Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

A review of a decade research conducted in the Department of Soil Science, University of Tehran in the field of soil silicon chemistry and its role in plant nutrition

Babak Motesharezadeh[✉1], Nasim Azam[2]

1. Corresponding Author, Department of Soil Science Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: moteshare@ut.ac.ir
2. Department of Soil Science Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: nasim.azam75@gmail.com

Article Info

Article type: Review Article

Article history:

Received: Oct. 2, 2021

Revised: June. 23, 2022

Accepted: June. 26, 2022

Published online: Aug. 23, 2022

Keywords:
Silicon,
Plant nutrition,
heavy metals,
Si efficiency

ABSTRACT

In modern agriculture, silicon (Si) is considered as an essential and anti-stress nutrient for a number of plants, especially grasses and C4. There are arguments confirming that it is a quasi-essential element in relation to plants growth, development and reproduction. The present study aims to review a decade research in the field of chemistry and plant nutrition of the Si in soil and plants in the Department of Soil Science and Engineering, University of Tehran. The objectives of this article is to present the most important achievements of researches in the field of Si efficiency of maize and soybean cultivars and to investigate the effect of Si application on nutritional, physiological and morphological characteristics of different plants including wheat, corn, sorghum, etc. under stress conditions and also to assess the effect of Si application on immobilization of heavy metals in the soil. General conclusions of this study show that Si supplied by both chemical fertilizers and silicon-soluble bacteria, increase plant growth and yield via increasing the root system of plants, regulating the biosynthesis of plant hormones, stimulating the production of some antioxidant enzymes, increasing resistance to salinity/ drought/heavy metal toxicity stresses and also increasing plant accessibility to some nutrients such as phosphorus and nitrogen. In addition to these results, the fraction of Si in different soils have been studied and analyzed. It seems by focusing on researches done on this element in the "soil, plant and rhizosphere", it can be hopefull that these results will be more practical in the future of the country's agriculture.

Cite this article: Motesharezadeh, B., & Azam, N. (2022). A review of a decade research conducted in the Department of Soil Science, University of Tehran in the field of soil silicon chemistry and its role in plant nutrition. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (5), 1447-1466.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ijswr.2022.331621.669089

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۳، شماره ۶ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

مروری بر یک دهه تحقیقات انجام‌شده در گروه علوم خاک دانشگاه تهران در زمینه شیمی سیلیسیم در خاک و نقش آن در تغذیه گیاه

بابک متشرع‌زاده✉[۱]، نسیم اعظم[۲]

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ایمیل: moteshare@ut.ac.ir

۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج ، ایران. ایمیل: nasim.azam75@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ مروری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۱۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۴/۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۴/۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۶/۱

واژه‌های کلیدی:
سیلیسیم،
تغذیه گیاه،
فلزات سنگین،
سیلیسیم‌کارایی.

چکیده

در کشاورزی امروزی، سیلیسیم به‌عنوان یک عنصر غذایی پرمصرف ضروری و ضد تنش برای تعدادی از گیاهان به خصوص گرامینه‌ها و C_4 در نظر گرفته شده‌است و استدلالی بر شبه ضروری بودن آن در ارتباط با رشد، توسعه و تولیدمثل در آن‌ها وجود دارد. این پژوهش با هدف مرور یک دهه تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی شیمی و تغذیه ی گیاهی عنصر سیلیسیم در خاک و گیاه در گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران تهیه شده‌است و برآن است تا ضمن مرور مهمترین دستاوردهای این پژوهش‌ها در حوزه سیلیسیم کارایی ارقام ذرت، سویا، به تأثیر کاربرد سیلیسیم بر خصوصیات تغذیه‌ای، فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی گیاهان مختلف اعم از گندم و ذرت و سورگوم و ... در شرایط تنش و نیز تأثیر کاربرد سیلیسیم در غیر متحرک ساختن فلزات سنگین بپردازد. نتایج کلی این مطالعه نشان می‌دهد سیلیسیم هم به صورت کودهای شیمیایی سیلیسیمی و نیز باکتری‌های حل‌کننده سیلیسیم، موجب افزایش سیستم ریشه‌ای گیاهان، تنظیم بیوسنتز هورمون‌های گیاهی، تحریک تولید برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت، افزایش مقاومت به تنش‌های شوری، خشکی و مقاومت به سمیت فلزات سنگین، افزایش رشد و عملکرد گیاه و افزایش قابلیت دسترسی گیاه به برخی عناصرغذایی نظیر فسفر و نیتروژن می‌گردد. در کنار این نتایج، فرکشن و جزء بندی سیلیسیم نیز در خاک‌های مختلف مورد تحقیق و تحلیل قرار گرفته‌است. به نظر می‌رسد با تمرکز بر تحقیقات این عنصر با محوریت "خاک، گیاه و ریزوسفر" می‌توان به کاربردی‌تر شدن نتایج آن در آینده کشاورزی کشور امیدوار بود.

استناد: متشرع‌زاده، بابک؛ اعظم، نسیم (۱۴۰۱). مروری بر یک دهه تحقیقات انجام‌شده در گروه علوم خاک دانشگاه تهران در زمینه شیمی سیلیسیم در خاک و نقش آن در تغذیه گیاه. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۶)، ۱۴۶۶- ۱۴۴۷.

DOI: http//doi.org/ 10.22059/ijswr.2022.331621.669089

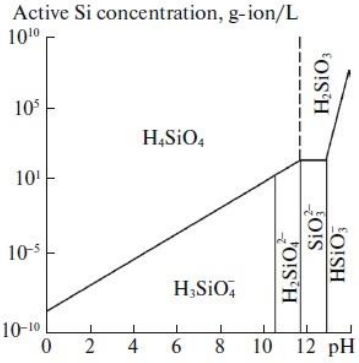
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

مقدمه

شیمی سیلیسیم

عنصر سیلیسیم با عدد اتمی ۱۴ به عنوان دومین عنصر فراوان بعد از اکسیژن در پوسته زمین است (Sposito, 2008). این عنصر بیش از ۵۰ درصد ترکیب خاک را (به شکل دی اکسید سیلیسیم) تشکیل می‌دهد. غلظت سیلیسیم در محلول خاک از ۰/۰۱ تا ۱/۹۹ میلی‌مول بر لیتر و مقدار آن در گیاه (Karathanasis, 2002)، از ۰/۲ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در هر گرم وزن خشک گزارش شده‌است (Mengel & Kirkby, 2001). عنصر سیلیسیم یکی از اجزای اصلی خاک محسوب می‌شود که طی سیر تکاملی ممکن است از خاک شسته شود، بازتوزیع شود و یا در خاک تجمع یابد. اگرچه سیلیسیم در خاک فراوان است و مقدار آن تا ۴۵ درصد وزنی نیز گزارش شده‌است (Sommer et al., 2006)، اما به‌دلیل پیوند قوی سیلیسیم با اکسیژن، حلالیت ترکیبات سیلیسیمی به شدت پایین است به‌طوری‌که سیلیسیم در خاک همیشه به شکل سیلیکات و در پیوند با سایر عناصر فلزی وجود دارد و نمی‌تواند به‌طور مستقیم توسط گیاهان جذب شود. بیشتر سیلیسیم در خاک شامل سیلیسیم موجود در فاز جامد است که در ساختمان کانی‌های رسی و سیلیکات‌های بی‌شکل یافت می‌شود و مهم‌ترین منبع اولیه تأمین سیلیسیم مورد نیاز گیاه می‌باشد که از طریق تبادل لیگاندی یا نفوذ آنیونی، جذب سطحی شده‌است و فوری‌ترین منبع تأمین سیلیسیم محلول خاک به حساب می‌آید (Ranganathan et al., 2006). سیلیسیم در محلول خاک به شکل مونوسیلیسیک اسید یا آنیون اسید توسط گیاه جذب (Mitani & Ma, 2005) می‌شود. ویژگی‌های جذب و واجذب سیلیسیم در خاک ظرفیت نگهداری آن‌را کنترل کرده و غلظت سیلیسیم موجود در محلول خاک را بین ۰/۱ تا ۰/۶ میلی‌مولار، در pHهای معمول (۱ تا ۹) حفظ می‌کند (Ma & Yamaji, 2006). سیلیسیم محلول در خاک تحت‌تأثیر pH می‌باشد (شکل ۱)، به‌طوری‌که در pH زیر ۸ سیلیسیم به‌شکل مولکول سیلیسیک اسید تفکیک نشده با فرمول H_4SiO_4 و در pHهای بالا، به شکل سیلیکات‌های تفکیک شده با بار منفی وجود دارد. با توجه به این موضوع در بیشتر خاک‌ها سیلیسیم به شکل مولکول غیرباردار در نظر گرفته می‌شود، که شکل معمول جذبی سیلیسیم توسط گیاهان است و توسط عواملی مانند pH خاک، شرایط آب خاک، حضور کاتیون‌ها و ترکیبات آلی تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد (Changmei et al., 2002).



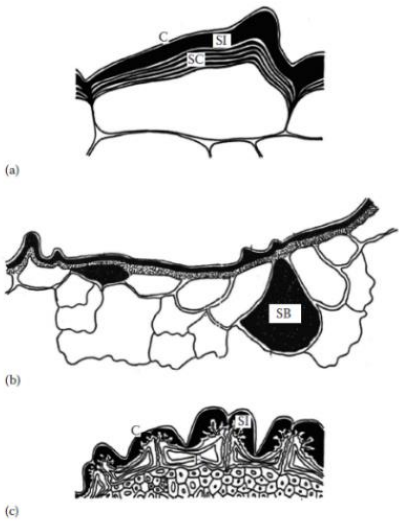
شکل ۱- اشکال مختلف سیلیسیک اسید در محلول‌های آبی طبیعی (Matychenkov et al., 2016)

سیلیسیم در گیاه

تمامی گیاهانی که در خاک می‌رویند در بافت‌های خود دارای سیلیسیم می‌باشند اما تفاوت گسترده‌ای در مقدار سیلیسیم در بین گونه‌ها و ژنوتیپ‌های مختلف گیاهان وجود دارد (Ma & Takahashi, 2002). تجزیه بافت انواع مختلف گیاهان نشان داد که غلظت سیلیسیم بسته به نوع گیاه، از ۱ تا ۱۰۰ گرم سیلیسیم در هر کیلوگرم وزن خشک است (Epstein, 1999). مقایسه این مقادیر با عناصری مانند فسفر، نیتروژن، کلسیم و سایر عناصر نشان می‌دهد که سیلیسیم در مقادیر معادل عناصر پرمصرف در گیاهان وجود دارد (Ma & Takahashi, 2002). گیاهان به‌طور متوسط، ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم سیلیسیم در هر هکتار جذب می‌کنند که چنین مقداری نمی‌تواند توسط جذب غیرفعال (مانند انتشار یا جریان توده‌ای) به‌طور کامل توضیح داده شود، زیرا لایه ۲۰ سانتی‌متر بالایی خاک به‌طور متوسط حاوی ۰/۱ تا ۱/۶ کیلوگرم سیلسیم در هر هکتار به صورت مونوسلیسیک اسید می‌باشد (Matichenkov et al., 2000).

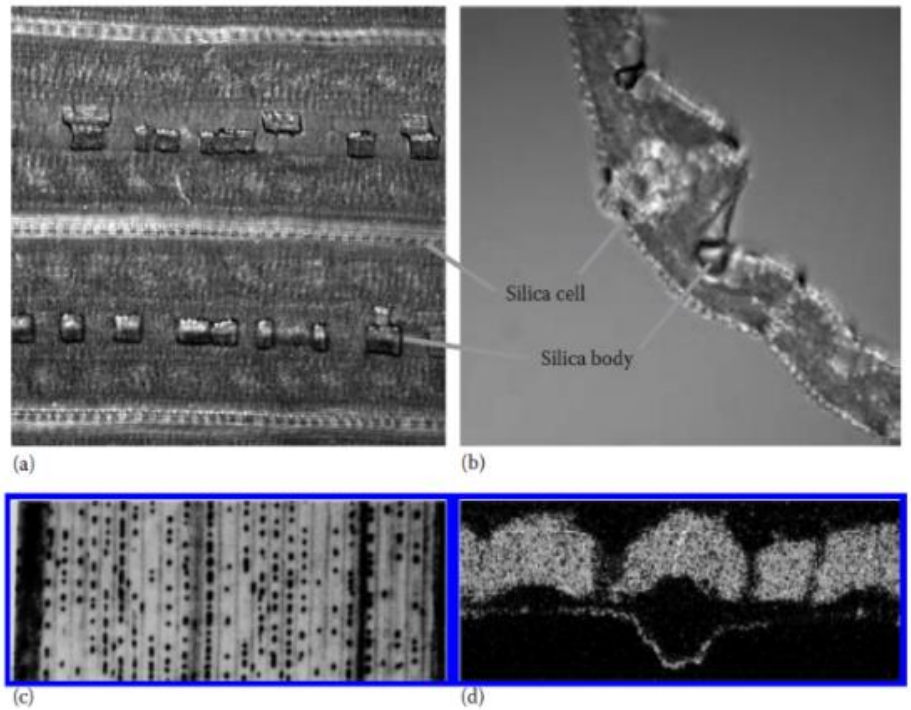
فرایند جذب و انتقال سیلیسیم در گیاه می‌تواند به صورت فعال، غیرفعال و ردشونده (جذب انتخابی) طبقه‌بندی شوند. از این‌رو گیاهان می‌توانند به عنوان انباشت‌گر زیاد، متوسط یا غیر انباشت‌گر سیلیسیم دسته‌بندی شوند (Mitani & Ma, 2005). گیاهانی که دارای جذب فعال هستند، جذب سیلیسیم در آن‌ها سریع‌تر از جذب آب صورت می‌گیرد، درنتیجه به‌طور متوسط باعث رقیق‌شدن سیلیسیم در محلول

