اثر اسید سیلیسیک و باکتری‌های حل‌کننده فسفات بر فراهمی عناصر کم‌مصرف

لیلا رضاخانی[1]، بابک متشرع زاده، محمدمهدی طهرانی، حسن اعتصامی و حسین میرسیدحسینی

کارشناس بخش تحقیقات شیمی و حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه، موسسه تحقیقات خاک و آب،کرج، ایران؛ **leila.rezakhani@yahoo.com**

استاد گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران؛ **moteshare@ut.ac.ir**

استادیار پژوهش بخش تحقیقات شیمی حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران؛ **mtehrani2000@yahoo.com**

دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران؛ **hassanetesami@ut.ac.ir**

دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران؛ **mirseyed@ut.ac.ir**

دریافت: **1400/9/21** و پذیرش: **1401/2/21**

چکیده

با توجه به اینکه اغلب خاک‌های آهکی ایران دچار کمبود یک یا چند عنصر کم‌مصرف می‌باشد، تغذیه بهینه عناصرغذایی، نظیر سیلیسیم، تحت تأثیر تیمارهای زیستی، می‌تواند اثربخشی بالایی در این شرایط داشته باشد. از این رو، به منظور بررسی اثرات اسید سیلیسیک و باکتری‌های حل‌کننده فسفات بر فراهمی عناصرغذایی کم‌مصرف توسط گندم، این تحقیق در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور شامل چهار سطح سیلیسیم (صفر، 150، 300، 600) میلی‌گرم بر کیلوگرم سیلیسیم از منبع اسید سیلیسیک و سه سطح باکتری (عدم تلقیح باکتری، باسیلوس، و سودوموناس) در سه تکرار در گلخانه مؤسسه تحقیقات خاک و آب اجرا شد. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داد که کاربرد توأم اسید سیلیسیک و باکتری‌های حل‌کننده فسفات، موجب افزایش جذب منگنز و آهن نسبت به تیمار شاهد شد، اما اثر ناهمسازی یا غیرهم افزایی بین عناصرغذایی کم‌مصرف، موجب کاهش جذب روی در سطوح کاربرد بالاتر اسید سیلیسیک شد. اثر تلقیح باکتری باسیلوس و سودوموناس بر مقدار جذب روی، منگنز و آهن اندام هوایی گندم، نسبت به باکتری شاهد، برتری داشت. از طرفی کاربرد اسید سیلیسیک (600 میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک به‌همراه باکتری سودوموناس)، غلظت فسفر اندام هوایی گندم را تا سطح بهینه، به‌طور معنی‌داری افزایش داد. از آنجایی که در خاک آهکی مصرف بیش از حد کود فسفاتی در جذب عناصر کم‌مصرف مشکل ایجاد می‌کند، لذا کاربرد ترکیبی اسید سیلیسیک و باکتری‌های حل‌کننده فسفات می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر در فراهمی عناصر کم‌مصرف در خاک مورد مطالعه در شرایط گلخانه‌ای توصیه شود.

واژه‌های کلیدی: سیلیسیم، باکتری‌های محرک رشد، جذب عناصرغذایی، گندم، خاک آهکی

---

[1]. نویسنده مسئول، آدرس: کرج، موسسه تحقیقات خاک و آب، بخش تحقیقات شیمی، حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه

مقدمه

سطح وسیعی از خاک‌های زراعی ایران را خاک‌های آهکی تشکیل می‌دهد. از دیدگاه مدیریتی، تولید محصول در خاک‌های آهکی با مشکلات ویژه‌ای همراه است. به‌دلیل وابستگی قابلیت جذب برخی عناصر غذایی کم مصرف به pH، معمولاً در چنین خاک‌هایی این عناصر تثبیت شده و از دسترس گیاه خارج می‌شوند (مارشنر، 1995). کشاورزان برای تأمین عناصرغذایی مورد نیاز گیاهان از انواع مختلف کودهای شیمیایی استفاده می‌کنند. کودهای شیمیایی اگرچه در کوتاه‌مدت نیاز گیاهان را تأمین می‌کنند ولی مصرف بیش از اندازه آن‌ها علاوه بر بالا بردن هزینه تولید، تأثیرات ضدیتی بر یکدیگر داشته و از جذب آن‌ها توسط ریشه گیاهان جلوگیری می‌کند. به عنوان مثال مصرف بیش از حد کود فسفری در جذب عناصر کم مصرف مانند آهن و روی مشکلاتی ایجاد می‌کند. کشاورزان ناچار به افزایش کاربرد کود آهن و روی می‌شوند که کاربرد این دو ممکن است در جذب کاتیون‌های مشابه مانند مس و منگنز اختلال ایجاد نماید و این چرخه مصرف به تدریج منجربه تجمع کودها در خاک و افزایش هزینه تولید شود (اعتمادیان و همکاران، 1396).

اگرچه فسفر به مقدار فراوانی در خاک‌ها به دو شکل آلی و معدنی یافت می‌شود اما در مقایسه با سایر عناصرغذایی، فسفر در بیشتر خاک‌ها تحرک و قابلیت جذب کمی دارد و بخش زیادی از فسفات معدنی محلول که به شکل کود شیمیایی به خاک اضافه می‌شود تثبیت شده و برای گیاهان غیرقابل استفاده می‌شود. در میان باکتری‌ها، جنس‌های متعلق به سودوموناس، باسیلوس و ریزوبیوم توانمندترین جدایه‌های حل‌کننده فسفات‌های نامحلول‌معدنی هستند، که از طریق انحلال فسفات‌های نامحلول‌آلی و معدنی قابلیت جذب فسفر توسط گیاه را افزایش می‌دهند (تیان و کولاول، 2004). تولید و ترشح سیدروفور و اسیدهای آلی توسط باکتری‌های حل‌کننده فسفات، باعث افزایش اسیدی شدن محیط اطراف ریشه و کاهش pH خاک می‌شود و می‌تواند نقش مهمی در انحلال و آزادسازی عناصرغذایی کم‌محلول در خاک مانند آهن، روی، مس، منگنز و فسفر داشته باشد (الرحمن و همکاران، 2012: اولانریواجو و همکاران، 2017). در شرایطی که گیاه با تنش مواجه می‌شود، تغذیه صحیح گیاه با استفاده از عناصر معدنی از راهکارهای کاهش اثرهای زیانبار تنش‌های محیطی گزارش شده‌است. در این بین اثرهای مفید سیلیسیم بر رشد، عملکرد و تحمل برخی از گیاهان در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی اثبات شده‌است (زرگر و همکاران، 2019). تغذیه بهینه سیلیسیم با افزایش رشد و توسعه حجمی و وزنی ریشه‌ها می‌تواند منجر به افزایش سطح کل جذب‌کننده عناصر شود (سنوب و همکاران، 2011).

