تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد چهاردهم، شماره سوم، پائیز ۱۴۰۰
۶۶۵-۶۷۴
http://dx.doi.org/10.22077/escs.2020.2805.1728

مقاله پژوهشی

بررسی اثر سیلیسیم بر جذب فسفر و رشد گیاه گندم تحت تنش رطوبتی در یک خاک آهکی

زهره زندی گوهرریزی[۱]، رضا خراسانی[۲*]، اکرم حلاج‌نیا[۳]
۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲. دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۳. استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۶/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۱۷

چکیده

جهت بررسی اثر سیلیسیم بر جذب فسفر و رشد گیاه گندم در شرایط تنش رطوبتی، آزمایشی گلدانی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار طی ماه‌های آذر و دی سال ۹۴ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. تیمارهای این آزمایش شامل سه سطح سیلیسیم (صفر، ۵۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)، سه سطح فسفر (صفر، ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) و دو سطح تنش رطوبتی (۴۵ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک) بودند. بر اساس نتایج، تنش رطوبتی سبب کاهش معنی‌دار ۵۵/۴ و ۴۱/۵ درصدی وزن تر و خشک اندام هوایی شد؛ همچنین غلظت و جذب فسفر در اندام هوایی را به ترتیب ۱۳/۶ و ۴۹/۸ درصد کاهش داد. با افزایش غلظت سیلیسیم وزن تر و خشک گیاه در هر دو شرایط با و بدون تنش رطوبتی تغییر معنی‌داری نداشت. افزایش سیلیسیم باعث کاهش جذب و غلظت فسفر در شرایط بدون تنش شد، ولی در شرایط تنش رطوبتی اختلاف معنی‌داری در غلظت و جذب فسفر مشاهده نشد. از سوی دیگر در سطح صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم سیلیسیم در خاک، غلظت سیلیسیم در خاک پس از کشت گیاه در هر دو شرایط با و بدون تنش رطوبتی افزایش یافت. به نظر می‌رسد به سبب تأمین سیلیسیم موردنیاز گندم توسط خاک، کوددهی سیلیسیم اثری بر رشد گیاه نداشت.

واژه‌های کلیدی: **برهمکنش عناصر، تغذیه گیاه، تنش خشکی، عنصر غذایی مفید**

مقدمه

سیلیسیم فراوان‌ترین عنصر در خاک پس از اکسیژن، اثرات مثبتی بر رشد و نمو گیاه دارد و می‌تواند سبب افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی و بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه شود (Debona et al., 2017).

اسدی و همکاران (Asadi et al., 2014) با کاربرد سیلیسیم در سه سطح صفر، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم از منبع سیلیکات‌سدیم در یک خاک آهکی گزارش کردند مصرف سیلیسیم سبب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه و وزن هزار دانه گندم شد، ولی کمالی مقدم و همکاران (Kamali moghadam et al., 2015) با کاربرد مقادیر صفر، ۳۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیسیم به شکل سیلیکات‌سدیم در یک خاک آهکی مشاهده کردند سطوح مختلف کود سیلیکات‌سدیم اثر معنی‌داری بر عملکرد دانه و وزن هزار دانه نداشت و تنها تیمار ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات‌سدیم سبب افزایش عملکرد کاه گندم شد.

رودریگز و همکاران (Rodrigues et al., 2015) بیان کردند حد بحرانی غلظت سیلیسیم در خاک با توجه به نوع خاک، گیاه و عصاره‌گیر متفاوت بوده به‌طوری‌که حد بحرانی غلظت سیلیسیم در خاک آهکی با عصاره‌گیر استات‌سدیم برای گندم ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و برای برنج در خاک اسیدی با عصاره‌گیرهای مختلف از ۱۴ تا ۲۰۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم سیلیسیم متغیر است.