خاک می‌گردند و گیاهانی که دارای جذب غیرفعال هستند نسبت جذب سیلیسیم در آن‌ها با آب مشابه است، بنابراین تغییر معناداری در غلظت سیلیسیم در محلول خاک قابل مشاهده نیست. در مقابل گیاهانی می‌باشند که دارای جذب انتخابی بوده و تمایلی به جذب سیلیسیم ندارند که توسط غلظت بالای سیلیسیم در محلول خاک قابل اثبات است. سیلیسیک اسید پس از جذب از طریق آوند چوبی به شاخساره منتقل می‌شود، به‌طوری‌که بالاترین غلظت سیلیسیم در گیاهان در نواحی اصلی تعرق و بیشتر در لایه‌های خارجی و موقعیت‌های بالاتر در گیاه توزیع می‌شود (Raven, 2003). اگرچه غلظت سیلیسیم در یک شاخساره مشخص نمایان‌گر نرخ تعرق آن می‌باشد اما نشانه‌های سیلیسیمی که در غلاف برگ و نواحی میان‌برگی برگ در برنج با استفاده از میکروسکوپ اشعه ایکس تشخیص داده‌شد، نشان می‌دهد که علاوه بر تعرق گیاهان ممکن است مکانیسم خاصی برای تنظیم پخش سیلیسیم داشته‌باشند (Isa et al., 2010). اگرچه اطلاعات کمی در مورد مکانیسم‌های مانع از ترکیب و ترسیب‌شدن سیلیسیک اسید در آوند چوبی وجود دارد، اما با توجه به ویژگی‌های سیلیسیک اسید که در غلظت بالای ۲ میلی‌مولار و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد شروع به تشکیل پلیمر می‌کند، اگر سیلیسیک اسید در جریان جابجایی در شاخساره به همراه جریان تعرق، آب از دست دهد (به دلیل تغلیظ آن) جریان پلیمریزه‌شدن سیلیسیک اسید اتفاق می‌افتد. فرآیند پلیمریزاسیون شامل تبدیل سیلیسیک اسید به سیلیسیک اسید کلوئیدی و در نهایت به سیلیکاژل است که منجر به ذخیره سیلیسیم پلیمرشده در کوتیکول و سلول‌های ویژه گیاه می‌گردد (Ma & Takahashi, 2002). هنگامی‌که غلظت سیلیسیم در شکل کلوییدی به همراه سیلیسیک اسید حدود ۱۴۰ تا ۲۳۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم و به عبارتی بیش از ۹۰ درصد سیلیسیم کل موجود در اندام‌هوایی گیاه انباشت‌کننده باشد، سیلیسیم به انواع مختلف فیتولیت‌ها یا ساختارهای سیلیسیمی– سلولزی که به‌صورت سیلیسیم بی‌شکل درمی‌آید، تبدیل می‌شود و به شکل سیلیکاژل در ساختار بروز می‌نماید (Yoshida, 1965).



شکل ۲- رسوب سیلیسیم در بافت¬های مختلف برنج: دو لایه کوتیکول سیلیکا در تیغه برگ (الف)، سلول‌های سیلیسی شده (ب)، دو لایه کوتیکول سیلیکا در بدنه دانه برنج (ج). منطقه سیاه شده نشان‌دهنده موقعیت رسوب سیلیسیم است. C: کوتیکول، SI: لایه سیلیکا،E : اپیدرم، SC: غشای سلولز سیلیکا، SB: اندام سیلیکایی (Yoshida, 1965).

به‌طورکلی دو نوع ساختار سیلیکاتیک به صورت سلول سیلیکا و اندام سیلیکا در گیاهان مشاهده می‌شود. سلول‌های سیلیکا در دستجات آوندی و به‌شکل دمبلی حضور دارند، درحالی‌که اندام‌های سیلیکا در سلول‌های بولیفرم برگ‌ها مشاهده می‌شوند. زمانی‌که غلظت سیلیسیم شاخساره به کمتر از ۵ درصد سیلیسیم کل می‌رسد سلول‌های سیلیکا تشکیل می‌شود اما با افزایش غلظت سیلیسیم، اندام سیلیکایی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی فرایند سیلیسیمی‌شدن در سلول‌های اپیدرمی با تغییر شکل سلول‌های سیلیکا به اندام‌های سیلیکا می‌باشد (Ma & Takahashi, 2002). بنابراین تغییر در تغذیه سیلیسیمی گیاه بر شکل فیتولیت تأثیرگذار است (Dobrovolsky et al., 1988).



شکل ۳- تجمع سیلیسیم در تیغه برگ برنج. سلول سیلیکا و اندام سیلیکایی (الف و ب)، اندام سیلیکایی تشخیص داده‌شده توسط اشعه ایکس (ج)، رسوب سیلیسیم بر روی سلول‌های اپیدرمی تشخیص داده‌شده توسط SEM-EDX (د) (Ma & Takahashi, 2002)

اثرات مفید و شبه ضروری تغذیه سیلیسیم بر گیاه

اگرچه عنصر سیلیسیم در تحقیقات قبلی به عنوان یک عنصر ضروری برای رشد بیشتر گیاهان شناخته نشده بود، با این‌حال اثرات سودمند آن در ارقام مختلف گونه‌های گیاهی و نقش بسیار مهم آن در افزایش مقاومت در برابر انواع تنش‌های زنده و غیرزنده شامل بیماری‌ها، آفات، زیستگاه و تغذیه نامتعادل به اثبات رسیده‌است (Ma et al., 2004). بیشتر این اثرات سودمند به ذخیره‌شدن سیلیسیم در سلول‌های دیواره‌ی ریشه‌ها، برگ‌ها، ساقه‌ها، سبوس و غلاف در گیاهان نسبت داده شده‌است. این ذخایر درواقع نقش یک مانع فیزیولوژیکی را داشته به‌طوری که سیلیسیم با تجمع در بافت‌های گیاهی می‌تواند به صورت مکانیکی در کنترل بیماری‌های ناشی از قارچ و باکتری در گونه‌های مختلف گیاهی موثر و از فرایند آلودگی جلوگیری‌کند، بدین‌ترتیب سیلیسیم باعث افزایش مقاومت میزبان به پاتوژن‌ها می‌شود (Rodrigues et al., 2004). همچنین ذخیره‌شدن سیلیسیم در شاخساره با افزایش استقامت و استحکام دیواره‌سلولی منجر به کاهش تعرق از کوتیکول، کاهش جریان آپوپلاستی و کاهش جذب و انتقال عناصر و نمک‌های سمی از ریشه به شاخساره گردیده‌است و با حفظ پایداری در شرایط زیستگاهی غیرمطلوب، نقش مهمی را در کاهش تنش‌های غیرزنده فیزیکی و شیمیایی بازی می‌کند (Ma & Yamaji, 2006).

اثرات شبه ضروری سیلیسیم تحت شرایط تنش شیمیایی مانند کمبود و سمیت عناصر فسفر و منگنز و شرایط سمیت نمک در بسیاری از گیاهان مشاهده شده‌است (Ma & Takahashi, 2002)، که از جمله آن می‌توان به کاهش سمیت منگنز در گیاه کدو با کاربرد سیلیسیم اشاره‌کرد (Iwasaki & Matsumura, 1999). همچنین گزارشات زیادی مبنی‌بر کاهش شیوع بیماری سفیدک آردی در خیار، جو و گندم، لکه حلقه‌ای در نیشکر، زنگ‌زدگی در لوبیای چشم‌بلبلی، لکه‌برگی در چمن برمودا و لکه‌برگی خاکستری در چمن و افزایش مقاومت گیاه در برابر آفات و حشرات وجود دارد (Bélanger et al., 2003; Cotterill et al., 2007). همچنین سیلیسیم مقاومت برنج را در برابر بلاست و خمیدگی ساقه و برگ، سوختگی غلاف، لکه قهوه‌ای و برگ‌سوزی افزایش می‌دهد (Datnoff & Rodrigues, 2005). سیلیسیم همچنین می‌تواند با کاهش تبخیر و تعرق، افزایش تحریک تولید برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتی و افزایش مقاومت به تنش‌های زیستی و غیرزیستی، باعث افزایش تولید و کیفیت محصول شود. بنابراین تغذیه سیلیسیم در حد مناسب و بهینه با ایجاد کمپلکس‌های پیچیده با ترکیبات دیواره‌سلولی در استحکام و اندازه منافذ دیواره و نیز رشد قطری و طول سلول‌ها، به‌ویژه آوند چوبی گیاهان، افزایش زیست‌توده و حجم ریشه‌ها و در نتیجه آن، افزایش سطح جذب‌کننده عناصر از محیط، نقش اساسی دارد. درنتیجه، مصرف سیلیسیم از دو راه بر رشد و نمو گیاهان اثرگذار است. نخست، بهبود تغذیه سیلیسیم موجب تقویت سیستم حفاظتی گیاه در شرایط نامساعد محیطی،

بیماری و حشرات می‌گردد، از طرفی تیمار سیلیسیم فعال از نظر ژئوشیمیایی سبب بهبود وضعیت آب در خاک، بهبود ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک و افزایش قابلیت دسترسی عناصرغذایی برای گیاه شده و از این طریق حاصلخیزی خاک را بالا می‌برد (Ma et al., 2001).

کودهای سیلیسیم‌دار شیمیایی و زیستی

(مروری بر پژوهش‌های این حوزه در گروه علوم خاک دانشگاه تهران)

پیشرفته‌ترین تحقیقات و بررسی‌ها با توسعه فناوری برای استفاده از کودهای سیلسیمی و اثر آن بر روی گیاهان، توسط دانشمندان علوم زیستی ژاپن و پس از آن‌ها در فرانسه، آلمان، روسیه، ایالات متحده و دیگر کشورها انجام شد و انواع زیادی از کودهای سیلیسیمی به‌دلیل اثرات مفید سیلیسیم در رشد و حاصلخیزی، مورد توسعه و استفاده قرار گرفت. در اولین آزمایش گلخانه‌ای از سیلیکات‌سدیم به عنوان یک کود سیلیسیمی برای چغندر قند استفاده‌شده‌است (Liebig & Playfair, 1843)، آزمایش دیگری نیز تأثیر قابل توجه سیلیکات‌سدیم را روی چمن نشان داد (Station, 1991). اما نخستین اختراع ثبت‌شده به عنوان کود در مورد استفاده از گدازه آتشفشانی (تفاله یا خاکستر) و سیلیسیم حاصل از آن می‌باشد (Snyder et al., 2016). ترکیبات مختلف طبیعی یا سنتزی، امکان تأمین سیلیسیم را برای گیاه فراهم می‌سازند. در این بین مدیریت بقایای گیاهی و مواد آلی در تأمین سیلیسیم نقش قابل توجهی دارد، چرا که گیاهان به‌طور طبیعی حاوی عنصر سیلیسیم در مقادیری بیش از سایر عناصر می‌باشند ضمن آنکه کاربرد بقایای گیاهی فراهم‌کننده شرایط مطلوب فیزیکی، شیمیایی و زیستی برای رشد گیاه نیز هستند. علاوه بر این، ترکیبات غیر آلی (معدنی) مانند کوارتز، زئولیت، میکا و فلدسپارها نیز حاوی این عنصر می‌باشند. از سوی دیگر سیلیکات‌کلسیم که فراورده جانبی صنایع فولاد می‌باشد یکی از کودهای مهم و پرمصرف سیلیسیمی به‌شمار می‌رود. علاوه بر سیلیکات‌کلسیم، کودهای دیگری از سیلیسیم مانند ترموفسفات، سیلیکات‌پتاسیم، سیلیکات‌کلسیم هیدراته‌ی متخلخل و سیلیکاژل به صورت تجاری قابل دسترس می‌باشند (Barker & Pilbeam, 2015)، از بین موارد فوق سیلیکات‌پتاسیم به‌واسطه محلول-بودن در آب، می‌تواند به‌طور مؤثری مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است زمانی‌که گیاه دارای توانایی جذب سیلیسیم از خاک نیست محلول‌پاشی ترکیبات متفاوتی از سیلیسیم به همراه سایر عناصر موجود در آن جهت تأمین سیلیسیم مورد نیاز می‌تواند مؤثر باشد (Menzies et al., 1992).