اگرچه تغذیه گیاهان با کودهای حاوی سیلیسیم نشان‌دهنده افزایش عملکرد و بهبود کیفیت محصول می‌باشد، به نظر می‌رسد اثرات مفید سیلیسیم تحت شرایط مطلوب چندان چشمگیر نبوده و تنها زمانی که گیاهان در معرض تنش قرار گیرند، اثرات سودمند سیلیسیم مشاهده می‌گردد (گونتزر و همکاران، 2012). اما در تحقیقی که توسط (رضاخانی و همکاران، 2019) بر روی گیاه گندم و گیاه سورگوم (رضاخانی و همکاران، 2020) انجام شد، نتایج نشان داد که کاربرد اسید سیلیسیک در شرایط حضور فسفر محلول در خاک (عدم تنش) نسبت به شرایط کمبود فسفرمحلول (خاک فسفات) توانست منجر به افزایش ماده خشک و قابلیت دسترسی فسفر شود. مکانیزم‌هایی که به وسیله آن‌ها سیلیسیم (تنظیم ژن‌های انتقال‌دهنده برای جذب عناصرغذایی و افزایش ترشحات مالات و سیترات) (کستیک و همکاران، 2017) و باکتری‌های حل‌کننده فسفات (تولید اسیدهای آلی و کاهش pHخاک) (شارما و همکاران، 2013) می‌توانند قابلیت دسترسی عناصرغذایی را برای گیاهان افزایش دهند، تا حدی شناخته شده‌اند. نتایج تحقیقات (گریجر و همکاران، 2018) نیز نشان داد که کاربرد اسید سیلیسیک، فسفر قابل

جذب گیاه را افزایش می‌دهد (به دلیل کاهش ظرفیت تثبیت فسفر خاک و افزایش حلالیت فسفر که در نهایت منجربه افزایش کارایی مصرف کودهای فسفاتی می‌گردد). در ارتباط با عناصر کم‌مصرف، حلالیت روی در ریزوسفر، از طریق اسیدی شدن محیط رشد و دفع عوامل کلات-کننده توسط ریشه، کنترل می‌شود (سینکلیر و کرامر، 2012). کاربرد سیلیسیم موجب ضخیم شدن دیواره سلولی ریشه‌ها و تأخیر در انتقال یون Zn^{2+} به ساقه می‌گردد. هنگامی که سیلیسیم و روی در مجاورت آندودرم ریشه قرار می‌گیرند، به شکل سیلیکات‌روی رسوب می‌کند (افزایش جذب (Zn^{2+}) توسط سیلیکات‌ها (SiO_4^{4-})) و مانع از انتقال روی به آوندهای چوبی می-شود و در نهایت درون واکوئل‌ها تجمع می‌یابد و از انتقال بیش از حد برخی فلزات به اندام‌های حساس گیاه جلوگیری می‌کند (شی و همکاران، 2013). محققین دریافتند که عوامل کلات‌کننده با وزن مولکولی کم (از قبیل سیترات) حلالیت روی را از طریق تشکیل کمپلکس با عنصر روی افزایش می‌دهد (پاولوویک و همکاران، 2013؛ بیتیوسکی و همکاران، 2014). بر طبق تحقیقات گذشته زمانی که سطح فسفر خاک پایین باشد، افزودن اسید سیلیسیک به خاک، موجب کاهش جذب منگنز به میزان 50 درصد و کاهش جذب آهن به میزان 20% می-گردد.

در این صورت نسبت فسفر به آهن و نسبت فسفر به منگنز افزایش می‌یابد، لذا قابلیت جذب فسفر در گیاهانی که در شرایط کمبود و یا بیشبود فسفر هستند، به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد (لوکس و همکاران، 2003). توکلی و همکاران (2011) گزارش کردند که افزایش جذب فسفر تحت تأثیر سیلیسیم، به دلیل کاهش سمیت منگنز در اثر تغذیه سیلیسیمی و افزایش نسبت فسفر به منگنز و فسفر به آهن در گیاه می‌باشد. ترشحات ریشه‌ای که توسط باکتری‌های محرک رشد آزاد می‌شوند، با عناصر آهن و منگنز و دیگر عناصر تشکیل کمپلکس می‌دهند و بدین‌صورت از رسوب آن‌ها جلوگیری می‌کنند (میرانصاری، 2013). همچنین باکتری‌های محرک رشد، می‌توانند اثرات منفی بیشبود این عناصر را با مکانیسم تولید سیدروفور و ترشحات ریشه‌ای کاهش دهند. باکتری‌های محرک رشد می‌توانند قابلیت دسترسی منگنز را در گیاهان با کاهش اکسیداسیون Mn^{4+} به Mn^{2+} کاهش دهند و بر رشد گیاه و ترشحات ریشه‌ای اثر گذارند (دوتا و پادیل، 2010). در ارتباط با عنصر آهن کاربرد سیلیسیم، کلروز ناشی از کمبود آهن را از طریق افزایش انتقال آهن از ریشه به ساقه، ایجاد تعادل با عناصرغذایی دیگر از قبیل نسبت آهن به منگنز، تجمع ترکیبات متحرک آهن از قبیل سیترات (در آوندهای چوبی و بافت‌های ریشه و ساقه) و افزایش فعالیت کلات آهن رداکتاز، کاهش می‌دهد (اعتصامی و جیونگ، 2018). همچنین کاربرد سیلیسیم می‌تواند از طریق رهاسازی یون‌های هیدروکسیل (OH^-) توسط ریشه، افزایش ظرفیت اکسیداسیونی ریشه‌ها (تغییر آهن دوظرفیتی (Fe^{2+}) به آهن سه ظرفیتی (Fe^{3+})) و افزایش رسوب آهن در سطح ریشه‌ها به صورت سیلیکات‌های آهن، موجب کاهش تنش سمیت آهن گردد (یوکیانگ و همکاران، 2012).

طبق تحقیقات انجام شده تولید هورمون ایندول‌استیک‌اسید و سیدروفور توسط باکتری‌های محرک رشد، می‌تواند تغذیه آهن را بهبود بخشد (راموس سلانو و همکاران، 2010). تحقیقات کمی در زمینه کاربرد سیلیسیک اسید به عنوان کود سیلیسیمی و اثرات آن بر قابلیت دسترسی عناصر کم‌مصرف انجام شده است. همچنین با توجه به نتایج تحقیقاتی که در بررسی اثرات مثبت سیلیسیم و باکتری‌های حل‌کننده فسفات بر رشد و عملکرد گیاهان بدست آمده و توجه به مسأله جلوگیری از مصرف بی‌رویه کودهای فسفاتی و به دنبال آن برهم خوردن تعادل بین عناصرغذایی به ویژه در خاک‌های آهکی ایران که با کمبود عناصر کم مصرف مواجه هستند، بررسی اثرات متقابل سیلیسیم و باکتری بر قابلیت دسترسی عناصر کم‌مصرف، ضروری می‌باشد. لذا این تحقیق با هدف بررسی اثرات سیلیسیک اسید و باکتری-

های حل‌کننده فسفات بر مقدار جذب عناصرغذایی کم-مصرف توسط محصول استراتژیک گندم در خاک آهکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه موسسه تحقیقات خاک و آب اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل چهار سطح سیلیسیم (صفر، 150، 300 و 600 میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک) از منبع اسید سیلیسیک (H_4SiO_4) و سه سطح (نوع) باکتری حل‌کننده فسفات (عدم تلقیح باکتری، *باسیلوس* و *سودوموناس*) بود. خاک آهکی با مقدار فسفر قابل جذب زیر سطح بحرانی (5/5 میلی‌گرم بر کیلوگرم) از مزرعه موسسه تحقیقات خاک و آب واقع در کرج و از عمق سطحی (30-0 سانتی‌متری) نمونه‌برداری شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مطابق روش‌های متداول آزمایشگاهی تعیین گردید و برای اندازه‌گیری غلظت سیلیسیم قابل جذب در خاک از روش (نارایاناسومی و پراکاش، 2009) استفاده شد (جدول 1).