* نگارنده پاسخگو: رضا خراسانی. پست الکترونیک: khorasani@um.ac.ir

سیلیسیم به‌عنوان یک عنصر غذایی مفید همچنین می‌تواند اثرهای زیان‌بار تنش‌های زیستی (بیماری بلاست برنج) و غیرزیستی مانند شوری و خشکی را در گیاهان تک‌لپه‌ای و دولپه‌ای کاهش دهد (Debona et al., 2017). با مصرف ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیس بیشترین عملکرد دانه و پایین‌ترین درصد آلودگی به بلاست برگ در برنج رقم طارم مشاهده گردید (lemrasky et al., 2010). علی و همکاران (Ali et al., 2012) با کاربرد سطوح صفر، ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سیلیسیم در خاک در دو مزرعه (۸/۳ pH_2= و ۷/۲۵ pH_1=) دریافتند سیلیسیم با کاهش جذب سدیم و افزایش جذب پتاسیم سبب بهبود رشد گیاه در هنگام تنش شوری شد. گزارش شده است محلول‌پاشی ۶ میلی‌مولار سیلیکات‌سدیم در رطوبت ۴۰ درصد ظرفیت زراعی خاک با بهبود کارایی مصرف نور می‌تواند سبب تحمل تنش آبی در ارقام گندم شود (Maghsoudi et al., 2015). در پژوهشی دیگر کاربرد ۲۰۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم سیلیکات‌سدیم در خاک در سه سطح رطوبت نسبی خاک (۵±۳۵، ۵±۵۵ و ۵±۷۵ درصد) منجر به تعدیل تنش اکسیداتیو در گندم تحت تنش خشکی شد (Ma et al., 2016). از سوی دیگر سیلیسیم می‌تواند بر جذب عناصر غذایی معدنی در گیاه هم مؤثر باشد. افزایش سیلیسیم در شرایط تنش سبب کاهش معنی‌دار غلظت عناصر غذایی پتاسیم، سدیم، کلسیم، منیزیم و آهن در برگ ارقام برنج شد (Chen et al., 2011). باوجوداینکه گانگ و چن (Gong and Chen, 2012) گزارش کردند که کاربرد سیلیسیم می‌تواند جذب فسفر در برگ‌های گندم را افزایش دهد، ولی امام و همکاران (Emam et al., 2014) نشان دادند که سیلیسیم باعث کاهش غلظت فسفر معدنی در کاه برنج شد. استفاده از سیلیسیم در هریک از رطوبت‌های خاک (۵۰، ۶۵ و ۸۰ درصد ظرفیت زراعی) مقدار فسفر قابل‌استفاده خاک را افزایش داد اما سبب کاهش پتاسیم قابل‌استفاده در خاک گردید (Liu and Guo, 2011). اگرچه کاربرد سیلیسیم در هنگام تنش رطوبتی، غلظت فسفر در برخی گیاهان را افزایش داد، بااین‌وجود گزارش شده است که این عنصر در شرایط بدون تنش نتوانست تغییر معنی‌داری در ماده خشک اندام هوایی و غلظت فسفر در برگ گندم (Sarto et al., 2014) و همچنین رشد گیاه در مراحل غلاف‌رفتن و گلدهی و غلظت فسفر در کاه و دانه برنج (Agostinho et al., 2017) ایجاد نماید؛ بنابراین با توجه به مطالعات اندک در زمینه اثر کاربرد خاکی سیلیسیم در تغذیه گیاهان مختلف ازجمله گندم در شرایط تنش رطوبتی به‌ویژه در خاک‌های آهکی، این آزمایش با هدف بررسی اثر سیلیسیم بر جذب فسفر و رشد گندم در شرایط تنش رطوبتی انجام شد.

مواد و روش‌ها

آزمایشی گلخانه‌ای به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار طی ماه‌های آذر و دی سال ۹۴ در دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد. در طول اجرای آزمایش (۵۰ روز)، گلخانه دارای میانگین حداقل و حداکثر دمای روزانه ۱۸ و ۲۶ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۷۲ و ۹۲/۵ درصد بود. تیمارهای موردبررسی شامل سیلیسیم در سه سطح صفر،۵۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک (Si0، Si50 و Si150) از منبع سیلیکات‌سدیم، فسفر در سه سطح صفر، ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک (P0، P25 و P50) از منبع فسفات‌کلسیم و تنش رطوبتی در دو سطح ۴۵ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک (FC45 و FC100) بودند. خاک آزمایشی از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری پردیس دانشگاه فردوسی مشهد نمونه‌برداری شد و پس از هواخشک کردن و عبور از الک ۲ میلی‌متری برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن مانند بافت خاک (Gee and Bauder, 1986)، pH در گل اشباع (MCLean, 1982)، هدایت الکتریکی در عصاره اشباع (Rhoades, 1982)، درصد کربن آلی (Walkley and Black, 1934)، درصد کربنات کلسیم معادل (Richards, 1969)، عناصر غذایی مانند نیتروژن کل (Bremner, 1996)، پتاسیم قابل‌استفاده (Chapman, and Pratt, 1961)، فسفر قابل‌استفاده (Murphy and Riley, 1962)، سیلیسیم قابل‌استفاده (Liang *et al.*, 2015) و همچنین رطوبت ظرفیت زراعی خاک در فشار ۰/۳ بار با دستگاه صفحات فشاری تعیین گردید (جدول ۱). بر اساس نتایج حاصل از آنالیز خاک و نیاز گندم، در هر گلدان ۵ کیلوگرم خاک همراه با ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم پتاسیم از منبع سولفات‌پتاسیم و ترکیبات فسفات‌کلسیم ($Ca(H_2PO_4)_2.H_2O$) و سیلیکات‌سدیم (Na_2SiO_3) با توجه به نوع تیمار آن قبل از کشت مخلوط شد. ۱۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیتروژن نیز به شکل کود اوره طی دو نوبت (قبل از کشت به‌صورت جامد و اواسط رشد همراه با آب آبیاری به مدت ۴-۲ روز) اضافه گردید. ۱۰ عدد بذر ضدعفونی‌شده گندم رقم پیشتاز

