. 1977. Superoxide dismutase. I. Occurrence in higher plants. Plant Physiology 59: 309-314.
11. Gong, H.J., Chen, K.M., Chen, G., Wang, S., and Zhang, C.L. 2005. Effects of Silicon on Growth of Wheat under Drought. 13th International Soil Conservation Organisation Conference–Brisbane, July, p. 10-11.
12. Kaya, C., Tuna and, L., Higgs, D. 2006. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown.under water - stress condition. Journal of Plant Nutrition 29: 1469-1480.
13. Khazaie, H.R., and Kafi, M. 2003. Effect of drought stress on root growth and dry matter partitioning between roots and shoots of winter wheat. Iranian Journal of Field Crops Research 1(1): 33-42. (In Persian with English Summary)
14. Liang, Y., Chen, Q., Liu, Q., Zhang, W., and Ding, R. 2007. Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt stressed barely (*Hordeum vulgar* L.). Journal of Plant Physiology 160: 1157-1164.
15. Lutts, S., Kinet, J.M., and Bouharmont, J. 1996. NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. Annals Botany 78: 389–398.
16. Ma, J.F., and Yamaji, N. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. Trends in Plant Science 11(8): 22-28.
17. Mansourifar, S., Modarres Sanavy, A.M., and Jalali Javaran, M. 2005. Effect of drought stress and nitrogen deficit on quality and quantity of soluble proteins in maize (*Zea mays* L.) leaf. Iranian Journal of Agricultural Sciences 36(3): 625-326. (In Persian with English Summary)
18. Mohammadi, A.A., Majid, A., Bihamta, M.R., and Heydari sharifabadi, H. 2006. Evaluation of drought stress on the morphological characteristics of cultivated wheat varieties. Journal of Research and Development 73: 184-192. (In Persian)
19. Tale Ahmad, S., and Haddad, R. 2011. Study of silicon effects on antioxidant enzyme activities and osmotic adjustment of wheat under drought stress. Journal of Genetics and Plant Breeding 47(1): 17-27.
20. Tuna, A.L., Kaya, C., Higgs, D., Murillo-Amador, B., Aydemir, S., and Girgin, A.R. 2008. Silicon improves

salinity tolerance in wheat plants. Environmental and Experimental Botany 62: 10–16.
21. Valdiani, A.R., Hassanzadeh, A., and Tajbakhsh, M. 2005. Study on the effects of salt stress in germination and embryo growth stages of the four prolific and new cultivars of winter rapeseed (*Brassica napus* L.). Journal of Research and Development 66: 25-33. (In Persian with English Summary)
22. Zhu, Z., Wei, G., Li, J., Qian, Q., and Yu, J. 2004. Silicon alleviates salt stress and increase antioxidant enzymes activity in leaves of salt- stressed cucumber. Journal of Plant Science 167: 527-533.