جدول 1- ویژگی‌های مهم فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

کلاس بافت خاک	جمعیت باکتری	FC	pH	EC	CEC	CCE	OC	Ptotal	قابل جذب			قابل استخراج با DTPA			
									K	P	Si	Fe	Cu	Mn	Zn
	CFU/ml	%		dS/m	cmolc/kg	%	%	mg/kg	mg/kg						
لوم رسی	3×10^3	22/7	7/8	1/03	14/52	10/96	0/60	1186	258	5/5	34/22	4/51	1/12	8/05	0/93

گلدان‌های سه کیلوگرمی با دو منفذ برای زهکش تهیه گردید. انتخاب سطوح و ترکیب سیلیسیم با استفاده از نتایج تحقیقات گذشته انجام شد (صالح و همکاران، 2018؛ مالمیر و همکاران، 1396). قبل از کشت گیاه، تیمار سیلیسیک اسید (به صورت تجاری و ساخت کشور آلمان تهیه شد) طی یک مرحله به صورت محلول به خاک گلدان‌ها اعمال شد به گونه‌ای که با خاک داخل هر گلدان، به خوبی مخلوط گردد. بذر گندم با نام علمی (*Triticum*) رقم سیروان، از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر تهیه شد. بعد از ضدعفونی بذرها و انجام تست جوانه‌زنی، تعداد چهار جوانه درون گلدان‌ها کشت شد. باکتری *Bacillus simplex* UT1 و باکتری *Pseudomonas sp.* FA1 از گروه بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک دانشگاه تهران فراهم شد و به‌عنوان باکتری‌های محرک رشد گیاه (جدا شده از ریزوسفر گیاه گندم) استفاده شدند. بعد از کشت بذر، به ازای هر گیاهچه، یک میلی‌لیتر مایه تلقیح باکتری تهیه شده، در سطح ریشه تیمار گردید. در طول دوره آزمایش درجه حرارت روزانه و شبانه به ترتیب 25 و 15 درجه سانتی‌گراد، دوره روشنایی، 12 ساعت روشنایی و 12 ساعت تاریکی و رطوبت نسبی 60 درصد در نظر گرفته شد. برای اطمینان از یکسان بودن شرایط، متناوبا جای تیمارها و تکرارهای مربوط به هر تیمار تعویض شد تا خطای احتمالی ناشی از تفاوت نور، دما، تبخیر، تعرق و سایر عوامل تا حد ممکن برطرف گردد. آبیاری روزانه با محلول‌غذایی هوگلند (هوگلند و آرنون، 1950) و آب مقطر به صورت وزنی انجام گرفت به طوری که 80 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای تأمین گردد. برداشت گیاه بعد از گذشت 60 روز از جوانه‌زنی، در پایان دوره رویشی و قبل از ورود به دوره زایشی انجام شد. به‌منظور تجزیه اندام هوایی گیاه و تعیین غلظت عناصر کم‌مصرف و فسفر، از روش سوزاندن خشک و هضم با هیدروکلریک‌اسید استفاده گردید (والینگ و همکاران، 1989). غلظت عناصر کم‌مصرف آهن، روی و منگنز در عصاره حاصل، توسط دستگاه جذب اتمی و غلظت فسفر نیز در عصاره حاصل به روش آمونیوم‌مولیبدو وانادات (رایان و همکاران، 2007) تعیین شد. غلظت سیلیسیم گیاه با استفاده از روش رنگ‌سنجی و بر اساس ترکیب اسیدسیلیسیک و

اسیدمولیبدیک و تشکیل اسیدسیلیکومولیبدیک (کمپلکس احیاء شده آبی رنگ) (هالمارک و همکاران، 1982) اندازه‌گیری شد. مقدار کل عناصر کم‌مصرف جذب شده از طریق حاصلضرب غلظت عنصر مورد نظر در وزن خشک همان قسمت بدست آمد (گش و سینگ، 2005). کلیه محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS (9.4) مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای Duncan در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

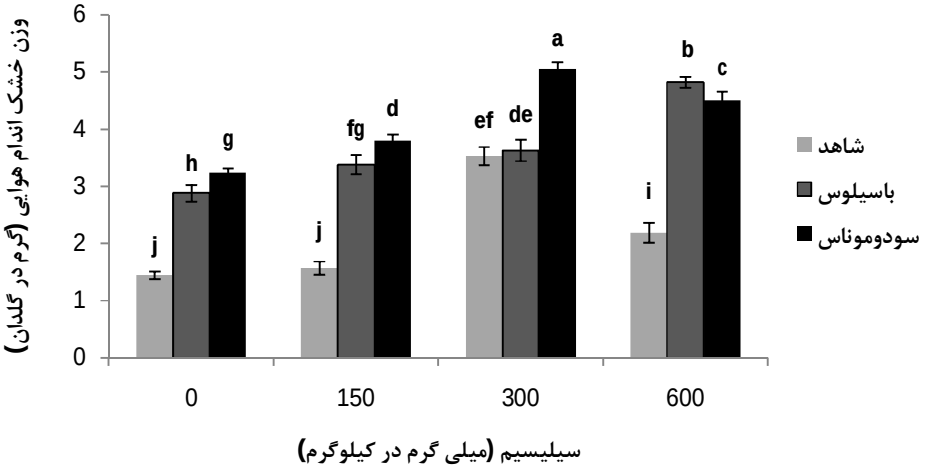
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی و متقابل تیمارهای (سیلیسیم-باکتری) بر تمام شاخص‌های اندازه‌گیری شده، معنی‌دار بود (جدول 2).