(تهیه‌شده از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی) در عمق ۱ سانتی‌متری خاک هر گلدان کشت شد؛ و به‌منظور کاهش تبخیر و یکنواختی آبیاری سطح هر گلدان با ۴۵۰ گرم شن شسته شده پوشانده شد. سپس هر یک از گلدان‌ها وزن شدند و برای هر گلدان میزان آب لازم برای رسیدن به وزن گلدان در ظرفیت زراعی با استفاده از آب مقطر اضافه شد. رطوبت خاک تا جوانه زدن بذور گندم روزانه دو بار با اسپری آب مقطر تأمین گردید. پس از استقرار گیاهچه‌ها، در هر گلدان ۳ عدد بوته نگهداری شد. به مدت ۱۴ روز با توزین روزانه گلدان‌ها میزان رطوبت خاک هر گلدان به ظرفیت زراعی رسانده شد. آبیاری گیاهان بعد از گذشت ۱۴ روز برای هر تیمار به‌صورت وزنی تا زمان برداشت گیاه با آب مقطر اعمال شد. به‌طوری‌که هرروز تمامی گلدان‌ها وزن گردیدند و کاهش وزن (رطوبت) هر گلدان نسبت به مقدار محاسبه‌شده برای وزن گلدان در حالت رطوبت ظرفیت زراعی (FC) یا ۰/۴۵ FC (بسته به نوع تیمار) با افزودن آب مقطر توسط استوانه مدرج جبران شد. هر سه روز یک‌بار نیز گلدان‌ها جهت کاهش اثرهای حاشیه‌ای در طی زمان آزمایش به‌طور تصادفی جابجا شدند. پس از گذشت ۵۰ روز، در هر گلدان اندام هوایی از محل طوقه برداشت و برای اندازه‌گیری وزن تر نمونه‌ها از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم استفاده شد. اندام هوایی گیاهان نیز با آب مقطر شسته و خشک شدند. سپس به‌منظور تعیین وزن خشک به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد آون قرار گرفتند و توزین شدند. نمونه‌های گیاهی خشک و آسیاب‌شده، به روش هضم خشک عصاره‌گیری و غلظت فسفر در آن‌ها اندازه‌گیری شد (Murphy and Riley, 1962). غلظت سیلیسیم در اندام هوایی نمونه‌ها نیز پس از هضم با اتوکلاو (Elliot and Snyder, 1991) به‌روش رنگ‌سنجی قرائت شد (Liang et al., 2015). جذب هریک از عناصر غذایی از حاصل‌ضرب غلظت عنصر در اندام هوایی و وزن خشک گیاه به دست آمد. همچنین نمونه‌های خاک نیز هواخشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. سپس به‌روش بافر استات عصاره‌گیری و غلظت سیلیسیم قابل‌استفاده آن‌ها با دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل UV/Vis S2000 اندازه‌گیری شد (Liang et al., 2015). جهت تجزیه آماری نتایج آزمایش از نرم‌افزار Minitab 17 استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها نیز با آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد و رسم شکل‌ها توسط نرم‌افزار Excel 2016 انجام شد.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از کشت

Table 1. Some physical and chemical properties of the soil prior to sowing

رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	pH	EC	FC	کربن آلی Organic Carbon	کربنات کلسیم معادل CCE
----------%----------			-	dS m^{-1}	----------%----------		
16	52.7	31.3	7.30	2.10	15	0.35	13.0

جدول ۲. غلظت عناصر غذایی در خاک قبل از کشت

Table 2. The concentration of nutrients in the soil before planting

فسفر قابل‌استفاده $P_{ava.}$	پتاسیم قابل‌استفاده $K_{ava.}$	سیلیسیم قابل‌استفاده $Si_{ava.}$	نیتروژن کل Total Nitrogen
----------mg kg^{-1}----------			
5.20	151	45.45	450

نتایج و بحث

وزن تر و خشک اندام هوایی

با توجه به جدول ۳ اثرهای اصلی افزودن فسفر و تنش رطوبتی و برهمکنش آن‌ها بر وزن تر و خشک اندام هوایی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد. با کاهش درصد رطوبت خاک از ۱۰۰ به ۴۵ درصد ظرفیت زراعی و مواجه‌شدن گیاه گندم با تنش رطوبتی وزن تر و خشک اندام هوایی کاهش معنی‌دار ۵۵/۴ و ۴۱/۵ درصدی یافت (شکل ۱). همچنین برهمکنش فسفر و تنش رطوبتی نشان داد که در هر دو شرایط رطوبتی افزایش غلظت فسفر در خاک تا سطح ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم منجر به افزایش معنی‌دار وزن تر و خشک اندام هوایی شد. درنتیجه استفاده از سطح بالای کود فسفر اثری بر رشد رویشی گیاه نداشت (شکل ۱).

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر فسفر، سیلیسیم و تنش رطوبتی بر وزن تر و خشک، غلظت و جذب سیلیسیم در اندام هوایی

Table 3. Variance analysis of the effects of phosphorus (P), silicon (Si) and moisture stress (FC) on fresh and dry weights, silicon concentration and uptake in the shoots

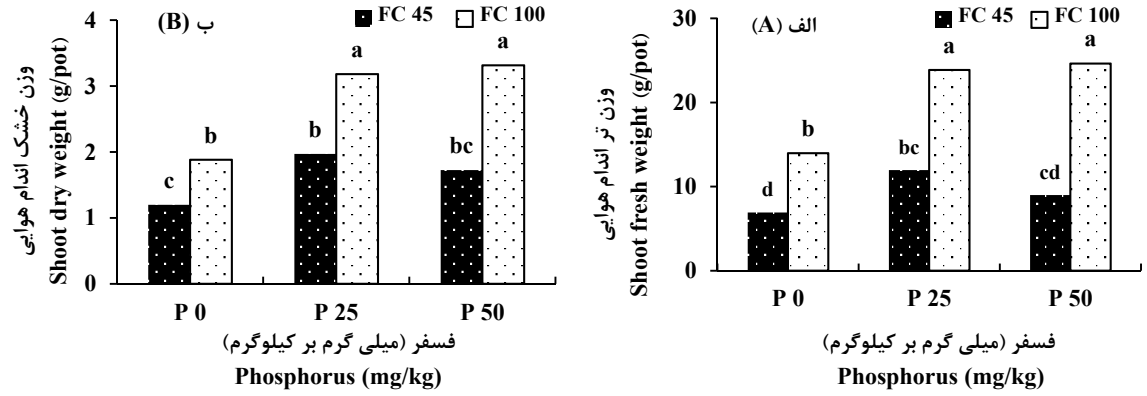
منابع تغییر S.O.V		درجه آزادی df	وزن تر اندام هوایی Shoot Fresh weight	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	غلظت سیلیسیم در اندام هوایی Shoot silicon concentration	جذب سیلیسیم در اندام هوایی Shoot silicon uptake
P	فسفر	2	277.66*	5.7912*	144211520*	163.34*
Si	سیلیسیم	2	15.62ns	0.1363ns	32695621*	67.42*
FC	تنش رطوبتی	1	1746.29*	17.6571*	64848486*	1738.25*
P×Si	فسفر× سیلیسیم	4	3.4ns	0.0417ns	26436939*	124.38*
FC× P	فسفر× تنش رطوبتی	2	79.68*	0.8849*	82892ns	6.51ns
FC× Si	سیلیسیم × تنش رطوبتی	2	10.6ns	0.2721ns	9551318*	47.82*
FC×Si× P	فسفر× سیلیسیم× تنش رطوبتی	4	8.95ns	0.2015ns	2233762ns	71.7*
(Error)	خطا	35†	6.09	0.1865	1337486	7.18
(CV%)	ضریب تغییرات	-	*16.4*	*19.4*	*17.8*	*19.4*