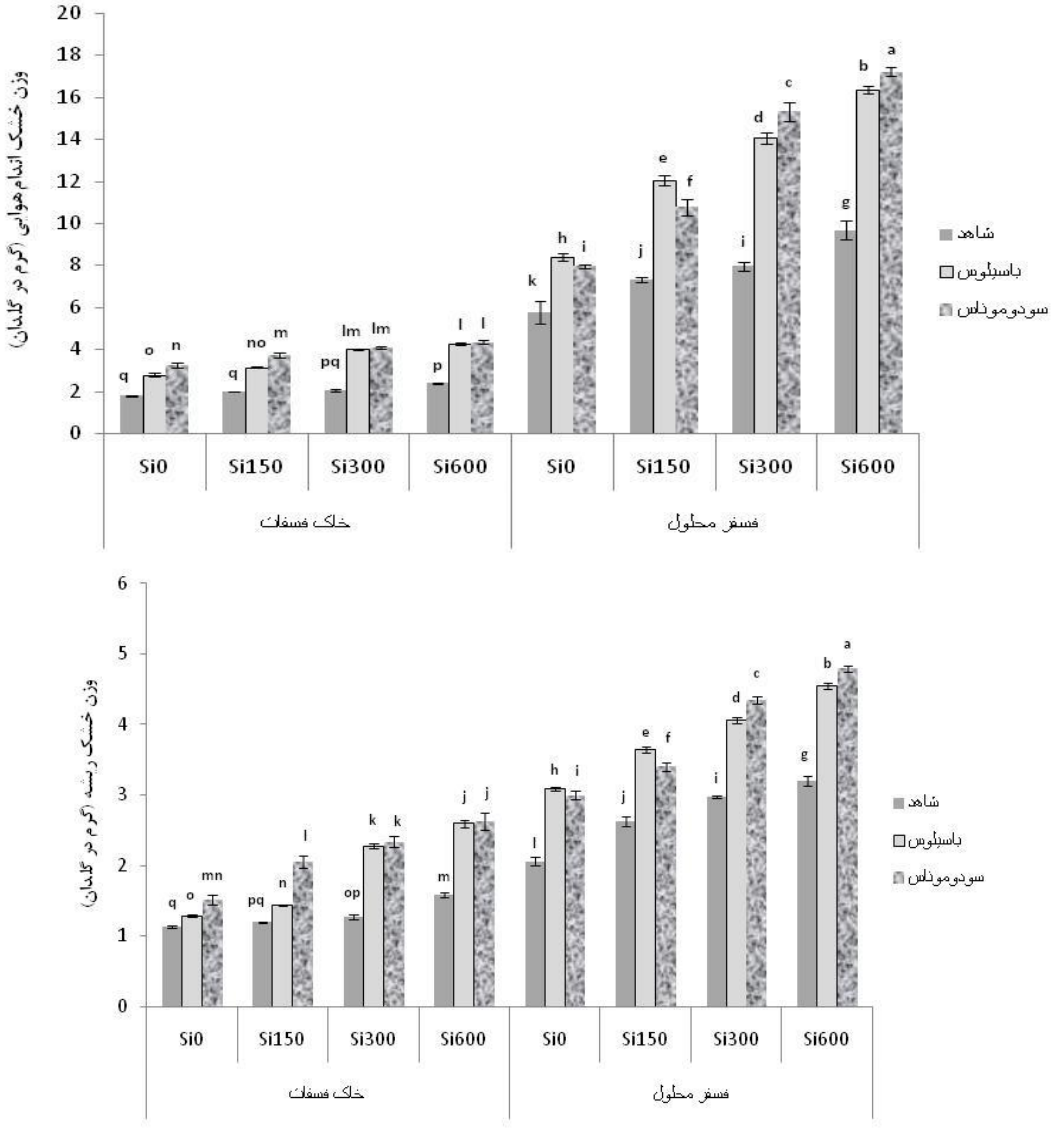
افزودن نانوذرات به عنوان کود به‌دلیل داشتن اثرهای بی‌نظیر آن‌ها مانند نفوذ سریع‌تر و راحت‌تر به درون غشای سلولی توجه زیادی را در بین تولیدکنندگان به خود جلب کرده‌است. بنا بر باور برخی از محققان گیاهان می‌توانند علاوه بر سیلیسیک اسید، مولکول سیلیسیم اکسید را نیز به‌طور مستقیم جذب کنند، برای مثال می‌توان به جذب مستقیم و انتخابی ذرات سیلیسیم اکسید توسط یک گونه از سرخس اشاره نمود (Fu et al., 2002). در همین راستا نتایجی مبنی‌بر اثرات بهینه کاربرد نانوذره سیلیسیم اکسید نسبت به گیاهان تیمار شده با سیلیکات‌پتاسیم وجود دارد که نشان می‌دهد نانوذرات سیلیس به‌علت نفوذ سریع‌تر و راحت‌تر ذرات به بافت گیاه و با توجه به افزایش نسبت سطح خارجی به حجم ذرات نانو و اثر بر افزایش واکنش‌پذیری، این ترکیبات می‌توانند در غلظت‌های کم همانند غلظت زیاد سیلیکات‌پتاسیم عمل کند (Jiang et al., 2004). تحقیقات بسیاری نیز اثر این مواد را بر جوانه‌زنی بذر و عملکرد گیاه نشان داده‌است (Moussa, 2006). همان‌طور که ذکر شد سیلیسیم به‌طور عمده و در شکل سیلیکات‌های نامحلول در ترکیبات خاکی وجود دارد، لذا فرایندهای بیوشیمیایی که در هوادیدگی کانی‌ها دخالت دارند قادرند سیلیکات‌ها را تجزیه کرده و عناصری چون پتاسیم، فسفر، آهن، روی و سیلیسیم را آزاد کنند (Shady et al., 1984) که بیشتر این فرایندها در محیط‌های میکروبی خاک رخ می‌دهد و توسط ریزجانداران مختلف شامل باکتری‌ها، قارچ‌ها، مخمرها، جلبک‌ها و نیز گلسنگ‌ها تحت‌تأثیر قرار می‌گیرند که در این بین باکتری‌ها از اهمیت بیشتری برخوردارند (Ayres et al., 1947). استفاده از ریزجانداران حل‌کننده سیلیکات به عنوان کود بیولوژیک به‌دلیل راحتی استفاده و هزینه کم می‌تواند نقش تکمیل-کنندگی خوبی در تغذیه گیاه داشته باشد. مصرف کودهای بیولوژیک بدون نگرانی از اثرات سوء زیست‌محیطی موجب بهبود شرایط فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک‌ها شده و افزایش حاصلخیزی و باروری اراضی را به‌دنبال دارند، بنابراین جایگزینی تدریجی کودهای شیمیایی با کودهای بیولوژیک به‌دلیل مزایای نسبی فوق به‌علاوه ارزانی آن از عوامل اصلی در نیل به کشاورزی پایدار محسوب می‌شود (Snyder et al., 2016).

در ادامه این مقاله اثرات عنصر سیلیسیم در زمینه‌ی شیمی و تغذیه‌ای گیاه در خاک و گیاه بررسی خواهد شد.

پژوهشی با هدف بررسی اثرات اصلی و ترکیبی سیلیسیم با سطوح (صفر، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم از منبع

سیلیسیک اسید) و باکتری‌های حل‌کننده فسفات (عدم تلقیح باکتری، باسیلوس و سودوموناس) بر پاسخ‌های تغذیه‌ای و فیزیولوژیکی گندم به‌عنوان گیاهان شاخص (C_3 و C_4) و همچنین فراهمی فسفر در شرایط حضور فسفرمحلول و فسفرنامحلول (سنگ‌فسفات) انجام گرفت.

با توجه به نتایج این مطالعه، اثرات برتر بر ویژگی‌های رشد گیاه زمانی مشاهده شد که کاربرد سیلیسیم و باکتری حل‌کننده فسفات با هم اعمال شوند (اثرات مشاهده‌شده بیشتر از اثرات منفرد آن‌ها بود). کاربرد سیلیسیم و همچنین باکتری حل‌کننده فسفات، تجمع فسفر، سیلیسیم و پتاسیم را در شاخساره گیاهان در حضور فسفر محلول و فسفر نامحلول به طور قابل توجهی افزایش داد. اما اثر آن‌ها در حضور فسفر محلول در بهبود جذب این مواد مغذی مؤثرتر بود. همچنین داده‌ها نشان داد که بیشترین اثر سیلیسیم بر جذب فسفر و سایر مواد مغذی در غلظت ۶۰۰ میلی‌گرم سیلیسیم در کیلوگرم برای کشت گیاه گندم رخ داد، در نتیجه مشخص شد که این غلظت، غلظت بهینه برای افزودن سیلیسیم (در حضور فسفر محلول و فسفر نامحلول) است. کاربرد سیلیسیم در این غلظت اثرات قابل ملاحظه‌ای بر رشد گیاه و پارامترهای تغذیه‌ای در شرایط بدون تنش (استفاده از فسفر محلول) داشت که نشان می‌دهد اثرات سیلیسیم مشاهده شده، مختص گیاهان تحت تنش (استفاده از سنگ فسفات) نبود. این نتایج نشان می‌دهد که کاربرد ترکیبی باکتری حل‌کننده فسفات و سیلیسیم که دارای اثر هم‌افزایی بودند، همراه با کوددهی سنگ فسفات می‌تواند جایگزین مناسبی برای کاربرد کود فسفاته شیمیایی در سیستم‌های کشاورزی پایدار باشد (Rezakhani et al., 2019).

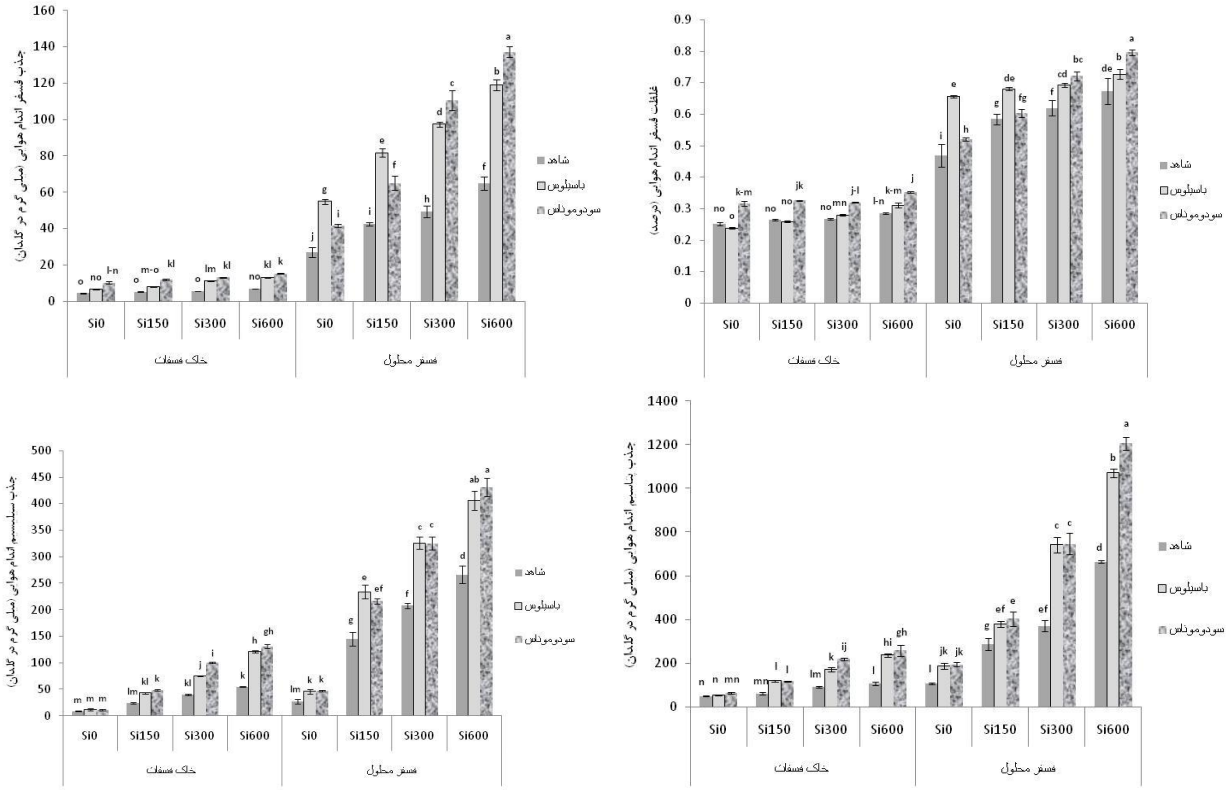


شکل ٤- اثرات سه¬گانه تیمارها بر وزن خشک شاخساره (الف) و ریشه گندم (ب) (Rezakhani et al., 2019)

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس اثرات اصلی و متقابل تیمارها بر پارامترهای اندازه‌گیری شده در گیاه گندم (Rezakhani et al., 2019)