جدول 2- نتایج تجزیه واریانس اثرات اصلی و متقابل تیمارها بر مقدار شاخص‌های اندازه‌گیری شده در گندم

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		وزن خشک	غلظت سیلیسیم	غلظت فسفر	جذب روی	جذب منگنز	جذب آهن
سیلیسیم	3	4/91**	3/41**	0/026**	0/001**	0/045**	0/068**
باکتری	2	12/66**	0/207**	0/089**	0/016**	0/043**	0/084**
سیلیسیم×باکتری	6	0/883**	0/056*	0/001**	0/001**	0/005**	0/014**
خطا	24	0/018	0/001	0/00003	0/00006	0/00006	0/00008
CV (%)		4/05	3/72	2/37	5/65	4/37	4/05

*، **: به ترتیب معنی دار در سطح احتمال 5 درصد و یک درصد، ns: غیرمعنی دار

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی گندم به مقدار (5 گرم در گلدان) از تیمار (سطح 300 میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم و باکتری سودوموناس) بدست آمد (شکل 1). اثر تیمار باکتری بر وزن خشک اندام هوایی گندم، نسبت به تیمار شاهد (عدم تلقیح باکتری) برتری داشت.

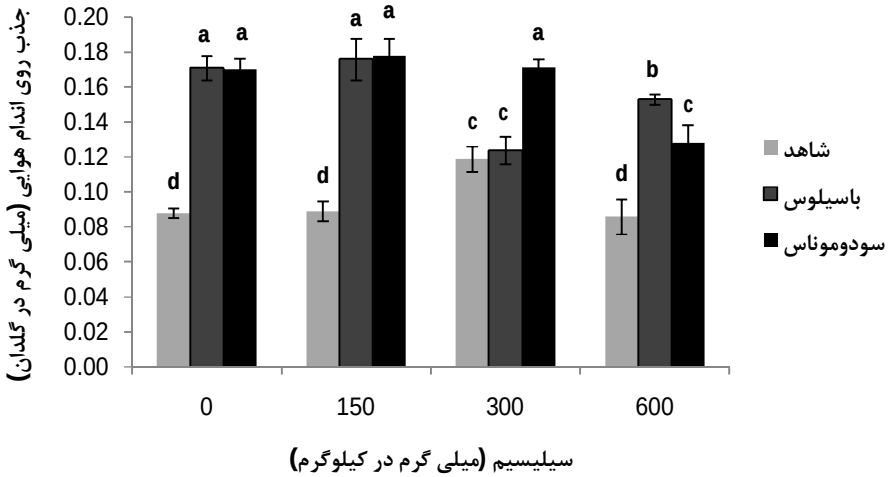


شکل 1- مقایسه میانگین اثرات دوگانه تیمارهای (سیلیسیم-باکتری) بر وزن خشک اندام هوایی گندم

نتایج تحقیقات نشان داد که کاربرد سیلیسیم از منبع سیلیکات پتاسیم (صابریان رنجبر و همکاران، 2019) و اسید سیلیسیک (کووالسکا و همکاران، 2021)، موجب افزایش بیوماس اندام هوایی گندم گردید. اثرات متقابل

کاربرد اسید سیلیسیک و باکتری‌های حل کننده فسفات (سودوموناس و باسیلوس)، موجب افزایش ماده خشک اندام هوایی و ریشه گندم در خاک آهکی شد (رضاخانی و همکاران، 1398).

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش سطوح سیلیسیم (بیشتر از 300 میلی‌گرم بر کیلوگرم)، مقدار جذب روی در اندام هوایی گندم، کاهش معنی‌داری یافت (شکل 2). بیشترین مقدار جذب روی اندام هوایی (0/18 میلی‌گرم در گلدان) از تیمار (سطح 150 میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک و باکتری سودوموناس) بدست آمد. به‌طورکلی اثر باکتری باسیلوس و سودوموناس بر مقدار جذب روی در اندام هوایی گندم، نسبت به باکتری شاهد، برتری داشت.

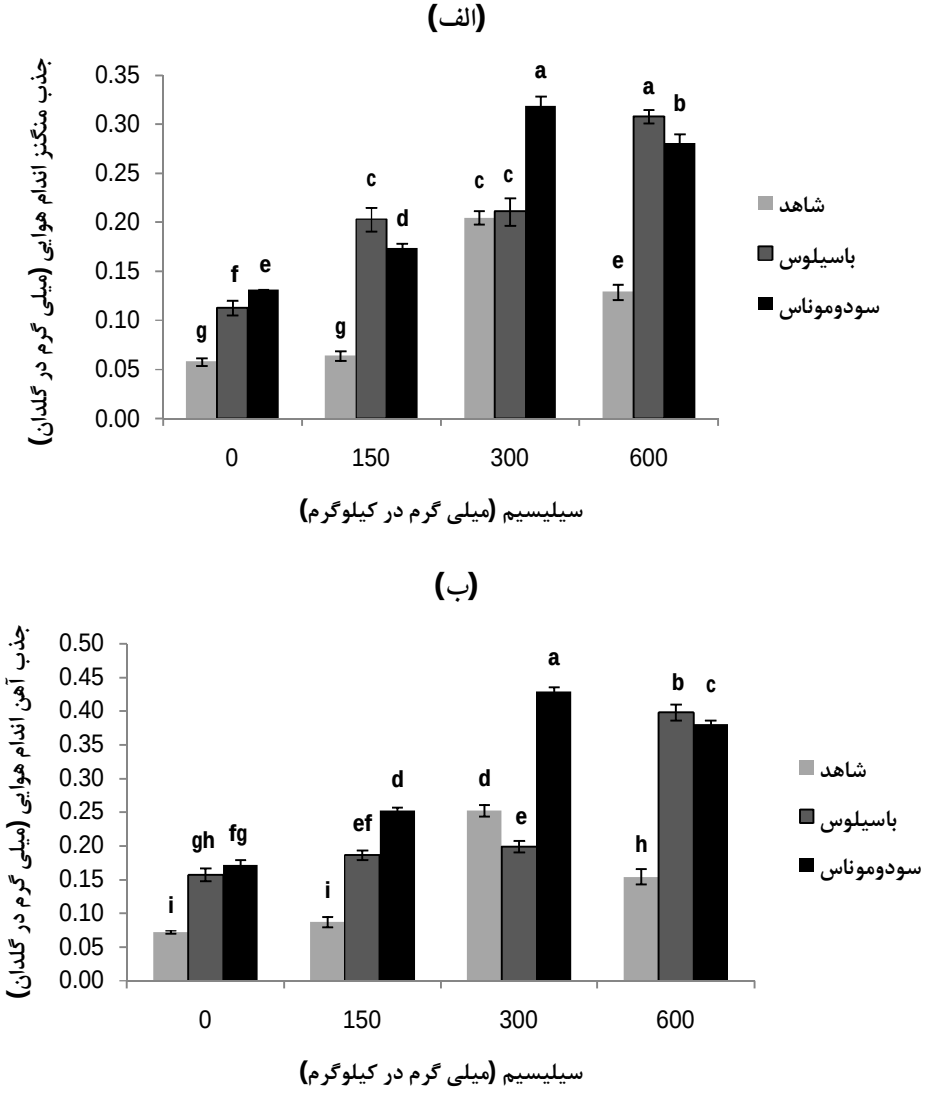


شکل 2- مقایسه میانگین اثرات دوگانه تیمارهای (سیلیسیم-باکتری) بر جذب روی اندام هوایی گندم