ns: Non significant, *: Significantly different at P<0.05 level

ns: غیر معنی‌دار، *: معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد.

†: The experiment contains a missing value.

†: آزمایش دارای یک داده گمشده می‌باشد.



شکل ۱. برهمکنش تنش رطوبتی و فسفر بر الف) وزن تر و ب) وزن خشک اندام هوایی

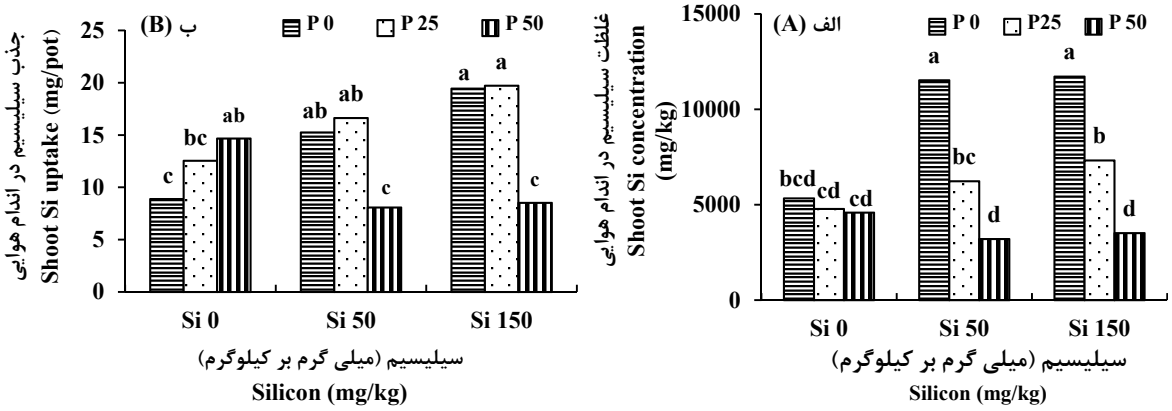
Fig. 1. The interaction of phosphorus and moisture stress on shoot A) fresh weight and B) dry weight

اثر اصلی فاکتور سیلیسیم و برهمکنش آن با تنش رطوبتی بر صفات وزن تر و خشک اندام هوایی، در هریک از رطوبت‌های خاک معنی‌دار نشد (جدول ۳). محققان گزارش کردند که در تنش آبی ناشی از پلی‌اتیلن‌گلیکول در کشت هیدروپونیک ذرت، افزودن سیلیسیم تأثیر معنی‌داری بر وزن تر و خشک گیاه نداشت (Gao et al., 2004). با تأمین رطوبت کافی در کشت هیدروپونیک گندم، نیز این عنصر تغییر معنی‌داری در وزن تر و خشک اندام هوایی ایجاد نکرد (Pei et al., 2010). به‌علاوه اثر سیلیسیم بر وزن تر اندام هوایی گیاه با بروز تنش آبی ناشی از پلی‌اتیلن‌گلیکول

معنی‌دار نشد. درنتیجه پی و همکاران (Pei et al., 2010) بیان کردند عواملی مانند نوع گونه گیاهی، روش و شدت اعمال تنش ممکن است بر رشد گیاه در هنگام کاربرد سیلیسیم مؤثر باشند. بر اساس نتایج به نظر می‌رسد افزایش فراهمی سیلیسیم در خاک در اثر کشت و کار سبب تأمین حد بحرانی غلظت سیلیسیم قابل‌استفاده در خاک شد؛ بنابراین اثر سیلیسیم بر رشد گیاه معنی‌دار نگردید (شکل ۵). بنا بر بررسی زو و همکاران (Xu et al., 2001) گندم با افزایش غلظت سیلیسیم قابل‌استفاده در خاک آهکی بیشتر از حد بحرانی (۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سیلیسیم) به کوددهی سیلیسیم پاسخ نمی‌دهد.

غلظت و جذب سیلیسیم در اندام هوایی

بر اساس جدول ۳ تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تمامی اثرها به‌جز برهمکنش دوگانه فسفر و تنش رطوبتی بر غلظت و جذب سیلیسیم در اندام هوایی معنی‌دار شد. جدول ۳ همچنین نشان می‌دهد که برهمکنش سه‌گانه فسفر، سیلیسیم و تنش رطوبتی نیز بر غلظت سیلیسیم در اندام هوایی معنی‌دار نبود. در غلظت‌های صفر و ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک، با افزایش غلظت سیلیسیم در خاک غلظت (شکل ۲-الف) و جذب (شکل ۲-ب) سیلیسیم در اندام هوایی افزایش معنی‌دار یافت. به‌طوری‌که در غلظت صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک، سطح ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سیلیسیم در خاک و در غلظت ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک، سطح ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سیلیسیم در خاک منجر به افزایش معنی‌دار غلظت و جذب سیلیسیم در اندام هوایی شد (شکل ۲-الف و ب)، اما در غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر در خاک، افزایش سیلیسیم در خاک تا سطح ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سبب کاهش معنی‌دار جذب سیلیسیم در اندام هوایی گردید (شکل ۲-ب). به نظر می‌رسد که برهمکنش سیلیسیم و فسفر وابسته به غلظت آن‌ها در خاک است. ما و تاکاهاشی (Ma and Takahashi, 2002) بیان کردند در هنگام محدودیت فراهمی فسفر در خاک سیلیسیم سبب بهبود فراهمی آن در گیاه و در غلظت‌های بالای فسفر در محلول، جذب فسفر در گیاه را کاهش می‌دهد.