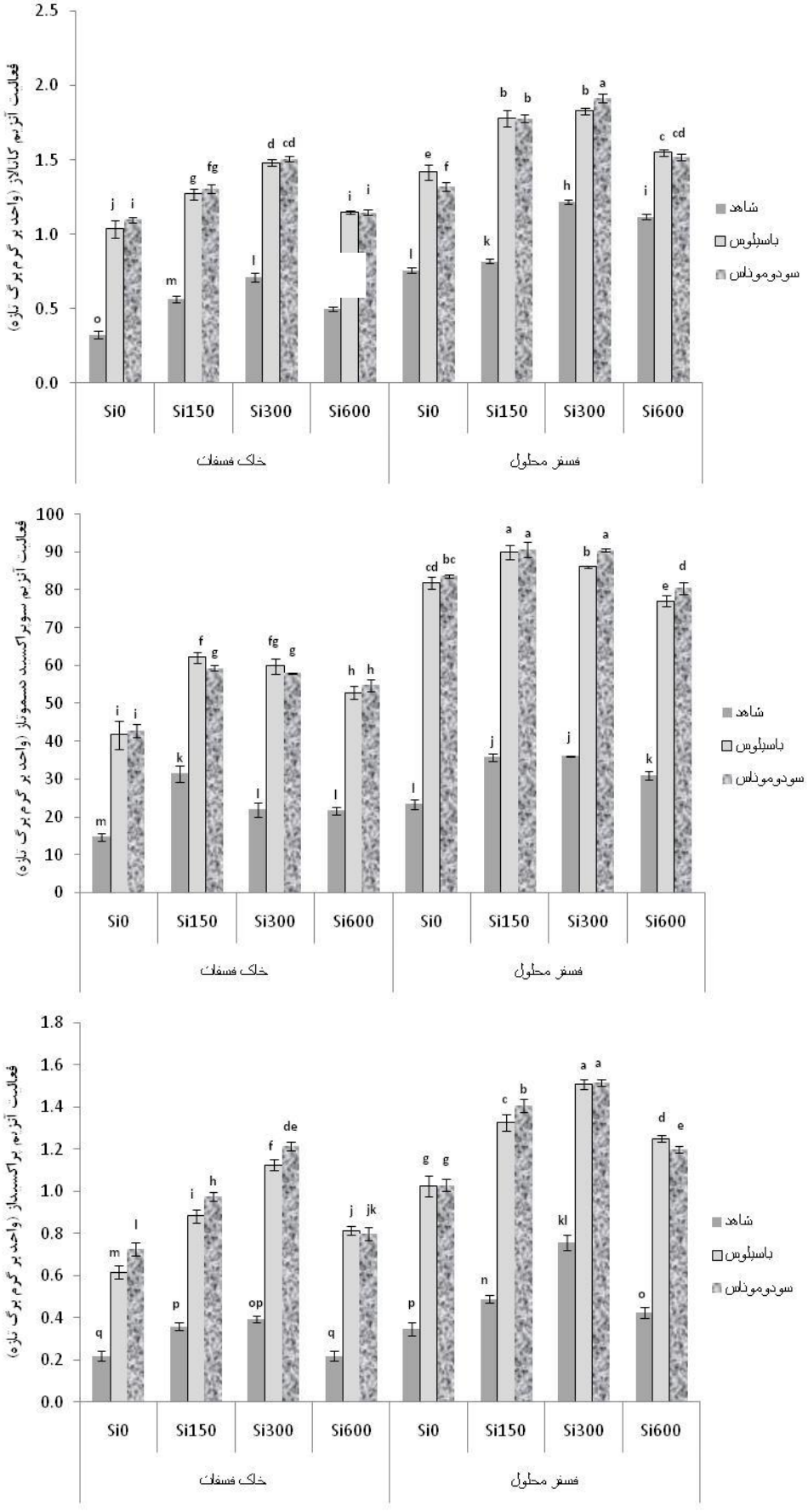
منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات								
		وزن خشک شاخساره	وزن خشک ریشه	غلظت فسفر شاخساره	جذب کل فسفر	جذب کل سیلیسیم	جذب کل پتاسیم	فعالیت آنزیم (CAT)	فعالیت آنزیم (SOD)	فعالیت آنزیم (POD)
سیلیسیم	۳	۱۰۸۷/۶۷**	۱۷۱۸/۶۸**	۱۰۸/۳۵**	۹۷۲/۴۳**	۲۹۳۳/۴**	۲۳۹۲/۱۳**	۷۵۰/۹۹**	۲۷۸/۷۳**	۸۰۴/۲۹**
باکتری	۲	۱۷۸۲/۸۲**	۲۳۸۲/۹۶**	۷۷/۰۶**	۱۰۸۷/۱۳**	۸۵۱/۳۵**	۱۰۶۷/۰۱**	۴۵۳۹/۹۸**	۵۹۱۳/۱**	۵۱۷۹/۸۵**
فسفر	۱	۲۲۱۰۷/۹**	۱۷۵۵۹/۳**	۵۷۳۲/۳۸**	۱۷۶۸۴/۶**	۸۵۵۲/۹۶**	۱۵۴۲۹/۹**	۳۶۰۰/۱**	۴۱۵۹/۳۶**	۲۶۵۴/۸۷**
سیلیسیم× باکتری	۶	۷۲/۵۴**	۶۳/۴۸**	۶/۲۶**	۷۷/۷۹**	۱۳۲/۵۷**	۱۴۸/۲۶**	۴۰/۲۰**	۴/۸۴**	۲۷/۲۰**
سیلیسیم× فسفر	۳	۵۸۴/۶۷**	۷۵/۵۸**	۴۰/۵۳**	۷۳۴/۲۵**	۱۲۵۰/۹۱**	۱۴۱۴/۳۲**	۱۲/۷۲**	۳۶/۵۲**	۷/۳۲**
فسفر× باکتری	۲	۴۶۳/۶۶**	۱۳۶/۲۵**	۴۲/۲۵**	۶۳۰/۸۹**	۳۰۷/۵۵**	۴۲۴/۷۷**	۱۲/۴۳**	۳۹۹/۱۶**	۱۰۱/۸۷**
سیلیسیم× باکتری× فسفر	۶	۴۸/۶۴**	۴۱/۵۶**	۱۲/۶۷**	۶۹/۲۶**	۵۴/۴۹**	۸۶/۶۱**	۲۸/۷۱**	۱۴/۱۵**	۱۵/۰۲**
خطا	۴۸	۰/۰۵۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۳	۴/۲۹	۳۰/۰۸	۱۴۶/۹۳	۰/۰۰۰۸	۲/۴۵	۰/۰۰۰۷

*، **: به ترتیب معنادار در سطح احتمال ۵ درصد و یک درصد، **ns**: غیرمعنادار



شکل ۵- اثر متقابل سه‌گانه تیمارها (سطوح سیلیسیم، باکتری حل‌کننده فسفات و فسفر) روی گیاه گندم. جذب فسفر کل(الف)، غلظت فسفر (ب)، جذب سیلیسیم کل (ج) و جذب پتاسیم کل (د) (Rezakhani et al., 2019)

از کاربرد (سطح ۳۰۰ میلی‌گرم سیلیسیم در کیلوگرم، باکتری سودوموناس و فسفرمحلول)، بیشترین سطح فعالیت آنزیم کاتالاز بدست آمد. بیشترین سطح فعالیت آنزیم سوپراکسیددسموتاز در تیمار (سطح ۱۵۰ میلی‌گرم سیلیسیم در کیلوگرم و باکتری سودوموناس و فسفرمحلول) مشاهده شد. کاربرد (سیلیسیم با سطح ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و باکتری سودوموناس) بیشترین اثر را در افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز در مقایسه با تیمار شاهد داشت (شکل ۶). در مطالعات گذشته اثر باکتری‌ها (Etesami & Maheshwari, 2018) و سیلیسیم (Etesami & Jeong, 2018) بر افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانت در گیاهان مختلف به اثبات رسیده که موجب کاهش تنش اکسیداتیو و افزایش مقاومت گیاهان به تنش گردید.

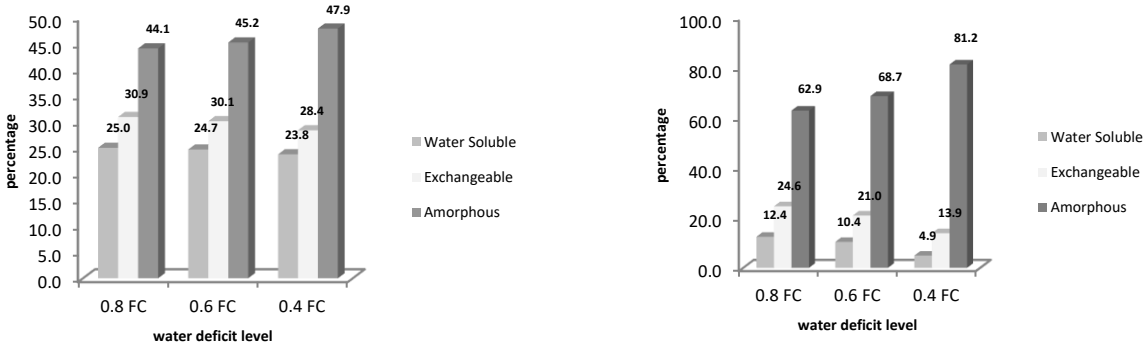


شکل ٦- اثرات سه¬گانه تیمارها بر فعالیت آنزیم کاتالاز (الف)، سوپراکسید دسموتاز (ب)، پراکسیداز (ج) (Rezakhani et al., 2019)

جزءبندی سیلیسیم و نقش باکتری‌های محرک رشد بر آن

(مروری بر پژوهش‌های این حوزه در گروه علوم خاک دانشگاه تهران)

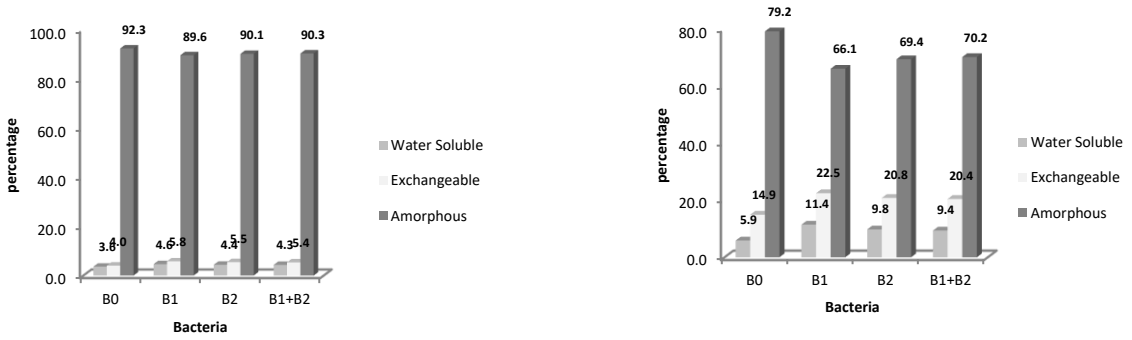
در پژوهشی با هدف بررسی اثرات نانوذرات سیلیسیم و باکتری‌های محرک رشد گیاه بومی خاک‌های ایران بر جزء بندی سیلیسیم خاک (فرکشن‌ها) در شرایط تنش کم‌آبی در کشت کلزا و سپس بررسی اثرات باقیمانده آن بر کشت دوم محصول (گندم) اجرا شد، خاک مورد استفاده در این تحقیق دارای بافت لوم رسی، قابلیت هدایت الکتریکی مناسب، واکنش خنثی، میزان پتاسیم مناسب برای کشت کلزا و گندم بود و سیلیسیم قابل جذب آن کمتر از حد بحرانی بود. نتایج حاکی از کاهش میزان سیلیسیم محلول و تبادلی با افزایش سطح تنش کم‌آبی بود (شکل ۷)، بطوریکه که کمترین مقادیر در تنش کم‌آبی 0.4FC مشاهده گردید و در همه‌ی تیمارها سیلیسیم محلول کمتر از تبادلی و سیلیسیم تبادلی کمتر از سیلیسیم آمورف بود. جورجیادیس و همکاران (۲۰۱۷) کمترین میزان سیلیسیم را در فاز محلول مشاهده کردند و بیان کردند که انحلال کاهنده اکسیدهای آهن و منگنز ممکن است باعث آزاد شدن سیلیسیم در محلول خاک شود (Georgiadis et al., 2017). غلظت و اجزای سیلیسیم موجود در محلول خاک بستگی به ترکیب مواد معدنی، جذب و واجذب، میزان آب، دما و فعالیت‌های بیولوژیکی دارد (Milnes & Twidale, 1983; YAN et al., 2018). ابتدا سیلیس در پی کاهش محتوای آب در خاک رسوب می‌کند، زیرا اشباع سیلیس محلول افزایش می‌یابد. دوم، سیلیس آمورف به دلیل تغییر تکرار شرایط اکسایش، در خاک جمع می‌شود(Georgiadis et al., 2017). سینتیک پلیمریزاسیون سیلیسیک اسید و رسوب سیلیس در خاک به تغییرات دمای خاک و pH، مقاومت یونی و غلظت سیلیسیم در محلول خاک بستگی دارد (Cornelis et al., 2010).



b a

شکل ۷- اثرات سطح کمبود آب بر بخش‌های سیلیکون در خاک کشت‌شده با کلزا (a) و گندم (b). (0.8 FC (خروج ۲۰ درصد آب قابل استفاده)، 0.6 FC (خروج ٤٠ درصد آب قابل استفاده) و 0.4 FC (خروج ٦٠ درصد آب قابل استفاده)) (Valizadeh-rad et al., 2021)

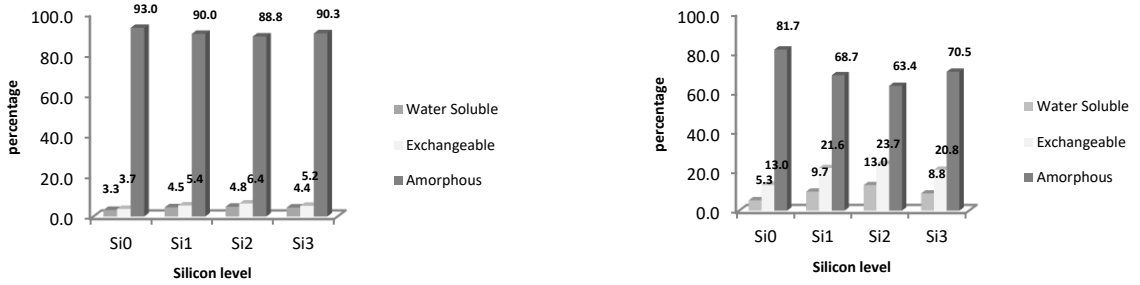
کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاه سبب افزایش فراهمی سیلیسیم و افزایش سیلیسیم محلول و تبادلی و کاهش سیلیسیم آمورف شد (شکل ۸)، بطوریکه در بیشترین سیلیسیم محلول و تبادلی به ترتیب در حضور باکتری‌های psu19.sp، Bacillus76.sp و کنسرسیوم psu19.sp+ Bacillus76.spبود که کاهش اندک انحلال احتمالاً به دلیل رقابت دو باکتری در شرایط تنش است. انحلال و در دسترس قرار گرفتن مواد معدنی توسط میکروارگانیسم‌ها به خوبی شناخته شده‌است (Uroz et al., 2007). در پی تخریب سیلیکات‌ها توسط باکتری‌ها مقداری سیلیسیم آزاد می‌شود (Hutchens et al., 2003) و این باکتری‌ها با آزادسازی سیلیسیم و پتاسیم باعث افزایش جذب توسط گیاه و کاهش نیاز آنها به کود پتاسیمی می‌شود (Sheng, 2005). سیلیسیم خاک می‌تواند از طریق مکانیسم‌های مختلف از حالت پلیمری خارج شده و حل شود. چندین مکانیزم از هم گسیختگی سیلیکات توسط باکتری‌ها ارائه شده‌است که شامل حل شدن توسط لیگاندها (کاتیون‌های دو ظرفیتی)، اسیدها (آلی و غیر آلی)، قلیایی (حمله هسته‌ای) و پلی‌ساکاریدهای خارج سلول است. با این وجود، اسیدولیز به عنوان متداول‌ترین مکانیزمی که توسط آن مواد معدنی سیلیکات از بین می رود، تصدیق می‌شود (Kang et al., 2017). باکتری‌ها می‌توانند از طریق تولید مواد موسیلاژی و لعابی حاوی اگزوپلی ساکاریدها و همچنین تولید پروتون، اسیدهای آلی، سیدروفور و لیگاندهای آلی باعث انحلال کانی‌ها شوند. بسته به نوع کانی‌های سیلیکاتی موجود در خاک، باکتری‌ها نیز توان تجزیه‌ی متفاوتی خواهند داشت که آن بستگی به ساختمان و ترکیب شیمیایی کانی و توانایی انحلال پتاسیم توسط باکتری دارد (Rasouli Sadaghiani et al., 2017).



b a

شکل ۸- اثرات باکتری‌ها بر بخش‌های سیلیکون در خاک کشت شده با کلزا (a) و گندم (b). (B0 (بدون باکتری)، B1 (با تلقیح Pseudomonas19.Sp)، B2 (با تلقیح Bacillus76.sp)، B3 ((B1+B2)) (Valizadeh-rad et al., 2021)

کاربرد منابع و مقادیر مختلف سیلیسیم نیز نتایج متفاوتی داشت بطوریکه که به ترتیب در تیمار کاربرد ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نانوسیلیسیم، کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نانوسیلیسیم و ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سیلیسیم از منبع سیلیکات پتاسیم بیشترین سیلیسیم محلول و تبادلی و کمترین سیلیسیم آمورف حتی در شرایط کمبود آب (تیمار 0.4FC) مشاهده شد (شکل ۹)، که نتایج حاکی از تأثیر بهتر نانوذرات نسبت به منبع سیلیکاته است که احتمالا اندازه بسیار کوچکتر نانوذرات سبب افزایش دسترسی توسط گیاه و باکتری‌ها شده‌است و از طرفی سطح زیاد این ذرات می‌توانند به عنوان یک حامل جهت قرارگیری باکتری‌های محرک رشد گیاه باشد که عوامل تنشی آسیب کمتری به باکتری‌های محرک رشد گیاه وارد نموده و نهایتاً با کاربرد نانوذرات سیلیسیمی و باکتری‌های محرک رشد گیاه بصورت همزمان، میزان سیلیسیم محلول و تبادلی در همه سطوح تنش کم‌آبی بیشتر از سایر تیمارها بود. کیپینگ (۲۰۱۷)، گزارش داد که کاربرد منابع مختلف سیلیسیمی، تأثیر متفاوتی بر میزان سیلیسیم خاک و گیاه دارد بطوریکه فراهمی سیلیسیم از منبع سیلیکات‌پتاسیم به مراتب بیشتر از منبع ترموفسفات است و کاربرد تمامی منابع سیلیسیمی سبب افزایش سیلیسیم خاک شده‌است و لزوماً میزان کل سیلیسیم در خاک نشانگر فراهمی سیلیسیم قابل جذب برای گیاه نیست (Keeping, 2017). یک موضوع مهم در بحث فراهمی سیلیسیم در خاک مربوط به اندازه ذرات است و مطالعات به طور کلی نشان داده‌اند که با کاهش اندازه ذرات و افزایش سطح انحلال، در دسترس بودن سیلیسیم افزایش می‌یابد (Haynes et al., 2013). همچنین فرم سیلیسیم نیز بر حلالیت آن مؤثر است بطوریکه بسته به ساختمانی که سیلیسیم در آن قرار دارد سرعت و غلظت تأمین سیلیسیم را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Babu et al., 2016). کاهش زیاد میزان سیلیسیم محلول، تبادلی و آمورف بعد از کشت گندم نسبت به کشت کلزا نیز احتمالاً به دلیل جذب بالای سیلیسیم از خاک توسط دو کشت پی در پی (کلزا و سپس گندم) بوده‌است که گرچه بعد از کشت کلزا همچنان میزان سیلیسیم محلول و تبادلی در سطح مناسبی برای جذب توسط گیاه قرار داشت ولی با کشت گندم و مصرف بیشتر سیلیسیم قابل جذب توسط این گیاه (محلول و تبادلی) میزان سیلیسیم محلول و تبادلی به شدت کاهش یافته و فرصت زیادی نیز برای تبدیل فرم آمورف به محلول و تبادلی وجود نداشته‌است و یا منابع سیلیسیمی با قابلیت انحلال کمتر باقی مانده‌است که نهایتاً شرایط موجود سبب فراهمی کمتر سیلیسیم محلول و تبادلی شده‌است. اگرچه با کاربرد نانوذرات سیلیسیم و باکتری‌های محرک رشد گیاه فراهمی سیلیسیم محلول و تبادلی بیشتر از تیمارهای دیگر بود تغییرات pH و اشباع اسید خاک (H^+ و Al^{3+}) سبب تغییر در دسترسی و فراهمی سیلیسیم در خاک می‌شود بطوریکه در کشت‌های متوالی می‌تواند سبب فراهمی متفاوت سیلیسیم برای گیاه باشد (Keeping, 2017). بابو و همکاران (۲۰۱۶a)، گزارش کردند که مقادیر کمی از Al^{3+} به دلیل تجمع همزمان این عناصر به عنوان هیدروکسلی آلومینوسیلیکات (HAS) در محیط خاک، حلالیت تعادل سیلیسیم را کاهش می‌دهد و همچنین سرعت انحلال سیلیسیم را از طریق تسریع روند پلیمریزاسیون H_4SiO_4 به سیلیسیم کلوئیدی که توسط گیاه قابل جذب نیست، کاهش می‌دهد (Babu et al., 2016).



a b

شکل ۹- اثرات سطح سیلیکون بر بخش‌های سیلیکون در خاک کشت‌شده با کلزا (a) و گندم (b). (Si_0 (گیاهان بدون سیلیسیم)، Si_1 (گیاهان با ۱۰۰ $mg.kg^{-1}$ نانوسیلیسیم)، Si_2 (گیاهان با ۲۰۰ $mg.kg^{-1}$ نانوسیلیسیم)، Si_3 (گیاهان با ۲۰۰ $mg.kg^{-1}$ سیلیسیم)) (Valizadeh-rad et al., 2021)

تحقیقی توسط مالمیر و همکاران (۲۰۲۰)، با هدف بررسی پاسخ‌های تغذیه‌ای و دارویی گیاه استویا با کاربرد عنصر سیلیسیم انجام گرفت که نتایج آن حاکی از معنادار بودن کاربرد سیلیسیم، وزن‌تر و خشک ساقه و ریشه، ارتفاع ساقه، حجم ریشه، قطر ساقه، سطح برگ و شاخص کلروفیل برگ بود. کاربرد تیمارهای ۲۰۰ سیلیکات‌کلسیم و ۱۰۰ نانوسیلیسیم و ۲۰۰ هیومیستارسیلیس بیشترین وزن‌تر ساقه را نسبت به شاهد حاصل کرد، افزایش ارتفاع و قطر ساقه‌ی گیاه نشان‌دهنده‌ی بهبود رشد و مقاومت مکانیکی ساقه گیاه است که با توجه به افزایش شاخص کلروفیل و سطح برگ گیاه، نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر برگ گیاه در مقابل جذب نور و فتوسنتز و تاج پوشش بهتر اندام‌هوایی گیاه استویا است. تیمار ۴۰۰mg/kg هیومیستار سیلیس بیشترین درصد استویوزاید (۵/۲۳)، ریبودیوزاید A با (۰/۶۷) را نشان دادند. همچنین افزایش وزن تر و خشک اندام‌هوایی گیاه بیانگر تولید کمی بیشتر گیاه شد. افزایش وزن تر و خشک و حجم ریشه گیاه نشانگر تأثیر سیلیسیم بر رشد ریشه گیاه و توسعه‌ی آن به جهت جذب بهتر عناصر غذایی و آب است و همچنین در شرایط کاشت طبیعی باعث افزایش قندهای ثانویه می‌شود و به‌طورکلی می‌توان گفت کاربرد سیلیسیم از منابع مختلف بر گیاه استویا تأثیرگزار بوده و باعث عملکرد کیفی و کمی بهتر گیاه دارویی استویا گردیده‌است و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده تیمارهی ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تأثیر بهتری دارند، همچنین تیمار ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نانو سیلیس نسبت به تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم عملکرد بهتری را نشان داد. مصرف سیلیکات پتاسیم و کود کامل هیومیستار سیلیس برای گیاه استویا توصیه می‌شود هرچند نیازمند مطالعات بیشتر در این زمینه است. با علم به اینکه وجود سیلیسیم در خاک و به‌خصوص محیط ریزوسفر باعث بهبود ساختمان خاک و فراهمی عناصر و همچنین دفع فلزات سنگین از محیط ریشه گیاه می‌شود، اما کاربرد سلیسیم به شکل نانو نیازمند بررسی‌های بیشتر به‌خصوص از جنبه‌ی زیست‌محیطی در خاک‌های مورد استفاده است. جذب بالای سیلیسیم در اندام گیاه در مقایسه با سایر عناصر تأییدی بر جذب لوکس عنصر سیلیسیم و همچنین سیلیسیم دوست بودن گیاه استویا است.

با توجه به اثربخشی کاربرد عنصر سیلیسیم بر پاسخ‌های مورفو- فیزیولوژی، تغذیه‌ای، و بهبود کیفیت قندهای استویوزاید و ریبودیوزاید، توصیه می‌شود در کنار مصرف بهینه عناصر غذایی به نقش این عنصر ارزشمند، توجه بیشتری معطوف گردد (Malmir et al., 2020).

پژوهشی دیگر با هدف بررسی و تأثیر کاربرد کودهای نانو سیلیسیم و سیلیکات پتاسیم بر پاسخ‌های رز مینیاتوری در شرایط تنش شوری انجام شد. با توجه به آزمایش‌های فیزیولوژی، مورفولوژی و عناصر مشاهده شد شوری موجب کاهش معنی‌دار همه صفات مورفولوژی (ارتفاع بوته، تعداد گل (غنچه)، قطر ساقه، قطر دمگل، قطر گل باز و طول عمر گل روی بوته) و برخی صفات فیزیولوژی (کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کارتنوئید) و عناصر پتاسیم و روی در برگ شد. از طرفی شوری باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان سوپراکسید دیسموتاز و گلوتاتیون ردوکتاز گردید. نتایج حاصل از این تحقیق، نشانگر اثرات سودمند سیلیس در شرایط تنش شوری بر گیاه رز مینیاتوری بود. کلید این امر کاهش جذب، انتقال و انباشتگی یون سدیم در بافت‌های حساس می‌باشد که به نظر می‌رسد به علت نقش سیلیس در پایداری دیواره سلول و حفظ انسجام غشاء سلول‌های ریشه باشد. این آزمایش آشکار می‌سازد که افزودن کودهای سیلیکاته به خاک‌های شور می‌تواند اثرات تنش شوری را در گیاه گل رز مینیاتور کاهش دهد. اگرچه اثرات مفید سیلیس تحت شرایط مطلوب نیز محسوس بود، ولی به نظر می‌رسد زمانی که گیاه در معرض شرایط تنش قرار می‌گیرد، اثرات سودمند سیلیس چشمگیرتر است (Asgari & Diyanat, 2021).

عنصرکارایی[۱]

(مروری بر پژوهش‌های این حوزه در گروه علوم خاک دانشگاه تهران)

امروزه توانایی ژنوتیپ‌های مختلف گیاهی در جذب و مصرف عناصر غذایی، توسط دانشمندان بسیاری مورد توجه قرار گرفته‌است که تفاوت کارایی آن‌ها در استفاده از عناصر غذایی به خاطرجذب بوسیله ریشه‌ها یا مصرف توسط گیاه و یا هر دو متأثر می‌شود، که اهمیت نسبی این استراتژی‌ها بسته به نوع عنصر و نوع گونه گیاه می‌تواند متفاوت باشد. محققان انتخاب ارقام‌کارا را یک متغیر مکمل و حتی جایگزین برای مصرف کودها در کشاورزی بیان‌کردند. برخی اساس پیشرفت در این مورد را منوط به شناخت تغییرات ژنتیکی ارقام دانستند، اما در پژوهش‌های دیگر این مسئله را علاوه بر ژنتیک با عوامل محیطی هم مرتبط دانستند. علاوه بر این، نقش ریشه و تارهای کشنده در ریشه نیز به عنوان عامل مؤثر در تفاوت ارقام‌کارا معرفی شده‌است. برای جذب مواد مغذی، تحرکات ریشه در ریزوسفر تغییراتی در pH، پتانسیل احیا و آزادسازی تراوشات با وزن مولکولی کم و زیاد ایجاد می‌کند که از اهمیت بالایی برخوردار است. به عنوان مثال، در کشت برنج، رهاسازی اکسیژن و متعاقب آن اکسیداسیون آهن منجر به اسیدی شدن ریزوسفر و استفاده بهتر از محلول اسیدی فسفر و همچنین روی می‌شود (Marschner & Römheld, 1994).

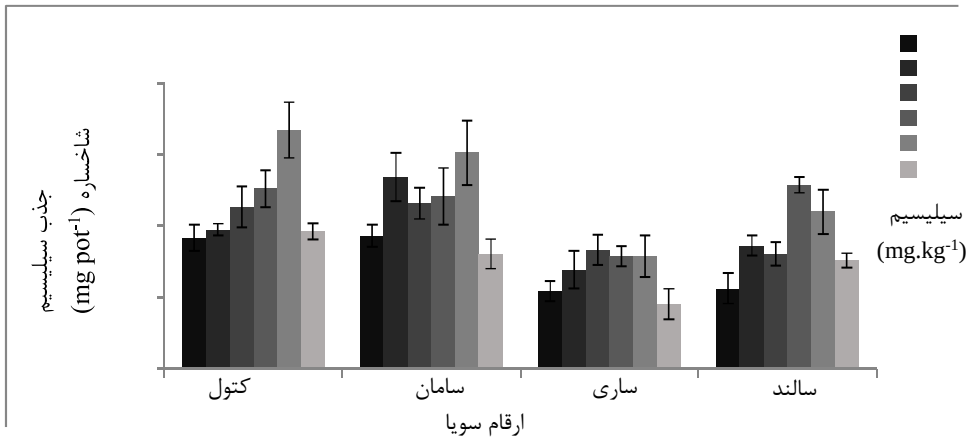
سیلیسیم نقش مهمی در تعادل جذب، انتقال، و توزیع عناصر معدنی در گیاهان ایفا می‌کند. سیلیسیم با افزایش سطح و طول ریشه، مکان‌های در معرض بیشتری برای جذب یون‌های قابل انتشار فراهم می‌سازد در همین راستا پژوهشی با هدف تعیین ارقام سیلیسیم‌کارای گندم و همچنین تعیین سطح بهینه کاربرد سیلیسیم از منابع مختلف و سپس تعیین اثر منابع مختلف تأمین سیلیسیم در پاسخ به شوری و بررسی سازوکارهای افزایش مقاومت گیاه گندم به تنش شوری انجام گرفت. با عنایت به نقش دو عامل مهم سطح ریشه و تغییرات حاصل از فعالیت ریشه‌ها بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی، آگاهی از تغییرات فراهمی عناصرغذایی در محیط رشد ریشه و سهولت جذب و انتقال آن‌ها برای درک رفتار سیلیسیم در خاک ضروری است. به نظر می‌رسد سیلیسیم بر روی جذب و انتقال مواد مغذی ضروری مانند فسفر و پتاسیم مؤثر بوده‌است درنتیجه سبب بهبود رشد گیاهان می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش استدلالی بر افزایش غلظت سیلیسیم در شاخساره و به‌تبع آن افزایش مقدار کل سیلیسیم جذب‌شده با افزایش غلظت سیلیسیم در محلول خاک تحت کاربرد سیلیسیم می‌باشد که هم‌راستا با یافته‌های سایر مطالعات است. کاربرد نانوذرات سیلیسیم نسبت به سطوح مختلف سیلیکات‌پتاسیم باعث افزایش مقدار غلظت سیلیسیم و پتاسیم و همچنین جذب سیلیسیم و پتاسیم در شاخساره شد. بنابراین به نظر می‌رسد که استفاده بهینه از نانوذرات سیلیسیم به دلیل اندازه کوچک، سطح ویژه بالا و واکنش‌پذیری بالا می‌تواند به بهبود رشد گندم کمک کند.

پژوهشی دیگر با هدف انتخاب برترین جدایه‌های همزیست با ارقام سویا و همچنین بررسی اثربخشی سطح مصرف مناسبی از سیلیسیم در جهت کاهش مصرف کودهای نیتروژنی و افزایش تثبیت زیستی نیتروژن و عملکرد سویا و توصیه برای مصرف در سطح کشور انجام گردید. با توجه به سطوح مختلف سیلیسیم مورد استفاده در این تحقیق (سطوح ۰ تا ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و با توجه به کاهش خصوصیات رشدی گیاه در سطح ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، سیلیسیم‌کارایی در یک سطح متوسط مصرف (۰ تا ۶۰۰) و در سطح ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم محاسبه گردید (Shamshiripour et al., 2021).

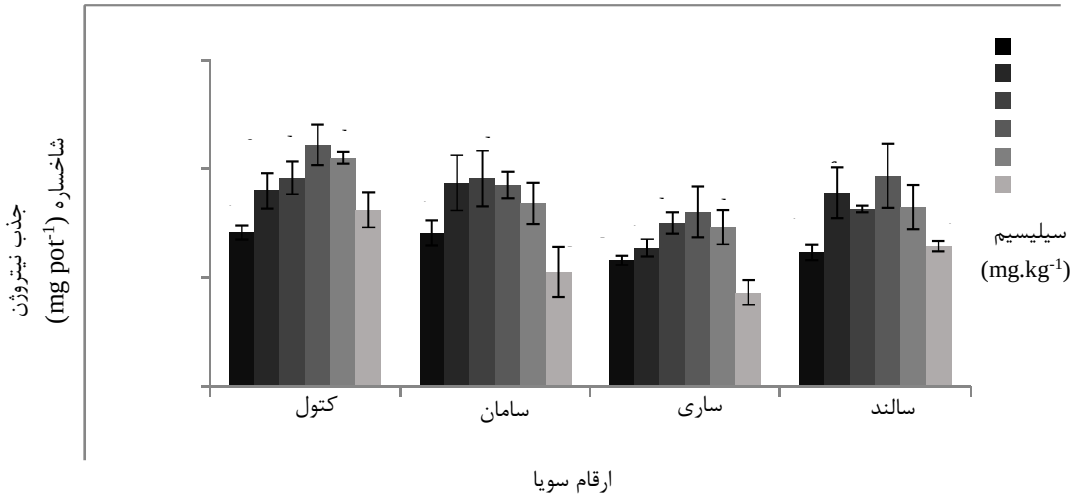
طبق نتایج بدست‌آمده در این تحقیق، خواص بیولوژیکی خاک، شاخساره، مورفولوژی ریشه (به عنوان مثال گره‌زایی) و جذب نیتروژن شاخساره ارقام سویا با اعمال سطوح مختلف سیلیسیم تغییر یافت. همچنین مشخص شد که غلظت بالای سیلیسیم (۸۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) اثر بازدارندگی بر رشد ارقام سویا و احتمالاً سایر حبوبات دارد. یافته‌ها همچنین نشان داد که غلظت‌های بهینه سیلیسیم می‌تواند روشی امیدوارکننده برای بهبود تولید ارقام سویا با مکانیسم‌های متعددی مانند بهبود گره‌زایی (افزایش تثبیت N_2)، معماری سیستم ریشه (به عنوان مثال: جذب آب و مواد معدنی از خاک) و خواص بیولوژیکی خاک (به عنوان مثال: بهبود حاصلخیزی خاک) باشد که در نتیجه بر رشد سویا تأثیر مثبت می‌گذارد. بر اساس نتایج این مطالعه، توسعه کودهای مبتنی بر سیلیسیم حمایت بسیار جالبی برای بهبود رشد و تثبیت نیتروژن (افزایش جذب نیتروژن شاخساره) در ارقام سویا در آینده است (Shamshiripour et al., 2021).

---

۱ Element efficiency



شکل ۱۰- تأثیر سطوح سیلیسیم بر جذب سیلیسیم شاخساره در ارقام مختلف با استفاده از آزمون مقایسات میانگین حداقل تفاوت معنادار (LSD)، اثرات با حروف مشترک دارای تفاوت معناداری از نظر آماری نمی‌باشند (Shamshiripour et al., 2021)



شکل ۱۱- تاثیر سطوح سیلیسیم بر جذب نیتروژن در شاخساره در ارقام مختلف با استفاده از آزمون مقایسات میانگین حداقل تفاوت معنادار (LSD)، اثرات با حروف مشترک دارای تفاوت معناداری از نظر آماری نمی‌باشند (Shamshiripour et al., 2021)

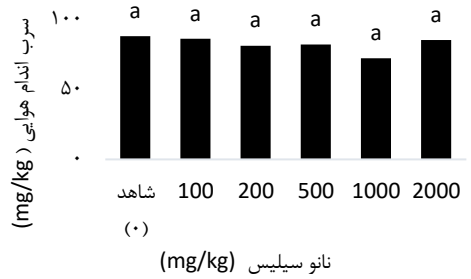
پژوهشی دیگر با هدف بررسی سیلیسیم‌کارایی در ارقام مخلتف ذرت که از گونه‌های انباشتگر سیلیسیم بود، انجام شد. تیمارها شامل پنج رقم ذرت از ارقام پرکاربرد (شامل: سینگل کراس‌های ۴۰۰ (ksc400)، ۴۱۰(ksc410)، ۷۰۴(ksc704)، ۷۰۵ (ksc705) و ۷۰۶ (ksc706) و دو سطح سیلیسیم (صفر و ۱۰۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک از منبع سیلیکات‌پتاسیم) بود. در بین ارقام تیمار ksc706 با عملکرد ۱۴/۵۴ گرم و وزن ریشه ۷/۶ گرم و سطح برگ ۱۷۳۷۰۰ میلی‌متر مربع و سطح ریشه ۱۸۵۱۸۵ میلی‌متر مربع از لحاظ خصوصیات مورفولوژیکی بهترین نتایج را داشت و رقم ksc410 نیز با عملکرد ۱۰/۰۳ گرم و وزن ریشه ۵/۲۵ گرم و سطح برگ ۱۴۷۹۰۰ میلی‌متر مربع و سطح ریشه ۱۳۶۲۸۴ میلی‌متر مربع کمترین خصوصیات مطلوب را نسبت به تیمار شاهد نشان داد. افزایش عملکرد ارقام نسبت به تیمار شاهد به صورت: ksc400 (۲۰/۷ ٪)، ksc706 (۱۷/۸ ٪)، ksc410 (۹/۲ ٪)، ksc704 (۸/۹ ٪) و ksc705 (۴/۸ ٪) بود. بیشترین کارایی جذب سیلیسیم در رقم ksc706 (۸۵/۷ ٪) و کمترین آن در ksc704 (۵۸/۹ ٪)، و بیشترین کارایی مصرف سیلیسیم در ksc705 (۱۲/۵۲ ٪) و کمترین در ksc400 (۵/۴۴ ٪) بود. با افزایش سطح سیستم ریشه‌ای در تیمار حاوی سیلیسیم نسبت به شاهد، و اثرات سیلیسیم بر جذب و انتقال بیشتر عناصر غذایی از خاک به اندام هوایی افزایش عملکرد گیاه مشهود است (Parviznia et al., 2021). بر اساس نتایج این پژوهش بطور کلی سیلیسیم به صورت مستقیم یا غیر مستقیم بر افزایش عملکرد گیاه تأثیر داشته و ذرت به عنوان یک گونه سیلیسیم‌انباشتگر نیاز ضروری به سیلیسیم برای حصول حداکثر عملکرد دارد. بر اساس نتایج این پژوهش رقم سینگل کراس ۷۰۶ و سینگل کراس ۴۰۰ نیز به عنوان دو رقم سیلیسیم‌کارآ شناخته شده و در شرایط کمبود سیلیسیم پتانسیل عملکرد بهتری نسبت به سایر ارقام بررسی شده دارند. از نظر غلظت عناصر غذایی بیشترین تأثیر بر افزایش غلظت نیتروژن و پتاسیم و آهن در گیاه دیده شد و سایر

عناصر مثل روی و منگنز و مس نیز در تیمار حاوی سیلیسیم افزایش داشتند. عناصر فسفر و کلسیم با کاهش جزیی نسبت به تیمار شاهد همراه بودند. اما عنصر منیزیم نسبت به کاربرد سیلیسیم تغییر معناداری نداشت (Parviznia et al., 2021). با توجه به تأثیرات اثبات شده سیلیسیم بر افزایش غلظت عناصر غذایی ضروری و قابل جذب گیاه به نظر می‌رسد بیشترین تأثیر سیلیسیم در محیط ریزوسفر می‌باشد و در گیاه نیز از طریق تأثیر بر فعالیت‌های آنزیمی و تأثیر بر تنظیم بیان ژن جذب عناصر غذایی و تولید ترکیبات قندی و پروتئینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد که سازوکارهای آن به طور دقیق مشخص نیست (Parviznia et al., 2021).

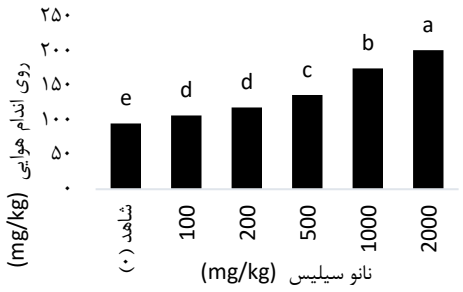
غیر متحرک ساختن فلزات سنگین

(مروری بر پژوهش‌های این حوزه در گروه علوم خاک دانشگاه تهران

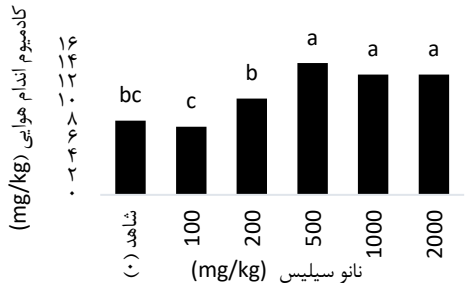
در پژوهشی با هدف غیر متحرک ساختن فلزات سنگین (سرب، روی و کادمیوم) در یک خاک آلوده تحت کشت گیاه سیلیسیم دوست چچم (*Lolium perenne L.*) نتایج بدست‌آمده نشان داد که تیمارهای نانوسیلیس بر کاهش غلظت سرب، روی و کادمیوم عصاره‌گیری‌شده با HNO_3 و قابل جذب خاک (عصاره‌گیری شده با DTPA) نسبت به شاهد تأثیر معناداری داشتند، بیشترین تأثیر مربوط به سطح پنجم تیمار نانو سیلیس (N_5) بر غلظت قابل جذب عناصر (۱۷/۸۲ درصد برای سرب، ۱۸/۷۶ درصد برای روی و ۲۴/۷۷ درصد برای کادمیوم)، سطح سوم تیمار نانو سیلیس (N_3) برای سرب و روی قابل استخراج با HNO_3 و سطح چهارم تیمار نانو سیلیس (N_4) برای کادمیوم قابل استخراج با HNO_3 در خاک بود. غلظت قابل استخراج با HNO_3 و قابل جذب سرب، روی و کادمیوم خاک تیمار شده با نانو سیلیس پس از کشت گیاه نسبت به حالت قبل از کشت گیاه در خاک کاهش داشت که سطح پنجم تیمار (N_5) بیشترین تأثیر را بر کاهش غلظت عناصر دارا بود. با افزایش غلظت نانو سیلیس میزان روی، کادمیوم و سیلیسیم اندام‌هوایی گیاه افزایش پیدا کرد. بیشترین میزان روی و سیلیسیم شاخساره مربوط به سطح پنجم تیمار (N_5) و بیشترین کادمیوم شاخساره مربوط به سطح سوم تیمار نانو سیلیس (N_3) بود اما تیمارهای نانو سیلیس تأثیری بر سرب شاخساره گیاه نداشتند. در مجموع با توجه به تأثیر تیمارهای نانو سیلیس مخصوصاً در غلظت ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و گیاه مرتعی چچم بر تثبیت فلزات سنگین در خاک، کاربرد توأم هر دو در خاک های آلوده به فلزات سنگین می‌تواند مفید باشد (Mirzakhani et al., 2018).



شکل ۱۲- مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف نانو سیلیس بر میزان سرب اندام‌هوایی گیاه (اعداد هر ستون که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD از نظر آماری اختلاف معناداری ندارند (α=0/05)) (Mirzakhani et al., 2018)



شکل ۱۳- مقایسه میانگین تاثیر سطوح مختلف نانوسیلیس بر میزان روی اندام‌هوایی گیاه (اعداد هر ستون که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD از نظر آماری اختلاف معناداری ندارند (α=0/05)) (Mirzakhani et al., 2018)



شکل ١٤-مقایسه میانگین تاثیر سطوح مختلف نانوسیلیس بر میزان کادمیوم اندام¬هوایی گیاه (اعداد هر ستون که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD از نظر آماری اختلاف معناداری ندارند (α=0/05)) (Mirzakhani et al., 2018)

بحث و نتیجه‌گیری

سیلیسیم نقش مهمی در تعادل جذب، انتقال، و توزیع عناصر معدنی در گیاهان ایفا می‌کند. سیلیسیم با افزایش سطح و طول ریشه، مکان‌های در معرض بیشتری برای جذب یون‌های قابل انتشار فراهم می‌سازد. اگرچه نتایج برخی مطالعات حاکی از آن است که سیلیسیم رشد ریشه را تحریک نکرده‌است و کاربرد آن با افزایش جذب آب باعث افزایش جذب عناصر شده‌است، لذا تحقیقات بیشتری جهت تعیین اینکه سیلیسیم چطور جذب آب توسط ریشه را تنظیم می‌کند و بر خصوصیات آناتومیکی ریشه اثر می‌گذارد مورد نیاز است تا متابولیسم رشد بهبود یافته گیاه توسط سیلیسیم بهتر درک شود. با عنایت به نقش دو عامل مهم سطح ریشه و تغییرات حاصل از فعالیت ریشه‌ها بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی، آگاهی از تغییرات فراهمی عناصرغذایی در محیط رشد ریشه و سهولت جذب و انتقال آن‌ها برای درک رفتار سیلیسیم در خاک ضروری است. به نظر می‌رسد سیلیسیم بر روی جذب و انتقال مواد مغذی ضروری مانند فسفر و پتاسیم مؤثر بوده‌است درنتیجه سبب بهبود رشد گیاهان می‌شود. نتایج حاصل از این تحقیقات بر افزایش غلظت سیلیسیم در شاخساره و به‌تبع آن افزایش مقدار کل سیلیسیم جذب‌شده با افزایش غلظت سیلیسیم در محلول خاک تحت کاربرد سیلیسیم می‌باشد. کاربرد نانوذرات سیلیسیم نسبت به سطوح مختلف سیلیکات‌پتاسیم باعث افزایش مقدار غلظت سیلیسیم و پتاسیم و همچنین جذب سیلیسیم و پتاسیم در شاخساره شد. بنابراین به نظر می‌رسد که استفاده بهینه از نانوذرات سیلیسیم به دلیل اندازه کوچک، سطح ویژه بالا و واکنش‌پذیری بالا می‌تواند به بهبود رشد گندم کمک کند. به نظر نویسندگان، در گام اول، مروری بر تحقیقات سیلیسیم نشان می دهد این عنصر بی بدیل، لازم است از مهجوریت خارج شده و با توجه به غلظت بالای آن در گیاهان از یک سو و اثرات محرک رشدی و ضد تنشی، به عنوان یک عنصر غذایی ضروری – همگام با دنیا– در کشورمان نیز مورد توجه قرار گیرد. بپذیریم که نقش‌های متنوع این عنصر در شرایط تنش شوری، خشکی، سرما و گرما و آفات و بیماری‌ها دو چندان و بلکه مضاعف می‌باشد. درخصوص عناصری که نقش ذخیره‌ای/ فیزیولوژیک در گیاه دارند (نظیر کلسیم و سیلیسیم) ماهیت موضوع بسیار متفاوت می‌شود. اول اینکه صرف توجه به نتایج آزمون خاک نمی‌تواند مبنای توصیه کودی و تفسیر وضعیت نیاز گیاه در مورد این عناصر باشد و دوم اینکه تأمین نیاز گیاه در این بخش مستلزم تأمینی مستمر و پیوسته و نیز آرام است تا ضمن تسهیل فرایند انتقال عنصر از خاک به ریشه‌ها، امکان تحرک آن در گیاه به اندام‌های زایشی نیز فراهم گردد.

با علم به اینکه وجود سیلیسیم در خاک و به‌خصوص محیط ریزوسفر باعث بهبود ساختمان خاک و فراهمی عناصر و همچنین دفع فلزات سنگین از محیط ریشه گیاه می‌شود، به نظر می‌رسد کاربرد سلیسیم به شکل نانو نیازمند بررسی‌های بیشتر به‌خصوص از جنبه‌ی زیست‌محیطی در خاک‌های مورداستفاده است. با توجه به نتایج یک دهه تحقیق می‌توان گفت که استفاده از سیلیسیم در ترکیب کودی و تغذیه‌ای گیاه استویا و با رعایت سایر عوامل رشدی و محیطی سبب افزایش رشد و عملکرد گیاه استویا می‌شود و کاربرد این عنصر در کنار سایر عناصر غذایی جهت تولید باکیفیت و افزایش عملکرد این گیاه دارویی توصیه می‌شود. مصرف سیلیکات پتاسیم و کود کامل هیومیستار سیلیس برای گیاه استویا توصیه می‌شود هرچند نیازمند مطالعات بیشتر در این زمینه است. جذب بالای سیلیسیم در اندام گیاه در مقایسه با سایر عناصر تاییدی بر جذب لوکس و نیز جذب فعال عنصر سیلیسیم و همچنین سیلیسیم دوست‌بودن گیاه استویا است. همچنین نتایج نشان داد که کاربرد ترکیبی سیلیسیم و باکتری‌های حل‌کننده فسفات (با داشتن اثرات سینرژیستی) به‌همراه خاک فسفات، جایگزین مناسبی برای مصرف کودهای شیمیایی فسفاته در سیستم کشاورزی پایدار خواهد بود. به‌طورکلی مصرف سیلیسیم (با غلظت‌های متفاوت) و باکتری‌های حل‌کننده فسفات، یک روش موثر برای حداکثر تولید گندم در شرایط حضور فسفر محلول و فسفر نامحلول می‌باشد. به بیان

دیگر، مصرف سیلیسیم به آزادسازی فسفر تبادلی از سطح کانی‌های رس منجر شده و در تأمین نیاز گیاه و نیز توصیه‌های کودی می‌تواند قابل توجه باشد. به دیگر سخن، مصرف کودهای سیلیسیم ضمن تأمین نیاز این عنصر در افزایش کارایی مصرف فسفر نیز موثر است. به نظر می‌رسد کاربرد عنصرهای غذایی مانند سیلیسیم به واسطهٔ کمک به بهبود جذب عنصرها و افزایش توان مقاومتی گیاه در برابر تنش‌ها، می‌تواند به عنوان یک ابزار مدیریتی در رویارویی با تنش‌ها مورد توجه قرار گیرد به ویژه آنکه توسعهٔ فضای سبز در مناطق صنعتی ممکن است توأم با رشد در محیط‌های تنش‌زا بوده و این نگرش، می‌تواند به توسعهٔ فضای سبز و افزایش بقای گیاه در برابر تنش‌ها، کمک کند. نتایج این پژوهش نشانگر اثرات سودمند سیلیس در شرایط تنش شوری بر گیاه رز مینیاتور بود. کلید این امر کاهش جذب، انتقال و انباشتگی یون سدیم در بافت‌های حساس می‌باشد که به نظر می‌رسد به علت نقش سیلیس در پایداری دیواره سلول و حفظ انسجام غشاء سلول‌های ریشه باشد. هرچند روشن ساختن این امر پژوهش‌های بیشتر در بیوشیمی و ساختار دیواره و غشاء سلولی را می‌طلبد. این پژوهش‌ها آشکار می‌سازد که افزودن کودهای سیلیکاته به خاک‌های شور می‌تواند اثرات تنش شوری را در گیاه گل رز مینیاتور را کاهش دهد. اگرچه اثرات مفید سیلیس تحت شرایط مطلوب نیز محسوس بود، ولی به نظر می‌رسد زمانی که گیاه در معرض شرایط تنش قرار می‌گیرد، اثرات سودمند سیلیس چشمگیرتر است.

نتایج تحقیقات حاکی از کاهش میزان سیلیسیم محلول و تبادلی با افزایش سطح تنش کم‌آبی بود بطوریکه که کمترین مقادیر در تنش کم‌آبی 0.4FC مشاهده گردید. کمترین میزان سیلیسیم را در فاز محلول مشاهده کردند و بیان کردند که انحلال‌کاهنده اکسیدهای آهن و منگنز ممکن است باعث آزادشدن سیلیسیم در محلول خاک شود. هم غلظت و هم اجزای سیلیسیم موجود در محلول خاک بستگی به ترکیب مواد معدنی، جذب و واجذب، میزان آب، دما و فعالیت های بیولوژیکی دارد. بتدا سیلیس در پی کاهش محتوای آب در خاک رسوب می‌کند، زیرا اشباع سیلیس محلول افزایش می‌یابد. دوم، سیلیس آمورف به دلیل تغییر تکرار شرایط اکسایش، در خاک جمع می‌شود. سینتیک پلیمریزاسیون سیلیسیک اسید و رسوب سیلیس در خاک به تغییرات دمای خاک و pH، مقاومت یونی و غلظت Si در محلول خاک بستگی دارد. کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاه سبب افزایش فراهمی سیلیسیم و افزایش سیلیسیم محلول و تبادلی و کاهش سیلیسیم آمورف شد بطوریکه در بیشترین سیلیسیم محلول و تبادلی به ترتیب در حضور باکتری‌های *psu19.sp*، *Bacillus76.sp* و کنسرسیوم *Bacillus76.sp+psu19.sp* بود که کاهش اندک انحلال احتمالاً به دلیل رقابت دو باکتری در شرایط تنش است. انحلال و در دسترس قرار گرفتن مواد معدنی توسط میکروارگانیسم‌ها به خوبی شناخته است. کاربرد منابع و مقادیر مختلف سیلیسیم نیز نتایج متفاوتی داشت بطوریکه که به ترتیب در تیمار کاربرد ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نانوسیلیسیم، کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نانوسیلیسیم و ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سیلیسیم از منبع سیلیکات‌پتاسیم بیشترین سیلیسیم محلول و تبادلی و کمترین سیلیسیم آمورف حتی در شرایط کمبود آب (تیمار 0.4FC) مشاهده شد که نتایج حاکی از تاثیر بهتر نانوذرات نسبت به منبع سیلیکاته است که احتمالا بعلت اندازه بسیار کوچکتر نانوذرات سبب افزایش دسترسی توسط گیاه و هم توسط باکتری ها شده‌است و از طرفی سطح زیاد این ذرات می توانند بعنوان یک حامل جهت قرارگیری باکتری‌های محرک رشد گیاه باشد که عوامل تنشی آسیب کمتری به باکتری‌های محرک رشد گیاه وارد نموده و نهایتاً با کاربرد نانوذرات سیلیسیمی و باکتری‌های محرک رشد گیاه بصورت همزمان، میزان سیلیسیم محلول و تبادلی در همه‌ی سطوح تنش کم آبی بیشتر از سایر تیمارها بود.

افق‌های پژوهشی پیش رو:

تحقیق در زمینه برهمکنش سیلیسیم با سایر عناصر ضروری پرمصرف و کم‌مصرف

بررسی برهمکنش سیلیسیم با جامعه میکروبی خاک

نقش سیلیسیم در مدیریت تنش‌های زنده و غیرزنده اقلیم‌های مختلف کشور

برهمکنش سیلیسیم با کودهای شیمیایی، آلی، نانو و بیولوژیک

جذب و واجذب سیلیسیم تحت شرایط محیطی (شرایط فیزیکو- شیمیایی مختلف خاک و محیط پیرامون) در خاک‌های مختلف با کلاس‌های بافتی مختلف

سپاس‌گزاری

تهیه این گزارش تحقیقاتی که مروری بر پژوهش‌های یک دهه اخیر دانش‌آموختگان گروه علوم و مهندسی خاک است، فرصتی است مغتنم تا هم مراتب تشکر خود را به جامعه علمی ابراز نماییم و هم با مرور تحقیقات گذشته، افق روشن‌تری برای تداوم هدفمند آن‌را دنبال نمائیم.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Asgari, F., & Diyanat, M. (2021). Effects of silicon on some morphological and physiological traits of rose (Rosa chinensis var. minima) plants grown under salinity stress. *Journal of Plant Nutrition*, *44*(4), 536-549

Ayres, A. S., Takahashi, M., & Kanehiro, Y. (1947). Conversion of nonexchangeable potassium to exchangeable forms in a Hawaiian soil. *Soil Science Society of America Journal, 11*(C), 175-181 .

Babu, T., Tubana, B., Datnoff, L., Yzenas, J., & Maiti, K. (2016). Release and sorption pattern of monosilicic acid from silicon fertilizers in different soils of Louisiana: a laboratory incubation study. *Communications in soil science and plant analysis, 47*(12), 1559-1577 .

Babu, T., Tubana, B., Paye, W., Kanke, Y., & Datnoff, L. (2016). Establishing soil silicon test procedure and critical silicon level for rice in Louisiana soils. *Communications in soil science and plant analysis, 47*(12), 1578-1597.

Barker, A. V., & Pilbeam, D. J. (2015). *Handbook of plant nutrition*. CRC press .

Bélanger, R., Benhamou, N., & Menzies, J. (2003). Cytological evidence of an active role of silicon in wheat resistance to powdery mildew (Blumeria graminis f. sp. tritici). *Phytopathology, 93*(4), 402-412 .

Changmei, L., Chaoying, Z., Junqiang, W., Guorong, W., & Mingxuan, T. (2002). Research of the effect of nanometer materials on germination and growth enhancement of Glycine max and its mechanism. *Soybean Science, 21*(3), 168-171 .

Cornelis, J.-T., Delvaux, B., & Titeux, H. (2010). Article de périodique (Journal article). *Plant Soil, 336*, 99-106 .

Cotterill, J. V., Watkins, R. W., Brennon, C. B., & Cowan, D. P. (2007). Boosting silica levels in wheat leaves reduces grazing by rabbits. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science, 63*(3), 247-253 .

Datnoff, L .E., & Rodrigues, F. (2005). The role of silicon in suppressing rice diseases. *APSnet Features* .

Dobrovolsky, G., Bobrov, A., Gol'eva, A., & Shoba, S. (1988). The opal phytoliths in taiga biogeocenose of media taiga. Biol. Sci

Epstein, E. (1999). Silicon. *Annual review of plant biology, 50*(1), 641-664 .

Etesami, H., & 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* ,۸۹۶–۸۸۱

Etesami, H., & Maheshwari, D. K. (2018). Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects. *Ecotoxicology and environmental safety, 15* ,۶ ۲۴۶–۲۲۵

Fu, F., Akagi, T., & Yabuki, S. (2002). Origin of silica particles found in the cortex of Matteuccia roots. *Soil Science Society of America Journal, 66*(4), 1265-1271 .

Georgiadis, A., Rinklebe, J., Straubinger, M., & Rennert, T. (2017). Silicon fractionation in Mollic Fluvisols along the Central Elbe River, Germany. *Catena, 153*, 100-105 .

Haynes, R. J., Belyaeva, O., & Kingston, G. (2013). Evaluation of industrial wastes as sources of fertilizer silicon using chemical extractions and plant uptake. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 176*(2), 238-248 .

Hutchens, E., Valsami-Jones, E., McEldowney, S., Gaze, W., & McLean, J. (2003). The role of heterotrophic bacteria in feldspar dissolution–an experimental approach. *Mineralogical Magazine, 67*(6), 1157-1170 .

Isa, M., Bai, S., Yokoyama, T., Ma, J. F., Ishibashi, Y., Yuasa, T., & Iwaya-Inoue, M. (2010). Silicon enhances growth independent of silica deposition in a low-silica rice mutant, lsi1. *Plant and soil, 331*(1), 361-375 .

Iwasaki, K., & Matsumura, A. (1999). Effect of silicon on alleviation of manganese toxicity in pumpkin (Cucurbita moschata Duch cv. Shintosa). *Soil Science and Plant Nutrition, 45*(4), 909-920 .

Jiang, H., Manolache, S., Wong, A. C. L., & Denes, F. S. (2004). Plasma-enhanced deposition of silver nanoparticles onto polymer and metal surfaces for the generation of antimicrobial characteristics. *Journal of Applied Polymer Science, 93*(3), 1411-1422 .

Kang, S.-M., Waqas, M., Shahzad, R., You, Y.-H., Asaf, S., Khan ,M. A., Lee, K.-E., Joo, G.-J., Kim, S.-J., &

Lee, I.-J. (2017). Isolation and characterization of a novel silicate-solubilizing bacterial strain Burkholderia eburnea CS4-2 that promotes growth of japonica rice (Oryza sativa L. cv. Dongjin). *Soil Science and Plant Nutrition, 63*(3), 233-241 .

Karathanasis, A. (2002). Mineral equilibria in environmental soil systems. *Soil mineralogy with environmental applications, 7*, 109-151 .

Keeping, M. G. (2017). Uptake of silicon by sugarcane from applied sources may not reflect plant-available soil silicon and total silicon content of sources. *Frontiers in Plant Science, 8*, 760 .

Liebig, J., & Playfair, L. (1843). *Chemistry in its application to agriculture and physiology*. Taylor and Walton London .

Ma, C. C., Li ,Q. F., Gao, Y. B., & Xin, T. R. (2004). Effects of silicon application on drought resistance of cucumber plants. *Soil Science and Plant Nutrition, 50*(5), 623-632 .

Ma, J. F., & Takahashi, E. (2002). Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Elsevier .

Ma, J. F., & Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in plant science, 11*(8), 392-397 .

Malmir, R., Motesharezadeh, B., Tabrizi, L & ,.Bekhradi, F. (2020). Effect of Silicon Sources and Nano Silicon on Some Morphophysiologic Response of Stevia rebaudiana Bertoni. *Iranian Journal of Soil and Water Research, 51*(2), 281-295 .

Marschner, H., & Römheld, V. (1994). Strategies of plants for acquisition of iron. *Plant and soil, 165*(2), 261-274 .

Matichenkov, V., Bocharnikova, E., Calvert, D., & Snyder, G. (2000). Comparison study of soil silicon status in sandy soils of south Florida. Proceedings-Soil and Crop Science Society of Florida ,

Matychenkov, I., Khomyakov, D., Pakhnenko, E., Bocharnikova, E., & Matychenkov, V. (2016). Mobile Si-rich compounds in the soil–plant system and methods for their determination. *Moscow University Soil Science Bulletin, 71*(3), 120-128 .

Mengel, K., & Kirkby, E. (2001). Principles of plant nutrition., 5th edn (Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands) .

Menzies, J., Bowen, P., Ehret, D., & Glass, A. D. (1992). Foliar applications of potassium silicate reduce severity of powdery mildew on cucumber, muskmelon, and zucchini squash. *Journal of the American Society for Horticultural Science, 117*(6), 902-905 .

Milnes, A., & Twidale, C. (1983). An overview of silicification in Cainozoic landscapes of arid central and southern Australia. *Soil Research, 21*(4), 387-410 .

Mirzakhani, M., Motesharezadeh, B., Mirseyed Hosseini, H., & Malmir, R. (2018). Effect of nano-silicon treatments on some physiological and nutritional responses of Lolium perenne in soils contaminated with heavy metals (Pb, Cd and Zn). *Iranian Journal of Horticultural Science, 49*(2), 563-577 .

Mitani, N., & Ma, J. F. (2005). Uptake system of silicon in different plant species. *Journal of experimental botany, 56*(414), 1255-1261 .

Moussa, H. R. (2006). Influence of exogenous application of silicon on physiological response of salt-stressed maize (Zea mays L.). *Int. J. Agric. Biol, 8*(3), 293-297 .

Parviznia, F., Motesharezadeh, B., HOSSEINI, H. M. S., & MAJID, S. (2021). Silicon efficiency in different zea maise cultivars in a calcareous soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research, 52*(5), 1275-1286 .

Ranganathan, S., Suvarchala, V., Rajesh, Y., Prasad, M. S., Padmakumari, A., & Voleti, S. (2006). Effects of silicon sources on its deposition, chlorophyll content, and disease and pest resistance in rice. *Biologia Plantarum, 50*(4), 713-716 .

Rasouli Sadaghiani, M., Sadeghi, S., Barin, M., Sepehr, E., & Dovlati, B. (2017). The Effect of Silicate Solubilizing Bacteria on Potassium Release from Mica Minerals and its Uptake by Corn Plants. *JWSS-Isfahan University of Technology, 20*(78), 89-102 .

Raven, J. A. (2003). Cycling silicon: the role of accumulation in plants. *New Phytologist*, 419-421 .

Rezakhani, L., Motesharezadeh, B., Tehrani, M. M., Etesami, H., & Hosseini, H. M .(۲۰۱۹) .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 .

Rodrigues, F. Á., McNally, D. J., Datnoff, L. E., Jones, J. B., Labbé, C., Benhamou, N., Menzies, J. G., & Bélanger, R. R. (2004). Silicon enhances the accumulation of diterpenoid phytoalexins in rice: a potential mechanism for blast resistance. *Phytopathology, 94*(2), 177-183 .

Shady, M., Ibrahim, I., & Afify, A. (1984). Mobilisation of elements and their effects on certain plant growth characteristics as influenced by some silicate bacteria .

Shamshiripour, M., Motesharezadeh, B., Rahmani, H. A., Alikhani, H. A., & Etesami ,H. (2021). Optimal concentrations of silicon enhance the growth of soybean (Glycine Max L.) cultivars by improving nodulation, root system architecture, and soil biological properties. *Silicon*, 1-13 .

Sheng, X. (2005). Growth promotion and increased potassium uptake of cotton and rape by a potassium releasing strain of Bacillus edaphicus. *Soil Biology and Biochemistry, 37*(10), 1918-1922 .

Snyder, G. H., Matichenkov, V. V., & Datnoff, L. E. (2016). Silicon. In *Handbook of plant nutrition* (pp. 567-584) .CRC Press .

Sposito, G. (2008). *The chemistry of soils*. Oxford university press .

Station, R. E. (1991). Guide to the classical experiments. *Lawes Agricultural Trust, Norfolk, UK*, 31 .

Uroz, S., Calvaruso, C., Turpault, M.-P., Pierrat, J.-C., Mustin, C & „Frey-Klett, P. (2007). Effect of the mycorrhizosphere on the genotypic and metabolic diversity of the bacterial communities involved in mineral weathering in a forest soil. *Applied and environmental microbiology, 73*(9), 3019-3027 .

Valizadeh-rad, K „Motesharezadeh, B., Alikhani, H. A., & Jalali, M. (2021, 2021/04/25). Direct and Residual Effects of Water Deficit Stress, Different Sources of Silicon and Plant-Growth Promoting Bacteria on Silicon Fractions in the Soil. *Silicon*. https://doi.org/10.100/ys12633-021-01120-5

YAN, G.-c., Nikolic, M., YE, M.-j., XIAO, Z.-x., & LIANG, Y.-c. (2018). Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. *Journal of Integrative Agriculture, 17*(10), 2138-2150 .

Yoshida, S. (1965) Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant. *Bull. Nat. Inst. Agr. Sci., 15*, 18-58 .