صالح و همکاران (1394) دریافتند که از بین تیمارهای سیلیسیم در چهار سطح (شاهد، 100، 200، 300 میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک) از منبع سیلیسیک اسید در یک خاک لوم شنی با pH 7/2، سطح 300 میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، منجر به افزایش غلظت فسفر بخش هوایی برنج شد که با توجه به برهمکنش منفی عنصر روی بر جذب فسفر، می‌توان آن را به کاهش مقدار روی قابل عصاره‌گیری در خاک در حضور سیلیسیم نسبت داد، زیرا اسید سیلیسیک اسید قادر است با روی واکنش داده و سیلیکات‌های کم‌محلول نظیر $ZnSiO_2$ و Zn_2SiO_4 تشکیل دهد (ناسیمنتو و همکاران، 2008). از طرفی (پاسکوال و همکاران، 2016) عنوان کردند زمانی که گیاه سویا، دچار کمبود روی در محیط رشد می‌شود، کاربرد سیلیسیم می‌تواند از طریق افزایش سیترات در گیاه و تغییر در توزیع روی، کمبود روی را برطرف کند. در تحقیقی (مهربان جوبانی و همکاران، 2014) نشان دادند که کاربرد سیلیکون در شرایط کمبود روی، رشد رویشی و زایشی گیاه برنج و غلظت برخی عناصر مانند فسفر و پتاسیم را افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج تحقیقات گذشته، باکتری‌های محرک رشد می‌توانند قابلیت دسترسی عناصر کم‌مصرف را از طریق کاهش pH خاک و تولید ترکیبات مختلف (از قبیل کربوکسیلات و ترکیبات فنولیک) و عوامل کلات‌کننده (ترکیبات فنولیک و اسیدهای‌آلی)، در گیاهان افزایش دهند (میرانصاری، 2013) که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. با توجه به افزایش غلظت فسفر گیاه با کاربرد سطوح بالاتر سیلیسیم (سطح 600 میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک)، این احتمال وجود دارد که اثر متقابل (سیلیسیم-باکتری) با افزایش غلظت فسفر گیاه، به‌علت برهمکنش منفی با عنصر روی، موجب کاهش جذب عنصر روی در سطوح بالاتر کاربرد سیلیسیم شده‌است. همچنین با توجه به رقابت بین عناصر کم‌مصرف در جذب توسط ریشه گیاه،

کاهش در مقدار جذب عنصر روی می‌تواند منجر به افزایش جذب آهن و منگنز گردد (بایبوردی، 2006).

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تغییرات در مقدار جذب منگنز و آهن از یک روند مشابهی پیروی کرد. به طوری که با افزایش سطوح سیلیسیم تا (سطح 300 میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم)، مقدار جذب منگنز و آهن اندام هوایی گندم با و یا بدون تلقیح باکتری، افزایش یافت (شکل 3). در تیمار باکتری باسیلوس، این افزایش در مقدار جذب منگنز و آهن اندام هوایی تا (سطح 600 میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم)، ادامه داشت. بیشترین مقدار جذب منگنز اندام هوایی (0/32 میلی‌گرم در گلدان) از تیمار (سطح 300 میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم و باکتری سودوموناس) بدست آمد که با تیمار (سطح 600 میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم و باکتری باسیلوس) از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت. بیشترین مقدار جذب آهن اندام هوایی (0/43 میلی‌گرم در گلدان) نیز از تیمار (سطح 300 میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم و باکتری سودوموناس) بدست آمد. به‌طورکلی اثر باکتری باسیلوس و سودوموناس بر مقدار جذب منگنز و آهن اندام هوایی گندم، نسبت به باکتری شاهد، برتری داشت.

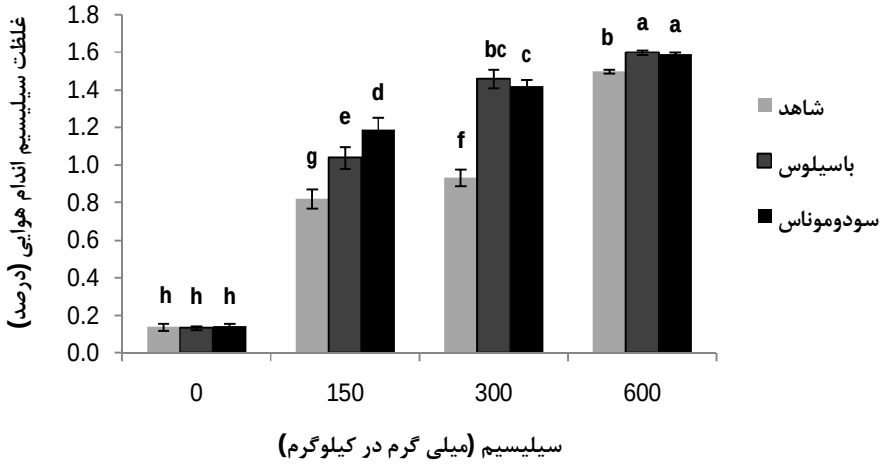


شکل 3- مقایسه میانگین اثرات دوگانه تیمارهای (سیلیسیم-باکتری) بر جذب الف) منگنز و ب) آهن اندام هوایی گندم