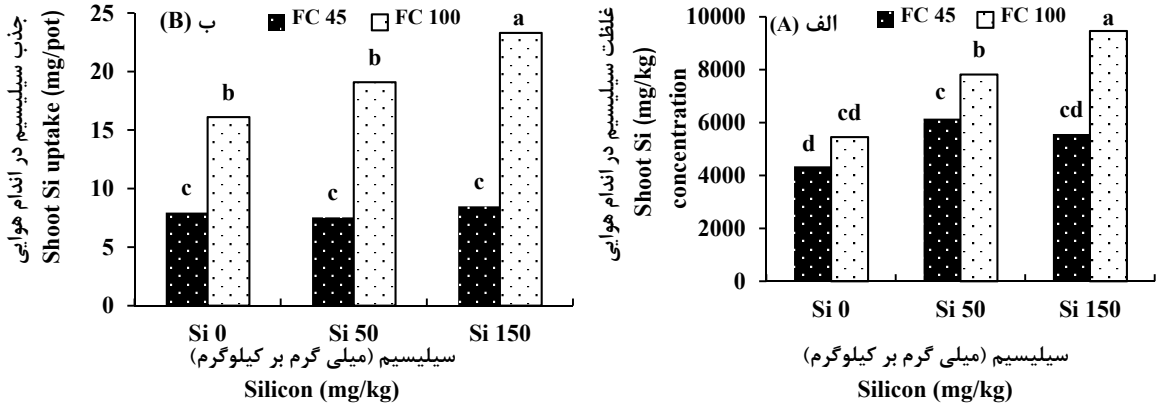
شکل ۲. برهمکنش سیلیسیم و فسفر بر الف) غلظت و ب) جذب سیلیسیم در اندام هوایی

Fig. 2. The interaction of silicon and phosphorus on shoot A) Si concentration and B) Si uptake

با توجه به برهمکنش سیلیسیم و تنش (شکل ۳-الف) در رطوبت ظرفیت زراعی خاک تغییر غلظت سیلیسیم در خاک از صفر به ۵۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سبب افزایش معنی‌دار غلظت سیلیسیم در اندام هوایی نسبت به تیمار شاهد گردید. به‌علاوه جذب سیلیسیم در اندام هوایی با افزایش غلظت سیلیسیم در خاک از صفر به ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش معنی‌دار یافت.

کشت ۵ گونه گیاهی (برنج، چغندرقند، گندم، آفتابگردان و سویا) در محلول غذایی نیز نشان داد که جذب سیلیسیم با افزایش غلظت سیلیسیم در محلول افزایش یافت اما تولید ماده خشک اندام هوایی تغییر معنی‌داری نکرد. همچنین جذب سیلیسیم توسط ریشه گیاه برنج بیشتر از گندم بود (Vandervorm, 1980)؛ بنابراین شاید بتوان گفت چون سیلیسیم عنصری ضروری برای رشد گیاه نیست و نیاز گندم

به عنصر سیلیسیم جهت رشد و نمو خود نسبت به برنج کمتر است، بدین‌جهت کاربرد سیلیسیم تأثیری بر رشد گیاه نداشت. از طرف دیگر با بروز تنش رطوبتی افزایش سیلیسیم تا سطح ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک منجر به افزایش معنی‌دار غلظت سیلیسیم در اندام هوایی شد، اما جذب سیلیسیم در اندام هوایی با افزایش غلظت سیلیسیم در خاک تغییر معنی‌داری نکرد و با بروز تنش رطوبتی جذب سیلیسیم در اندام هوایی کاهش یافت (شکل ۳-ب). پس شاید بتوان رطوبت را به‌عنوان یک عامل مؤثر بر جذب سیلیسیم در اندام هوایی در نظر گرفت.



شکل ۳. برهمکنش سیلیسیم و تنش رطوبتی بر الف) غلظت و ب) جذب سیلیسیم در اندام هوایی

Fig. 3. The interaction of silicon and moisture stress on shoot A) Si concentration and B) Si uptake

غلظت و جذب فسفر در اندام هوایی

جدول ۴ نشان می‌دهد که اثرهای اصلی، دوگانه و سه‌گانه تیمارهای آزمایشی بر غلظت فسفر در اندام هوایی معنی‌دار شد اما تنها اثر سه‌گانه فسفر، سیلیسیم و تنش رطوبتی بر جذب فسفر در اندام هوایی معنی‌دار نبود. با افزایش غلظت سیلیسیم در خاک از صفر به ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در رطوبت ظرفیت زارعی کاهش معنی‌دار غلظت و جذب فسفر در اندام هوایی مشاهده شد (شکل ۴). غلظت فسفر در اندام هوایی و جذب فسفر توسط گیاه برنج با کاربرد سیلیسیم در دو مرحله رویشی و زایشی کاهش یافت (Ma and Takahashi, 1989).

بر اساس شکل ۴ تنش رطوبتی سبب کاهش معنی‌دار جذب فسفر در اندام هوایی در هریک از غلظت‌های سیلیسیم در خاک شد. از سوی دیگر با افزایش غلظت سیلیسیم در خاک، غلظت و جذب فسفر در اندام هوایی در هنگام تنش تغییر معنی‌داری نکرد. با توجه به اینکه رطوبت عامل مؤثر بر فراهمی عناصر غذایی در خاک و انتقال آن‌ها از ریشه به اندام هوایی است و مکانیسم اصلی حرکت فسفر در خاک به سمت سلول‌های ریشه پخشیدگی است (Silva et al., 2011)، به نظر می‌رسد اثر سیلیسیم بر جذب فسفر در اندام هوایی به میزان رطوبت خاک نیز وابسته است.

غلظت سیلیسیم در خاک

با توجه به جدول ۴ اثر همه تیمارهای آزمایشی به‌جز برهمکنش فسفر و تنش رطوبتی بر غلظت سیلیسیم در خاک معنی‌دار شد. بر اساس برهمکنش سیلیسیم و تنش رطوبتی (شکل ۵) در سطح صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم سیلیسیم، کشت گیاه سبب افزایش غیر معنی‌دار غلظت سیلیسیم در خاک از ۴۵/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم (شکل ۵) به ۸۰/۵ و ۹۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در دو شرایط با و بدون تنش رطوبتی شد. از آنجائی که در خاک‌های آهکی غلظت بحرانی سیلیسیم قابل‌استفاده حدود ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در نظر گرفته شده است و گندم هنگامی‌که غلظت سیلیسیم قابل‌استفاده در خاک آهکی کمتر از حد بحرانی شود، به افزایش کود عکس‌العمل نشان نمی‌دهد (Xu et al., 2001). به نظر می‌رسد پس از کشت گیاه، فعالیت بیولوژیکی ریشه‌های گیاه و میکروارگانیسم‌های خاک (Kumawat et al., 2017)، تراوش‌های ریشه و اثرهای متقابل بین گیاه و خاک موجب افزایش حلالیت سیلیکات‌های خاک و تبدیل آن به شکل

قابل‌استفاده سیلیسیم شد. با توجه به افزایش سیلیسیم قابل‌استفاده در خاک در اثر کشت و کار و نیاز کمتر گیاه گندم به عنصر سیلیسیم نسبت به سایر گیاهان، بیشتر سیلیسیم جذب‌شده توسط گیاه از سیلیسیم موجود در خاک تأمین شد درنتیجه با کوددهی سیلیسیم اثر معنی‌داری بر رشد گیاه مشاهده نشد.

بررسی برهمکنش سیلیسیم و فسفر (شکل ۶) نشان داد که غلظت سیلیسیم در خاک با افزایش سیلیسیم از صفر به ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در هریک از غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر افزایش معنی‌دار یافت. همچنین افزایش فسفر از صفر به ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تنها در غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سیلیسیم سبب افزایش معنی‌دار غلظت سیلیسیم قابل‌استفاده در خاک شد. بااین‌حال تفاوت معنی‌داری بین سطوح ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر بر غلظت سیلیسیم در خاک مشاهده نشد. به نظر می‌رسد غلظت اولیه سیلیسیم در خاک، غلظت سیلیسیم و فسفر مصرفی به‌عنوان کود و کشت گیاه می‌تواند بر میزان غلظت سیلیسیم قابل‌استفاده در خاک مؤثر باشد.

جدول ۴. تجزیه واریانس اثر فسفر، سیلیسیم و تنش رطوبتی بر غلظت و جذب فسفر در اندام هوایی و غلظت سیلیسیم در خاک

Table 4. Variance analysis of the effects of phosphorus (P), silicon (Si) and moisture stress (FC) on shoot phosphorus concentration and uptake and silicon concentration in soi

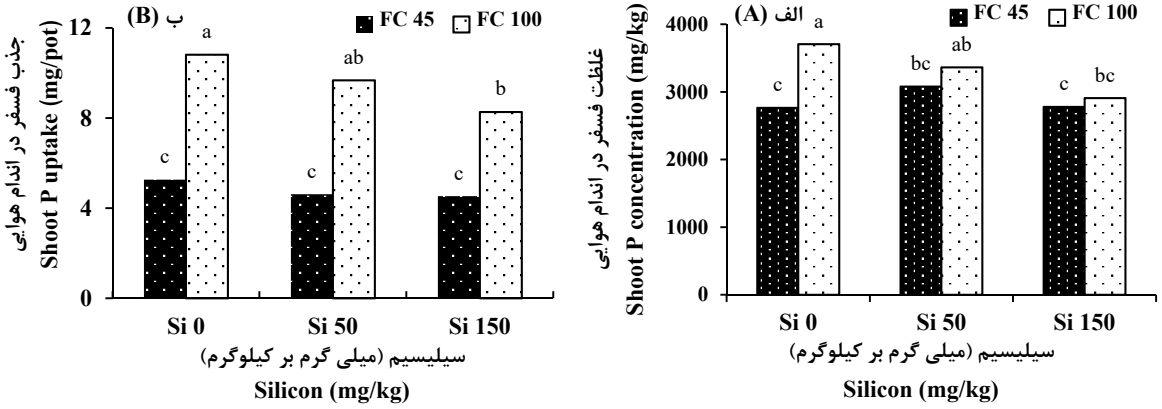
S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی df	غلظت فسفر در اندام هوایی Shoot phosphorus concentration	جذب فسفر در اندام هوایی Shoot phosphorus uptake	غلظت سیلیسیم در خاک silicon concentration in soil
P	فسفر	2	13578831*	195.925*	3598.78*
Si	سیلیسیم	2	874445*	11.592*	7374.35*
FC	تنش رطوبتی	1	2673460*	299.344*	587.92*
Si× P	فسفر× سیلیسیم	4	1875076*	10.721*	2574.81*
FC× P	فسفر× تنش رطوبتی	2	1076470*	23.519*	195.91ns
FC× Si	سیلیسیم × تنش رطوبتی	2	795152*	3.833*	750.42*
FC×Si× P	فسفر× سیلیسیم× تنش رطوبتی	4	457562*	2.285ns	998.71*
Error	خطا	35†	106882	1.03	64.74
CV%	ضریب تغییرات	-	*10.5*	*14*	*8.2*