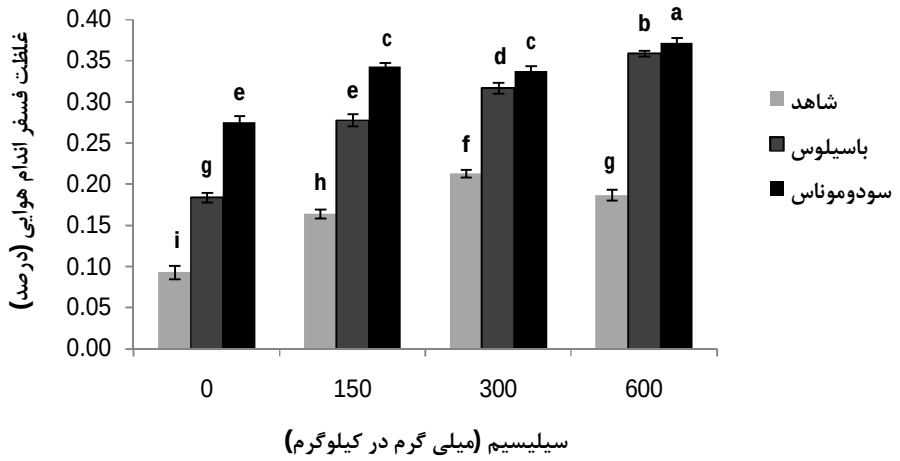
نتایج آزمـایش یوسفی و اثنی‌عشری (1396) بر روی گیاه توت فرنگی در راستای نتایج (فخت کریستوفرز و همکاران، 2007) بر گیاه لوبیا چشم بلبلی می‌باشد کـه گزارش کردند کاربرد سیلیسیم باعث افـزایش جـذب منگنـز توسط گیاه شد. لی و همکاران (1999) گزارش کردند که کاربرد سیلیسیم می‌تواند کمبود منگنز را از طریق افزایش ظرفیت اکسیداسیونی ریشه‌ها برطرف کند. همچنین سیلیسیم از طریق کاهش سمیت آهن و منگنز و آلومینیوم، موجب افزایش قابلیت دسترسی فسفر توسط گیاه می‌گردد. گزارش دیگری نیز افزایش جذب آهن توسط گیاه را با کاربرد سیلیسیم، عنوان کرد (فرشیدی و همکاران، 2012). همچنین افزودن سیلیسیم به محلول-غذایی، باعث کاهش علائم کلروز کمبود آهن در گیاه گردید (گونزالو و همکاران، 2013). با مطالعه اثر سیلیسیم بر ذرت کشت شده در محیط کشت هیدروپونیک، افزایش آهن در نتیجه کاربرد سیلیسیم گزارش شد و مشخص گردید که جذب زیاد آهن در گیاهان تیمار شده با سیلیسیم، مربوط به افزایش فعالیت کلات آهن ردااکتاز (Fe(III)-chelate reductase) FRO در ریشه می‌باشد (گوتاردی و همکاران، 2014). در تحقیق کیانی و همکاران (1393) نتایج نشان داد که کاربرد سیلیسیم احتمالاً با افزایش جذب آهن از طریق بهبود کارکرد غشاهای زیستی و افزایش تحرک آهن از طریق افزایش فنل‌ها توانست اثرات کمبود آهن و کاهش رشد ناشی از آن را در گیاه برنج کاهش دهد. البته این احتمال نیز وجود دارد که به‌علت رقابت عناصر کم‌مصرف در جذب و به-سبب کاهش جذب عنصر روی، امکان جذب بیشتر منگنز و آهن توسط گندم فراهم شده‌است.

با افزایش سطوح سیلیسیم، غلظت سیلیسیم اندام هوایی گندم افزایش یافت و این اثر در حضور باکتری تشدید شد. بیشترین غلظت سیلیسیم اندام هوایی (1/6 درصد) از کاربرد توأم (سطح 600 میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم و تلقیح باکتری باسیلوس) بدست آمد و با باکتری سودوموناس اختلاف آماری معنی‌داری نداشت. کاربرد سیلیسیم با (سطح 600 میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم به‌همراه باکتری سودوموناس)، غلظت فسفر اندام هوایی را تا سطح بهینه، به‌طور معنی‌داری افزایش داد (0/3%<) (شکل 4). تلقیح باکتری سودوموناس و باسیلوس بر افزایش غلظت سیلیسیم و فسفر اندام هوایی گندم در تمامی سطوح سیلیسیم کاربردی، نسبت به تیمار شاهد (عدم تلقیح باکتری)، برتری داشت.

(الف)



(ب)



شکل 4- مقایسه میانگین اثرات دوگانه تیمارهای (سیلیسیم-باکتری) بر الف) غلظت سیلیسیم و ب) غلظت فسفر اندام هوایی گندم

نتایج تحقیقات (ال-لبودی و همکاران، 2019) در یک خاک رسی نشان داد که با افزایش کاربرد سطوح سیلیسیم از صفر تا 400 میلی‌گرم سیلیسیم در کیلوگرم خاک، غلظت سیلیسیم اندام هوایی گندم از 3/5 میلی‌گرم بر گرم در تیمار شاهد به 7/3 میلی‌گرم بر گرم در تیمار (400 میلی‌گرم سیلیسیم در کیلوگرم خاک)، افزایش یافت. همچنین عنوان شد که کاربرد سیلیسیم موجب افزایش قابلیت دسترسی فسفر گندم شد که با نتایج این تحقیق مطابقت داشت. نتایج تحقیقات (الهایسوفی و همکاران، 2020) نشان داد که کاربرد باکتری‌های حل‌کننده فسفات، موجب افزایش قابلیت دسترسی فسفر در منطقه ریزوسفر گیاه گندم شد. به گزارش (الزوبی و جایبور، 2012) کاربرد باکتری‌های حل‌کننده فسفات مانند باسیلوس، قابلیت دسترسی فسفر را حدود 30 درصد افزایش می-دهد. رضاخانی و همکاران (1400) گزارش کردند که کاربرد ترکیبی سیلیسیم و باکتری‌های حل‌کننده فسفات (با داشتن اثرات هم‌افزایی)، در شرایط کمبود فسفرمحلول خاک آهکی، توانست فسفر مورد نیاز گندم را تا سطح بهینه فراهم کند. سیلیسیم به‌علت اثر رقابتی در جذب و نیز کمک به آزادسازی فسفرمحلول سبب افزایش جذب فسفرمحلول و آزاد شدن فسفر از فاز تبادلی به فاز محلول می‌شود، لذا کاربرد سیلیسیم جذب فسفر را می‌تواند بهبود بخشد.

نتیجه‌گیری کلی

اثرات توأم اسید سیلیسیک و باکتری‌های حل-کننده فسفات بر جذب عناصر منگنز و آهن اندام هوایی گندم و وزن خشک گندم، اثر افزایشی داشت. وزن خشک اندام هوایی گندم در اثر کاربرد توأم اسید سیلیسیک و باکتری، 3/5 برابر نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. در ارتباط با عنصر روی اثر ناهمسازی بین عناصرغذایی، موجب کاهش جذب روی در سطوح بالاتر کاربرد اسید سیلیسیک شد اما در این شرایط، گیاه با کمبود روی مواجه نشد. به طور کلی کاربرد باکتری‌های حل‌کننده فسفات، اثر سیلیسیم را در افزایش فراهمی عناصرغذایی در گیاه گندم تشدید نمود. از آنجایی که در خاک آهکی مصرف بیش از حد کود فسفاتی در جذب عناصر کم-مصرف مشکل ایجاد می‌کند، لذا کاربرد ترکیبی اسید سیلیسیک و باکتری‌های حل‌کننده فسفات می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر در فراهمی عناصر کم‌مصرف در شرایط گلخانه‌ای توصیه شود تا با ایجاد تعادل در جذب عناصرغذایی، رشد گیاه گندم را در این شرایط بهبود دهد.

فهرست منابع:

1. اعتمادیان، م.، ا. حسنی.، م. نورزاده حداد، و م. حنیفه ئی. 1396. کاربرد اسیدهای آلی و معدنی بر آزادسازی عناصر غذایی در خاک‌های آهکی. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، 24 (5): 91-73.
2. رضاخانی، ل.، ب. متشرع زاده.، م. طهرانی.، ح. اعتصامی، و ح. میرسیدحسینی. 1398. اثر سیلیسیم و باکتری‌های حل-کننده فسفات بر افزایش کارایی مصرف فسفر. شانزدهمین کنگره علوم خاک ایران، زنجان.
3. رضاخانی، ل.، ب. متشرع زاده.، م. طهرانی.، ح. اعتصامی، و ح. میرسیدحسینی. 1400. بررسی دینامیک شکل‌های شیمیایی سیلیسیم در خاک آهکی و اثر آن بر فراهمی فسفر. هفدهمین کنگره علوم خاک ایران و چهارمین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه، کرج.
4. صالح، ج.، ن. نجفی، و ش، اوستان. 1394. تأثیر مصرف سیلیسیم بر رشد، ترکیب شیمیایی و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی برنج (*Oryza sativa* L.) در شرایط شور. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی،72: 240-229.
5. کیانی، ز.، ا. عبدل زاده، و ح. ر، صادقی پور. 1393. تحریک رشد، افزایش آهن، پتاسیم و ترکیبات دیواره سلولی با کاربرد سیلیسیم در گیاه برنج تحت شرایط کمبود آهن. نشریه پژوهش‌های زراعی ایران، 12(1): 72-65.
6. مالمیر، ر.، ب. متشرع‌زاده، و ل. تبریزی. 1396. تأثیر کاربرد منابع مختلف سیلیسیم بر محتوای عناصرغذایی فسفر، پتاسیم و سیلیسیم گیاه استویا (*Stevia rebaudiana Bertoni*). پانزدهمین کنگره علوم خاک ایران. شهریور 1396. اصفهان. ایران.
7. یوسفی، ر.، و م. اثنی عشری. 1396. تأثیر میکرو و نانوذرات سیلیسیم بر غظت عناصر پرمصرف، کم‌مصرف و میزان سیلیسیم گیاه توت‌فرنگی در شرایط کشت بدون خاک. نشریه علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای، 8 (1): 70-57.
8. Alzoubi, M. M., Gaibore, M. 2012. The effect of phosphate solubilizing bacteria and organic fertilization on availability of syrian rock phosphate and increase of triple superphosphate efficiency. World J. Agric. Sci, 8: 473–478, doi: 10.5829/idosi.wjas. 2012.8.5.1668
9. Baybordi, A. 2006. Zinc in soils and crop nutrition. Paivar press. Tabriz, Iran. 180 pp. (In Persian).
10. Bityutskii, N., Pavlovic, J., Yakkonen, K., Maksimović, V., Nikolic, M. 2014. Contrasting effect of silicon on iron, zinc and manganese status and accumulation of meta mobilizing compounds in micronutrient-deficient cucumber. Plant Physiology and Biochemistry. 74: 205-211.
11. Dutta, S. and Podile, A. R. 2010. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): the bugs to debug the root zone. Critical Reviews in Microbiology. 36: 232-244.
12. Elhaissoufi, W., Khourchi, S., Ibnyasser, A., Ghoulam, Ch., Rchiad, Z., Zeroual, Y., Lyamlouli, K., and Bargaz, A. 2020. Phosphate solubilizing rhizobacteria could have a stronger influence on wheat root traits and aboveground physiology than rhizosphere P solubilization. Frontiers in plant science, doi: 10.3389/fpls.2020.00979
13. El-Leboudi, S., El-Sebaay, A. S., Hassan Abd Elrahman, Sh., Wafaa, M., Saad, H. Y. 2019. Effect of silicon and phosphorus additions and their interactions on wheat plants grown on a clay soil. Asian Soil Research Journal, 2(1): 1-10.
14. Elrahman, S.H.A., Mostafa, M.A.M., Taha, T.A., Elsharawy, M.A.O., and Eid, M.A. 2012. Effect of different amendments on soil chemical characteristics, grain yield and elemental content of wheat plants grown on salt-affected soil irrigated with low quality water. Annals of Agricultural Sciences. 57: 2. 175-182.
15. Etesami, H. and Jeong, B. R. 2018. Silicon (Si) review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. Ecotoxicology and Environmental Safety. 147(Supplement C): 881-896.

16. Farshidi, M., Abdolzadeh, A., Sadeghipour, H. R. 2012. Silicon nutrition alleviates physiological disorders imposed by salinity in hydroponically grown canola (*Brassica napus* L.) plants. Acta Physiologiae Plantarum. 34: 1779-1788.
17. Fecht-Christoffers, M.M., P. Maier, K. Iwasaki, H.P. Braun and W.J. Horst. 2007. The Role of the leaf apoplast in manganese toxicity and tolerance in cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp). PP. 307-321. In: Sattelmache, B. and W.J. Horst (Eds.), The Apoplast of Higher Plants: Compartment of Storage, Transport and Reactions, Springer, The Netherlands.
18. Gonzalo, M. J., Lucena, J. J., Hernández-Apaolaza, L. 2013. Effect of silicon addition on soybean and cucumber plants grown under iron deficiency. Plant Physiology and Biochemistry. 70: 455-461.
19. Gottardi, S., Iacuzzo, F., Tomasi, N., Cortella, G., Manzocco, L., Pinton, R., Romheld, V., Mimmoe, T., Scampicchio, M., Costa, L. D., Cesco, S. 2014. Beneficial effects of silicon on hydroponically grown corn salad (*Valerianella locusta* (L.) Laterr) plants. Plant Physiology and Biochemistry. 56: 14-23.
20. Greger, M., Landberg, T., Vaculík, M. 2018. Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. Plants, 7:41.
21. Guntzer, F., Keller, C., Meunier, J. D. 2012. Benefits of plant silicon for crops: areview. Agron. Sustain. Dev. 32: 201-213.
22. Hallmark, C. T., Wilding, L. P., Smeck, N. E. 1982. Silicon. In: Page, A. L., Miller, R. H., Keeney, D. R, editors. Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties, Agronomy monograph no. 9. 2nd ed. Madison: The America Society of Agronomy and Soil Science. P. 263-73.
23. Hoagland, D. R. and Arnon, D. I. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. Circ. Calif. Agric. Exp. Station 347.
24. Kostic, L., Nikolic, N., Bosnic, D., Samardzic, J., Nikolic, M. 2017. Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions. Plant Soil. 419: 447-455.
25. Kowalska, J., Tyburski, J., Jakubowska, M., Krzymińska, J. 2021. Effect of different forms of silicon on growth of spring wheat cultivated in organic farming system. Silicon, 13(1): 211–217. https:// doi.org/10.1007/s12633-020-00414-4
26. Li, Y., Alva, A., Sumner, M. 1999. Response of cotton cultivars to aluminum in solutions with varying silicon concentrations. Journal of Plant Nutrition. 12(7): 881-892.
27. Lux, A., Luxova, M., Abe, J., Tanimoto, E., Hattori, T., Inanaga, S. 2003. The dynamics of silicon deposition in the sorghum root endodermis. New Phytol. 158: 437-441.
28. Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, London.
29. Miransari, M. 2013. Soil microbes and the availability of soil nutrients. Acta Physiol. Plant. 35: 3075-3084.
30. Narayanaswamy, C. and Prakash, N. 2009. Calibration and categorization of plant available silicon in rice soils of south India. Journal of Plant Nutrition. 32(8): 1237-1254.
31. Nascimento, C. W. A., Cunha, P. K. V., Silva, A. J. 2008. Silicon alleviates the toxicity of cadmium and zinc inmaize (Zea mays L.) grown on a contaminated soil. J. Plant Nutr. Soil Sci. 171: 849-853.
32. Olanrewaju, O. S., Glick, B. R., Babalola, O. O. 2017. Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. World J. Microbiol. Biotechnol. 33: 197.
33. Pascual, M. B., Echevarria, V., Gonzalo, M. J., Hernández-Apaolaza, L. 2016. Silico addition to soybean (Glycine max L.) plants alleviate zinc deficiency. Plant Physiol. Biochem. 108: 132-138.
34. Pavlovic, J., Samardzic, J., Maksimovic, V., Timotijevic, G., Stevic, N., Laursen, K. H., Hansen, T. H., Husted, S., Schjoerring, J. K. Liang, Y., Nikolic, M. 2013. Silicon