ns: Non significant, *: Significantly different at P<0.05

ns: غیر معنی‌دار، *: معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد

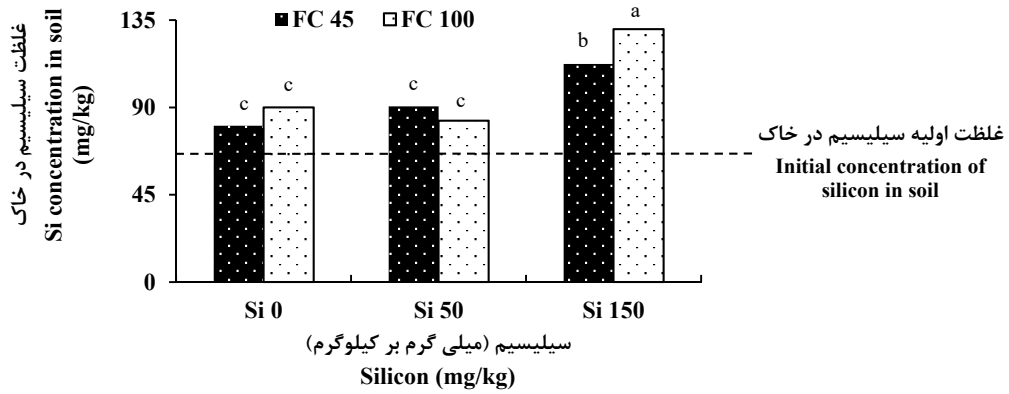
†: The experiment contains a missing value.

†: آزمایش دارای یک داده گمشده است.



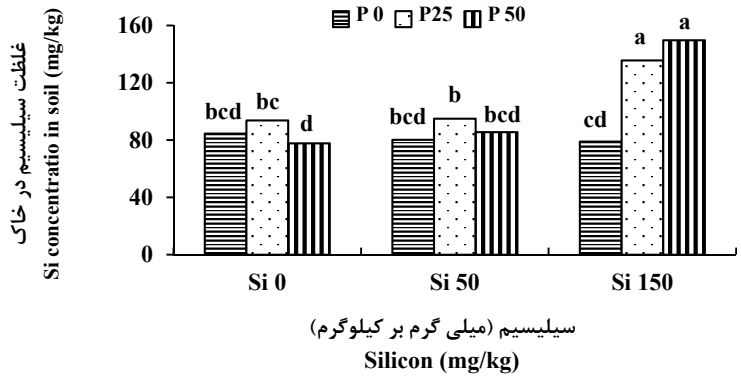
شکل ۴. برهمکنش سیلیسیم و تنش رطوبتی بر الف) غلظت و ب) جذب فسفر در اندام هوایی

Fig. 4. The interaction of silicon and moisture stress on shoot A) P concentration and B) P uptake



شکل ۵. برهمکنش سیلیسیم و تنش رطوبتی بر غلظت سیلیسیم در خاک

Fig. 5. The intraction of silicon and moisture stress on Si concentration in soil



شکل ۶. برهمکنش سیلیسیم و فسفر بر غلظت سیلیسیم در خاک

Fig. 6. The intraction of silicon and phosphorus on Si concentration in soil

نتیجه‌گیری نهایی

بر اساس نتایج، تنش رطوبتی سبب کاهش معنی‌دار وزن تر و خشک اندام هوایی، غلظت و جذب فسفر در اندام هوایی شد. جذب سیلیسیم در اندام هوایی نیز با اعمال تنش رطوبتی کاهش یافت، بااین‌وجود افزایش غلظت سیلیسیم، اثر معنی‌داری بر جذب سیلیسیم در اندام هوایی و وزن تر و خشک اندام هوایی نداشت. غلظت سیلیسیم در خاک پس از کشت گیاه در سطح صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش یافت. به نظر می‌رسد به همین دلیل کاربرد تیمارهای سیلیسیم در خاک موردمطالعه موجب تأثیر معنی‌دار بر رشد گیاه، مقاومت به تنش و جذب سیلیسیم در اندام هوایی نشده است؛ بنابراین توجه به مقادیر اولیه سیلیسیم در خاک می‌تواند حائز اهمیت باشد. بااین‌حال علاوه بر مقادیر اولیه سیلیسیم خاک، نوع خاک، شرایط آزمایش، مقدار کاربرد سیلیسیم و نوع گیاه می‌تواند در شرایط حاصل مؤثر باشد.

منابع

Ali, A., Basra, S.M.A. Hussain, S., Iqbal, J. 2012. Increased growth and changes in wheat mineral composition through calcium silicate fertilization under normal and saline field conditions. Chilean journal of agricultural research. 72(1), 98-103.

Asadi, E., Haghnia, G.H., Lakzian, A., Maftoun, N. 2014. Effect of silicon and nitrogen different quantities on morphology characteristics, yield and yield components of two varieties of wheat. Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi). 103, 167-178. [In Persian with English Summary]

Agostinho, F.B., Tubana, B.S., Martins, M.S., Datnoff, L.E., 2017. Effect of different silicon sources on yield and silicon uptake of rice

grown under varying phosphorus rates. Plants, 6, 1-17.

Bremner, J.M. 1996. Nitrogen-Total. In Methods of Soil Analysis: Part 3, Chemical Methods, ed. D.L., Sparks, Madison, Wisconsin.

Chapman, H.D., Pratt, P.F. 1961. Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, Berkeley.

Chen, W., Yao, X., Cai, K., Chen, J., 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. Biological Trace Element Research. 142, 67-76.

Debona, D., Rodrigues, F.A., Datnoff, L.E., 2017. Silicon's Role in Abiotic and biotic plant stresses. Annual Review of Phytopathology. 55, 85-107.

Emam, M.M., Khattab, H.E., Helal, N.M., Deraz, A.E., 2014. Effect of selenium and silicon on yield quality of rice plant grown under drought stress. Australian Journal of Crop Science. 8, 596-605.

Gao, X., Zou, C., Wang, L., Zhang, F., 2004. Silicon improves water use efficiency in maize plants. Journal of Plant Nutrition. 27, 1457-1470.

Gee, G.W., Bauder, J.W. 1986. Hydrometer method. In Methods of Soil Analysis: Part 1, Physical and Mineral Methods, eds. G.S., Campbell, R.D., Jackson, M.M., Mortland, D.R., Nielsen, and A. Klute, Madison, Wisconsin.

Ghasemi lemrasky, M., Alavi, S.V., Ghanbari malidarreh, A. 2010. Reciprocal effects of silicon and phosphorus utilization on blast disease incidence in rice tarom cultivar. Crop production in Environmental Stress. 2(3-4), 143-157. [In Chinese with English Summary].

Gong, H., Chen, K., 2012. The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions, Acta Physiologiae Plantarum. 34, 1589-1594.

Kamali Moghadam, A., Ghanavati, N., Malakuti, M. 2015. The Influence of Fertilizers Ammonium Molybdate and Sodium Silicate on the Quantity and Quality of Wheat. Crop Physiology Journal. 7(27), 95-103. [In Chinese with English Summary].

Kumawat, N., Kumar, R., Kumar, S., Meena, V.S., 2017. Nutrient solubilizing microbes (NSMs): It's role in sustainable crop production. In: Meena V.S., et al. (eds.), Agriculturally Important Microbes for Sustainable Agriculture. Vol. 2. Springer, Singapore. pp. 25-61.

Liang, Y., Nikolic, M., Belanger, R., Gong, H., Song, A., 2015. Silicon in Agriculture: From Theory to Practice. Springer, London.

Liu, H., Guo, Z., 2011. Effects of Supplementary Silicon on nitrogen, phosphorus and potassium contents in the shoots of medicago sativa plants and in the soil under different soil moisture conditions. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology. 17, 809-813.

Ma, D., Sun, D., Wang, C., Qin, H., Ding, H., Li, Y., and Guo, T. 2016. Silicon application alleviates drought stress in wheat through transcriptional regulation of multiple antioxidant defense pathways. Journal of Plant Growth Regulation. 35(1): 1-10.

Ma, J., Takahashi, E. 1989. Effect of silicic acid on phosphorus uptake by rice plant. Soil Science and Plant Nutrition. 35(2): 227-234.

Ma, J.F., and Takahashi, E. 2002. Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan. Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands.

Maghsoudi, K., Emam, Y., and Ashraf, M. 2015. Influence of foliar application of silicon on chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, and growth in water-stressed wheat cultivars differing in drought tolerance. Turkish Journal of Botany. 39: 1-10.

MCLean, E.O. Soil pH and Lime Requirement. 1982. In Methods of Soil Analysis: Part 2, Chemical and microbiological properties, eds. A.L., Page, R.H., Miller, and Keeney, D.R, Madison, Wisconsin.

Murphy, J., Riley, J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Analytica Chimica Acta. 27, 31-36.

Pei, Z.F., Ming, D.F., Liu, D., Wan, G.L., Geng, X.X., Gong, H.J., Zhou, W.J., 2010. Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. Journal of Plant Growth Regulation. 29, 106-115.

Rhoades, J.D. 1982. Soluble salts. In Methods of Soil Analysis: Part 2, Chemical and microbiological properties, eds. A.L., Page, R.H., Miller, and Keeney, D.R, Madison, Wisconsin.

Richards, L.A. 1969. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. United States Department of Agriculture, Washington D.C.

Rodrigues, F.A., and Datnoff, L.E. 2015. Silicon and Plant Diseases. Springer International Publishing.

Sarto, M.V.M., Lana, M. C., Rampim, L., Rosset, J. S., Wobeto, J. R., Ecco, M., Bassegio, D., Costa, P. F., 2014. Effect of silicate on nutrition and yield of wheat. African Journal of Agricultural Research. 9, 956-962.

Silva, E.C., Nogueira, R.J.M.C., Silva, M.A., Albuquerque, M.B., 2011. Drought stress and plant nutrition. Plant Stress. 5, 32-41.

Vandervorm, P.D.J., 1980. Uptake of Si by five plant species as influenced by variations in Si-supply. Plant and Soil. 56, 153-156.

Walkley, A., and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science. 37(1): 29-38.

Xu, G., Zhan, X., Li, C., Bao, S., Liu, X., Chu, T. 2001. Assessing methods of available silicon in calcareous soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 32, 787-801.