alleviates iron deficiency in cucumber by promoting mobilization of iron in the root apoplast. New Phytol. 198(4): 1096-1107.
35. Ramos-Solano, B., García, J. A. L., Garcia-Villaraco, A., Algar, E., Garcia-Cristobal, J., Mañero, F. J. G. 2010. Siderophore and chitinase producing isolates from the rhizosphere of Nicotiana glauca Graham enhance growth and induce systemic resistance in Solanum lycopersicum L. Plant Soil. 334: 189-197.
36. Rayan, J., Estefan, G., Rashid, A. 2007. Soil and plant analysis laboratory manual. ICARDA.
37. Rezakhani, L., Motesharezadeh, B., Tehrani, M. M., Etesami, H., Mirseyed Hosseini, H. 2019. Phosphate–solubilizing bacteria and silicon synergistically augment phosphorus (P) uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.) plant fertilized with soluble or insoluble P source. Ecotoxicology and Environmental Safety, 173:504-513. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.060
38. Rezakhani, L., Motesharezadeh, B., Tehrani, M. M., Etesami, H., Mirseyed Hosseini, H. 2020. Effect of Silicon and Phosphate-Solubilizing Bacteria on Improved Phosphorus (P) Uptake Is Not Specific to Insoluble P- Fertilized Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) Plants. Journal of Plant Growth Regulation, 39 (1): 239-253. doi:10.1007/s00344-019-09978-x
39. Saberian Ranjbar, S., Motesharezadeh, B., Moshiri, F., Mirseyed Hosseini, H., Alikhani, H. A. 2019. Silicon utilization efficiency of different wheat cultivars in a calcareous soil. Journal of Silicon, doi.org/10.1007/s12633-018-0038-3
40. Saleh, J., Najafi, N., Oustan., S. h, Ghasemi-Golezani, K., Aliasghrzad, N. (2018). Silicon affects rice growth, superoxide dismutase activity and concentrations of chlorophyll and proline under different levels and sources of soil salinity. Journal of Silicon. doi.org/10.1007/s12633-018-0057-0.
41. Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., Gobi, T. A. 2013. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. SpringerPlus, 2: 587.
42. Shi, Y., Wang, Y., Flowers, T. J., Gong, H. 2013. Silicon decreases chloride transport in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions. Journal of Plant Physiology. 170(9): 847-853.
43. Sinclair, S. A. and Krämer, U. 2012. The zinc homeostasis network of land plants. Biochim. Et. Biophys. Acta (BBA) Mol. Cell Res. 1823: 1553-1567.
44. Sonobe, K., Hattori, T., An, P., Tsuji, W., Eneji, A. E., Kobayashi, S., Kawamura, Y., Tanaka, K., Inanaga, S. 2011. Effect of Si application on sorghum root responses to water stress. Journal of Plant Nutrition. 34: 71–82.
45. Tavakkoli, E., Lyons, G., English, P., Guppy, C. N. 2011. Silicon nutrition of rice is affected by soil pH, weathering and silicon fertilisation. Journal of Plant Nutrition. Soil Science. 174: 437-446.
46. Tian, G. and Kolawole, G. O. 2004. Comparison of various plant residues as phosphate rock amendment on Savanna Soils of West Africa. Journal of Plant Nutrition. 27(4): 571-583.
47. Waling, I., Van Vark, W., Houba, V., Vanderlee, J. 1989. Soil and plant analysis, a series of syllabi. Part. 7: 250.
48. You-Qiang, F. U., Hong, S., Dao-Ming, W. U., Kun-Zheng, C. A. I. 2012. Silicon-mediated amelioration of Fe^{2+} toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) roots. Pedosphere. 22: 795-802.
49. Zargar, S. M., Mahajan, R., Bhat, J., Nazir, M and Deshmukh, R. 2019. Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system. Journal of Biotech, 9 (3): 73.

Effect of Silicic Acid and Phosphate Solubilizing Bacteria on the Availability of Micro Nutrients

L. Rezakhani[1], B. Motesharezadeh, M. M. Tehrani, H. Etesami, and H. Mirseyed Hosseini

Researcher, Department of Soil Fertility and Plant Nutrition, Soil and Water Research Institute, Iran; E-mail: leila.rezakhani@yahoo.com

Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Iran; E-mail: moteshare@ut.ac.ir

Assistant Professor, Department of Soil Fertility and Plant Nutrition, Soil and Water Research Institute, Iran; E-mail: mtehrani2000@yahoo.com

Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Iran; E-mail: hassanetesami@ut.ac.ir

Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Iran; E-mail: mirseyed@ut.ac.ir

Received: December, 2021, and Accepted: May, 2022

Abstract

Considering that most of the calcareous soils of Iran are deficient in one or more micronutrients, optimal nutrition of nutrients such as silicon under the influence of biological treatments can be highly effective in these conditions. Therefore, this study was conducted to investigate the effects of silicon and phosphate-soluble bacteria on the availability of micronutrients for wheat. We used a completely randomized design in three replications and treatments included 0, 150, 300, 600 mg/kg silicon from a source of silicic acid and three levels of bacteria (non-inoculation of bacteria, *Bacillus* and *Pseudomonas*). The study was conducted in the greenhouse of Soil and Water Research Institute. The results showed that the combined use of silicon and phosphate-solubilizing bacteria increased the uptake of manganese and iron compared to the control treatment. However, the antagonistic effect between nutrients reduced zinc uptake at higher levels of functional silicon. The effect of inoculation with *Bacillus* and *Pseudomonas* on the amount of zinc, manganese and iron uptake by wheat was superior to the control bacterium. On the other hand, application of silicon (600 mg silicon/kg soil with Pseudomonas bacteria) significantly increased the concentration of phosphorus in wheat to the optimum level. Since excessive use of phosphate fertilizer in calcareous soil reduces absorption of micro nutrients, the combined use of silicic acid and phosphate-soluble bacteria can be recommended as an effective method for increasing availability of micro nutrients in greenhouse conditions.

Keywords: Silicon; Growth-promoting bacteria; Uptake of nutrients; Wheat; Calcareous soil

[1]. Corresponding author: Department of Soil Fertility and Plant Nutrition, Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran.