Plant Prod., 2025, 47(4), 511-521
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2024.47097.2176
Received: 7 June 2024
Accepted: 23 October 2024

Plant Productions

Research Article

Effect of silicates and their dissolving bacteria on growth and yield of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.)

Akbar Aliverdi[1] *, Samira Karami[2]

1. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
2. Ph.D student of Weed Science, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Citation: Aliverdi, A., Karami, S. (2025). Effect of silicates and their dissolving bacteria on growth and yield of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.) *Plant Productions*, 47(4), 511-521.

Abstract

Introduction

Guar forms a weak symbiotic relationship with some strains of bradyrhizobium bacteria, making it important to strengthen this symbiosis. Research on other legumes suggests that soil application of silicates can enhance legume-bacterium symbiosis, leading to improved yields due to increased silicon uptake. However, industrial production of silicates is costly, prompting interest in silicate-dissolving bacteria, which can solubilize native or applied silicates in the soil. These bacteria have been shown to improve silicon and nutrient uptake, resulting in better plant growth and yield. This study aims to investigate the impact of soil-applied silicates (Na_2SiO_3, K_2SiO_3, Ca_2SiO_3, and Mg_2SiO_3) and silicate-dissolving bacteria on the guar-bacterium symbiosis, plant growth, and yield.

Materials and Methods

A pot experiment was performed at Bu-Ali Sina University in 2022 using a two-factor factorial (2×5) design in a completely randomized setup with 10 replications. The first factor included five silicate treatments: control, Na_2SiO_3, K_2SiO_3, Ca_2SiO_3, and Mg_2SiO_3 (applied at 100 mg/kg of soil). The second factor involved soil inoculation with a commercial silicate-dissolving bacterium at two levels: 0 and 10 ml/kg of soil. Sixty days after planting, half of the plants were harvested to measure shoot and root dry weight, nodule number and dry weight, shoot and root nitrogen content, and shoot silicon content. At pod maturity 80% brown pods), the remaining plants were harvested to measure 100-seed weight, seed yield per plant, and seed gum content.

Results and Discussion

All traits, except seed gum content, were significantly affected by the main and interaction effects of silicate application and bacterial inoculation. Without silicate application, silicate-dissolving bacteria increased: nodule number (34%), nodule dry weight (75%), shoot dry weight (42%), silicon content (16%), shoot nitrogen content (15%), root nitrogen content (41%), and seed yield

* **Corresponding Author:** Akbar Aliverdi
E-mail: a.aliverdi@basu.ac.ir

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

per plant (25%). However, root dry weight and 100-seed weight were unaffected by bacterial inoculation. Without bacterial inoculation, application of any silicate significantly increased shoot silicon content. Moreover, the synergistic effect of silicates and silicate-dissolving bacteria further increased shoot silicon content. The highest silicon content (550.1 mg/kg of dry weight) was recorded with the combined application of K_2SiO_3 + silicate-dissolving bacteria. Although the seed gum content remained unaffected, the observed increase in seed yield per plant indicates greater gum production potential at the whole-plant level.

Conclusion

The synergistic interaction between silicates and silicate-dissolving bacteria enhances the efficiency of silicate use in guar cultivation. This approach holds promise for improving guar yields without affecting seed gum content. The increase in seed yield directly translates to higher gum production per plant, making this strategy beneficial for guar farming systems.

Keywords: Galactomannan, Nitrogen content, Silicon content

تولیدات گیاهی، ۱۴۰۳، ۴۷(۴)، ۵۱۱ -۵۲۱
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2024.47097.2176
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۲

تولیدات گیاهی
مقاله پژوهشی

تاثیر سیلیکات‌ها و باکتری حل‌کننده آنها بر رشد و عملکرد گوار(*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.)

اکبر علی‌وردی[1*]، سمیرا کرمی[2]

۱-دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۲-دانشجوی دکتری علوم علف‌های هرز، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

گوار با برخی از سویه‌های باکتری برادی ریزوبیوم رابطه همزیستی ضعیفی تشکیل می‌دهد. بنابراین، دست‌یابی به یک همزیستی قوی‌تر در گوار حائز اهمیت است. در گیاهان لگوم که گوار شامل آنها نمی‌شود نشان داده شده است که همزیستی گیاهان لگوم با ریزوبیوم با کاربرد سیلیکات‌ها در خاک به واسطه جذب سیلیس بهبود می‌یابد و موجب بهبود عملکرد می‌شود. از آنجایی که تولید سیلیکات‌ها در صنعت پُرهزینه است، اخیراً، تمرکز مطالعات به توانایی باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات در خاک معطوف است. در برخی گیاهان زراعی، تلقیح خاک با باکتری حل‌کننده سیلیکات‌ها موجب حل شدن سیلیکات‌های موجود در خاک شده و جذب بهتر سیلیس و حتی دیگر عناصر غذایی، را به دنبال داشته است. در پژوهش حاضر تاثیرپذیری همزیستی گیاه گوار با ریزوبیوم از کاربرد خاکی انواع سیلیکات‌ها (سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم) و تلقیح خاک با باکتری حل‌کننده سیلیکات را مورد بررسی قرار گرفت. این پژوهش به صورت گلدانی در محوطه دانشگاه بوعلی سینا در ۱۴۰۱ به صورت فاکتوریل دو عاملی (۲×۵) بر پایه طرح کاملاً تصادفی با ۱۰ تکرار انجام گرفت. عامل اول شامل نوع سیلیکات در پنج سطح شامل شاهد، سیلیکات سدیم، سیلیکات پتاسیم، سیلیکات کلسیم و سیلیکات منیزیم بود. سیلیکات‌ها به میزان ۱۰۰ میلی‌گرم در هر کیلوگرم خاک بکار رفتند. عامل دوم شامل تلقیح خاک با مایه تجاری باکتری حل‌کننده سیلیکات در دو سطح صفر و ۱۰ میلی‌لیتر در هر کیلوگرم خاک بود. شصت روز پس از کاشت، گیاهان نیمی از تکرارهای آزمایش برای اندازه‌گیری وزن خشک اندام هوایی و ریشه، تعداد و وزن خشک گره، محتوی نیتروژن اندام هوایی و ریشه و محتوی سیلیس اندام هوایی برداشت شدند. هنگامی که ۸۰ درصد غلاف‌ها قهوه‌ای شدند، گیاهان نیمه دیگر از تکرارهای آزمایش برای اندازه‌گیری وزن ۱۰۰ دانه، عملکرد دانه در بوته و محتوای صمغ دانه برداشت شدند. نتایج نشان داد که بجز محتوای صمغ بذر، سایر صفات تحت تاثیر اثر اصلی و متقابل بین عوامل مورد بررسی قرار گرفتند. تحت شرایط عدم کاربرد سیلیکات‌ها، وزن خشک ریشه و وزن ۱۰۰ دانه گوار تحت تاثیر تلقیح خاک با باکتری حل‌کننده سیلیکات قرار نگرفت. تلقیح خاک با باکتری حل‌کننده سیلیکات

* **نویسنده مسئول:** اکبر علی‌وردی
رایانامه: a.aliverdi@basu.ac.ir

تحت شرایط عدم کاربرد سیلیکات‌ها موجب افزایش تعداد گره (۳٤ درصد)، وزن خشک گره (۷۵ درصد)، وزن خشک اندام هوایی (٤۲ درصد)، محتوای سیلیس (١٦ درصد)، محتوای نیتروژن اندام هوایی (۱۵ درصد)، محتوای نیتروژن ریشه (٤۱ درصد) و عملکرد دانه در بوته (۲۵ درصد) شد. تحت شرایط عدم تلقیح خاک با باکتری حل کننده سیلیکات، کاربرد تمامی انواع سیلیکات‌ها به طور معنی‌دار و به میزان برابر از نظر آماری محتوای سیلیس اندام هوایی گوار را افزایش داد. همچنین، با کاربرد توام هر کدام از سیلیکات‌ها و تلقیح خاک با باکتری حل کننده سیلیکات محتوای سیلیس اندام هوایی گوار به میزان بیشتری در مقایسه با کاربرد به تنهایی آنها افزایش پیدا کرد. بیشترین محتوی سیلیس (۵۵۰/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار کاربرد سیلیکات پتاسیم توام با تلقیح خاک با باکتری حل کننده سیلیکات مشاهده شد. وجود اثر هم‌افزایی کاربرد سیلیکات‌ها و باکتری حل-کننده آنها بر ویژگی‌های مورد بررسی در گوار مشاهده شد که می‌توان باعث کاربرد موثرتر سیلیکات‌ها در مزارع گردد. اگرچه کاربرد سیلیکات‌ها و باکتری حل‌کننده آنها بر محتوای صمغ بذر گوار تأثیری نداشت، ولی برآیند افزایش عملکرد دانه در بوته افزایش تولید صمغ در هر بوته است.

کلید واژه‌ها: گالاکتومانان، محتوی سیلیس، محتوی نیتروژن

مقدمه

گوار[1] متعلق به تیره لگوم‌هاست و عمدتاً در مناطق گرمسیری نیمه خشک در سراسر جهان برای به دست آوردن بذرهایش که حاوی مقدار قابل توجهی پلیمر خنثی گالاکتومانان[2] (صمغ گوار) است کشت و کار می‌شود. صمغ گوار به عنوان قوام دهنده و تثبیت کننده به طور گسترده در صنایع غذایی استفاده می‌شود (Hinson and Adams, 2020). علاوه بر این، اندام‌های هوایی گوار برای تعلیف دام نیز استفاده می‌شود. همانند دیگر لگوم‌ها، گوار با برخی گونه‌های ریزوبیوم (*Bradyrhizobium* sp.) رابطه همزیستی ضعیفی تشکیل می‌دهد (MacMillan *et al*., 2021). در این همزیستی، گوار مقداری کربوهیدرات به باکتری جهت تامین انرژی مورد نیازش اختصاص می‌دهد؛ در مقابل، باکتری نیتروژن اتمسفری را به شکل آمونیاک تثبیت می‌کند و آنرا در اختیار گوار قرار می‌دهد. در تحقیقات گذشته، نتیجه همزیستی گیاه گوار با ریزوبیوم تثبیت ۴۰ (Buttar *et al*., 2009) تا ۵۵ (Mubarak *et al*., 2015) کیلوگرم نیتروژن در هکتار در سال اندازه‌گیری شده است که این میزان تثبیت زیستی نیتروژن در مقایسه با سایر لگوم‌ها بسیار کمتر است. لذا، برای دست‌یابی به یک همزیستی قوی‌تر در گوار باید روی عوامل موثر بر آن تمرکز کرد تا ضمن بهبود عملکرد اقتصادی گوار (Shrestha *et al*., 2021)، هزینه‌های آشکار و پنهان کاربرد کود نیتروژن را نیز کاهش داد تا از آلودگی آب‌های زیرزمینی با نیترات و هوا با اکسید نیتروژن کاست (Ribeiro *et al*., 2021).

از این رو، محققان عواملی را تاثیرگذار بر همزیستی گیاه گوار با ریزوبیوم اعلام کردند که عبارتند از: ژنوتیپ گوار (Shrestha *et al*., 2021)، سویه باکتری (MacMillan *et al*., 2021)، تناوب زراعی (Mubaraket *et al*., 2015)، دمای خاک (Arayangkoon et al., 1990)، بافت خاک (Hinson and Adams, 2020)، علف‌کش (Aliverdi and Khorshidvand, 2024)، تنش خشکی (Shrestha *et al*., 2021) و دسترسی به عناصر ضروری برای تغذیه گیاهان، مثل کلسیم (Bell *et al*., 1989)، نیتروژن

1- *Cyamopsis tetragonoloba*
2- Galactomannan

(Hinson and Adams, 2020) و فسفر (Gresta et al., 2019).

اگرچه سیلیس، پس از اکسیژن، دومین عنصر فراوان در زمین است ولی به عنوان عنصری غیر ضروری برای تغذیه گیاهان تشخیص داده شده است (Ghasemi *et al*., 2020). با این حال، گیاهان آنرا جذب و در بافت‌های خود نگهداری می‌کنند. محققان گزارش کردند که کاربرد انواع سیلیکات‌ها در خاک می‌تواند رشد و عملکرد برخی از لگوم‌ها مانند نخود[1] (Garg and Bhandari, 2016)، نخود دانه کبوتری[2] (Owino-Gerroh *et al*., 2005)، سِزبانیا[3] (Kurdali *et al*., 2019)، یونجه زراعی[4] (Johnson *et al*., 2017)، یونجه سربریده[5] (Putra *et al*, 2022)، لوبیا چشم‌بلبلی[6] (Mali *et al*., 2008)، لوبیا[7] (Zuccarini, 2008)، ماش[8] (Mahmood *et al*., 2017)، بادام زمینی[9] (Ruban and Jeyaramraja, 2023) و سویا[10] (Shahzad *et al*., 2013) را از طریق بهبود همزیستی گیاهان لگوم با ریزوبیوم باکتریی افزایش دهد.

سیلیس عمدتاً به شکل سیلیکات‌های منیزیم، کلسیم، سدیم، پتاسیم، آلومنیوم و آهن در فاز جامد خاک یافت می‌شود که معمولاً به دلیل ماهیت نامحلول و غیر متحرک بودن آنها برای جذب گیاهان کاملاً در دسترس نیستند. در فاز مایع خاک، سیلیس به شکل اسید سیلیسیک به مقدار کم موجود است که در طی فرآیند هوازدگی سیلیکات‌ها به وجود می‌آید و تنها شکلی از سیلیس است که گیاهان می‌توانند آنرا جذب کنند (Joshi *et al*., 2023). از آنجایی که تولید انواع سیلیکات‌ها در صنعت پُرهزینه است، اخیراً، تمرکز مطالعات به توانایی باکتری حل‌کننده سیلیکات‌های موجود و بکار رفته در خاک معطوف شده است. به طوری که محققان نشان دادند که تلقیح خاک با باکتری حل‌کننده سیلیکات موجب افزایش جذب سیلیس و عملکرد در ذرت[11] (Sari *et al*., 2022)، برنج[12] (Chaganti *et al*., 2023)، نیشکر[13] (Anitha *et al*., 2023)، بادام زمینی (Ruban and Jeyaramraja, 2023) و گشنیز[14] (Nath *et al*., 2022) شده است. باکتری حل کننده سیلیکات ترکیبات اسیدی متعددی به محیط خاک رها می‌کند که موجب هوازدگی سریعتر انواع سیلیکات‌ها و جذب بهتر سیلیس (Joshi *et al*., 2023) و حتی جذب بهتر سایر عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم (Maleva *et al*., 2017) در گیاهان می‌شوند.

هدف از پژوهش حاضر بررسی تاثیر حل کننده سیلیکات بر انحلال انواع سیلیکات‌های به کار رفته در خاک و بهبود عملکرد گیاه گوار است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت گلدانی در محوطه دانشگاه بوعلی سینا در ۱۴۰۱ به صورت فاکتوریل دو عاملی (۲×۵) بر پایه طرح کاملاً تصادفی با ۱۰ تکرار انجام گرفت. عامل اول شامل نوع سیلیکات در پنج سطح شامل شاهد، سیلیکات سدیم، سیلیکات پتاسیم، سیلیکات کلسیم و سیلیکات منیزیم بود. سیلیکات‌ها به میزان ۱۰۰ میلی‌گرم در هر کیلوگرم خاک بکار رفتند. عامل دوم شامل تلقیح خاک با مایه تجاری باکتری حل‌کننده سیلیکات (سونکول، هند) در دو سطح صفر و ۱۰ میلی‌لیتر در هر کیلوگرم خاک بود.

1- Cicer arietinum
2- Cajanus cajan
3- Sesbania rostrata
4- Medicago sativa
5- Medicago truncatula
6- Vigna unguiculata
7- Phaseolus vulgaris
8- Vigna radiata
9- Arachis hypogaea
10- Glycine max

11- Zea mays
12- Oryza sativa
13- Saccharum officinarum
14- Coriandrum sativum

در تاریخ ۱۴۰۱/۳/۲، بذرهای گوار (توده سراوان) به مدت ۱۵ دقیقه در مایه تلقیح باکتری *Bradyrhizobium* سویه CB3035 با جمعیت 10^5 باکتری در هر میلی‌لیتر قرار داده شد و سپس، در هر گلدان حاوی ۵ کیلوگرم خاک، چهار بذر گوار تلقیح شده با باکتری در عمق یک سانتی-متری کاشته شد. خاک استفاده شده در آزمایش از مزرعه مجاور دانشگاه جمع‌آوری شده بود که دارای بافت لوم شنی بود. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک در جدول ۱ ذکر شده است. تعداد ۱۰ گلدان شاهد که فاقد باکتری و بدون افزودن سیلیکات بود نیز برای مقایسه در نظر گرفته شد. گلدان‌ها در محیط آزاد (بیرون گلخانه) قرار گرفتند. گیاهان هر سه روز یک بار و هر بار به میزان یکسان آبیاری شدند. بلافاصله پس از سبز شدن، گیاهان به دو بوته در هر گلدان تنک شدند. در زمان اجرای آزمایش (خرداد، تیر و مرداد)، میانگین حداقل دمای هوا به ترتیب ۱۱/۲، ۱۳/۹ و ۱۴/۸ درجه سانتی‌گراد بود و میانگین حداکثر دمای هوا به ترتیب ۲۵/۲، ۳۳/۱ و ۳۴/۹ درجه سانتی‌گراد بود و هیچ بارندگی رخ نداد.

شصت روز پس از کاشت (۱۴۰۱/۴/۳۰)، گیاهان نیمی از تکرارهای آزمایش برای اندازه‌گیری وزن خشک اندام هوایی و ریشه، تعداد و وزن خشک گره، محتوی نیتروژن اندام هوایی و ریشه و محتوی سیلیس اندام هوایی برداشت شدند. برای اندازه‌گیری محتوی نیتروژن اندام هوایی و ریشه، ۵۰ میلی‌گرم از مواد گیاهی آسیاب شده جهت هضم به روش میکروکجلدال بکار برده شد (Anonymous, 2016). برای اندازه‌گیری محتوی سیلیس اندام هوایی گوار، روش ارائه شده به وسیله Saito *et al.* (2005) دنبال شد. بدین ترتیب که نیم گرم از مواد گیاهی خشک شده به ۱۰ میلی‌لیتر محلول ۱/۵ مولار اسید هیدروفلوریک + ۰/۶ مولار اسید هیدروکلریک اضافه شد. پس از ۱ ساعت، ۴۰ میلی لیتر آب مقطر اضافه و به مدت ۲۰ دقیقه هم زده شد. صد میلی‌گرم از مایع رویی برداشت و به ۲ میلی‌لیتر هپتامولیبدات آمونیوم اضافه شد. پس از ۵ دقیقه، ۴ میلی‌لیتر اسید سیتریک ۰/۱ مولار اضافه و با آب مقطر به حجم ۱۰ میلی لیتر رسانده شد. سپس، با استفاده از طیف‌سنج فرابنفش-مرئی (مدل پرتو دوگانه DS5) جذب نمونه در طیف ۴۰۰ نانومتر ثبت گردید.

در تاریخ ۱۴۰۱/۵/۲۸، هنگامی که ۸۰ درصد غلاف‌ها قهوه‌ای شدند، گیاهان نیمه دیگر از تکرارهای آزمایش برای اندازه‌گیری وزن ۱۰۰ دانه، عملکرد دانه در بوته و محتوای صمغ دانه برداشت شدند. روش ارائه شده به وسیله Naik *et al.* (2013) برای اندازه‌گیری محتوای صمغ بذر-ها دنبال شد. بدین ترتیب که بذرها آسیاب شدند و آرد حاصله در آون با ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت نگهداری و سپس توزین گردید. سپس، آرد با نسبت ۱ به ۵ به آب مقطر اضافه گردید. پس از ۵ ساعت، ترکیب هم زده شد و برای مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شد. سپس، ۵۰ میلی‌لیتر ایزوپروپانول به آن اضافه گردید. با کمک یک صافی، توده رویی (صمغ) خارج و پس از خشک شدن در دمای اتاق، توزین گردید. محتوای صمغ به صورت درصد وزن صمغ به وزن آرد محاسبه گردید.

داده‌ها با استفاده از دستور PROC GLM در محیط نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ تجزیه و تحلیل شدند. نتایج آزمون Shapiro-Wilk نرمال بودن باقیمانده‌ها را تایید کرد. مقایسه میانگین‌ها با کمک آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

Table 1. Physicochemical properties of the soil used in the study.

Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Electrical conductivity (dS/m)	pH	Organic matter (%)	P (ppm)	K (ppm)	N (%)
12.2	27.2	60.5	2.1	7.6	1	47.2	368.2	0/1

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی هر دو عامل مورد بررسی (نوع سیلیکات و تلقیح خاک با باکتری حل‌کننده سیلیکات) بر صفات اندازه‌گیری شده در گوار (بجز محتوای صمغ بذر) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول‌های ۲ و ۳). همچنین، نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرمتقابل بین عوامل مورد بررسی بر وزن خشک ریشه گوار و محتوای نیتروژن اندام هوایی آن در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود. این در حالی بود که سایر صفات (بجز محتوای صمغ بذر) در سطح احتمال یک درصد تحت تاثیر اثرمتقابل بین عوامل مورد بررسی قرار گرفتند. محتوای صمغ بذر گوار تحت تاثیر اثر اصلی و متقابل عوامل مورد بررسی قرار نگرفت.

در شرایط عدم کاربرد سیلیکات‌ها، تنها دو صفت وزن خشک ریشه و وزن ۱۰۰ دانه گوار تحت تاثیر تلقیح خاک با باکتری حل‌کننده سیلیکات قرار نگرفت (جدول‌های ۴ و ۵). در حالی که تلقیح خاک با باکتری حل‌کننده سیلیکات تحت شرایط عدم کاربرد سیلیکات‌ها موجب افزایش تعداد گره (۳۴ درصد)، وزن خشک گره (۷۵ درصد)، وزن خشک اندام هوایی (۴۲ درصد)، محتوای سیلیس اندام هوایی (۱۶ درصد)، محتوای نیتروژن اندام هوایی (۱۵ درصد)، محتوای نیتروژن ریشه (۴۱ درصد) و عملکرد دانه در بوته (۲۵ درصد) شد. این نتایج نشان می‌دهد که با تلقیح خاک با باکتری حل‌کننده سیلیکات، کانی‌های سیلیکاتی موجود خاک حل شده و موجب افزایش دسترسی و جذب سیلیس برای گوار شده است. در نتیجه، سایر شاخص‌های رشدی گوار به واسطه افزایش محتوای سیلیس بهبود یافته است. تحت شرایط عدم کاربرد سیلیکات‌ها، محققان (Nath *et al*., 2022) گزارش کردند که تلقیح خاک با سویه‌های مختلف باکتری حل‌کننده سیلیکات موجب افزایش ۲۹ تا ۳۲ درصدی محتوای سیلیس برگ گشنیز در ۵۰ روز پس از کاشت شد. این امر موجب بهبود معنی‌دار شاخص محتوای کلروفیل‌ها و عملکرد برگ گشنیز شد.

Table 2. ANOVA (mean square) of studied traits in guar.

Source	df	Nodule	NDW	SDW	RDW	SiC
SSB	1	677.12**	358111.84**	196.02**	9.24**	215482.99**
Silicate	4	74.83**	36236.35**	22.28**	1.98**	121756.22**
SSB × Silicate	4	20.93**	4939.98**	2.32**	0.19*	6048.67**
Error	40	0.98	398.80	0.54	0.05	373.44
CV (%)	–	7.06	5.27	7.65	8.98	5.79

ns, * and ** shows non significant, significant at 1 and 5 % probability levels based on the Duncan's multiple range test, respectively. Abbreviations: silicate-dissolving bacteria (SSB), nodule dry weight (NDW), shoot dry weight (SDW), root dry weight (RDW), and silicon content (SiC).

Table 3. ANOVA (mean square) of studied traits in guar.

Source	df	SNC	RNC	100-SW	SY	SGC
SSB	1	861.12**	264.50**	2.37**	62.54**	44.65^{ns}
Silicate	4	171.38**	41.67**	1.25**	14.58**	8.91^{ns}
SSB × Silicate	4	40.88*	17.67**	0.29**	1.74**	1.91^{ns}
Error	40	11.95	0.23	0.02	0.07	13.45
CV (%)	–	9.67	6.91	8.52	6.37	9.79

ns, * and ** shows non significant, significant at 1 and 5 % probability levels based on the Duncan's multiple range test, respectively. Abbreviations: silicate-dissolving bacteria (SSB), shoot nitrogen content (SNC), root nitrogen content (RNC), 100-seed weight (100-SW), seed yield per plant (SY), and seed gum content (SGC).

تحت شرایط عدم تلقیح خاک با باکتری حل کننده سیلیکات، کاربرد تمامی انواع سیلیکات‌ها به طور معنی‌دار و به میزان برابر از نظر آماری محتوای سیلیس اندام هوایی را افزایش داد (جدول ۴) و با کاربرد توام سیلیکات‌ها و تلقیح خاک با باکتری حل کننده سیلیکات محتوای سیلیس اندام هوایی گوار به میزان بیشتری افزایش پیدا کرد. بالاترین محتوی سیلیس در تیمار کاربرد سیلیکات پتاسیم توام با تلقیح خاک با باکتری حل کننده سیلیکات مشاهده شد. این یافته همانند تحقیقات قبلی (Nath *et al*., 2022; Anitha *et al*., 2023) حاکی از بهبود کارایی مصرف سیلیکات‌ها به وسیله کاربرد باکتری حل کننده سیلیکات می‌باشد.

وجود اثر هم‌افزایی کاربرد سیلیکات و باکتری حل‌کننده آن بر سایر ویژگی‌های گوار نیز مشاهده شد (جدول‌های ۴ و ۵). برای مثال، تحت شرایط عدم تلقیح خاک با باکتری حل کننده خاک، عملکرد دانه در بوته گوار با کاربرد سیلیکات-های سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم به ترتیب به میزان ۱۱، ۳۹، ۲۱ و ۱۱ درصد افزایش یافت. در حالی که با تلقیح خاک با باکتری حل کننده خاک مقادیر فوق به ترتیب به ۵۰، ۷۱، ۵۰، ۴۲ درصد افزایش پیدا کرد. در یافته فوق ملاحظه می‌شود که کارآمدی سیلیکات پتاسیم در مقایسه با دیگر انواع سیلیکات‌ها در بهبود عملکرد گوار بیشتر است.

به طور مشابه، اثر هم‌افزایی کاربرد سیلیکات و باکتری حل-کننده آن بر رشد ذرت (Sari et al., 2022)، برنج (Chaganti *et al*., 2023)، نیشکر (Anitha *et al*., 2023)، بادام زمینی (Ruban and Jeyaramraja, 2023) و گشنیز (Nath *et al*., 2022) گزارش شده است. باکتری حل‌کننده سیلیکات ترکیبات اسیدی متعدد، از جمله ایندول اسیتیک اسید (Ruban and Jeyaramraja, 2023)، به محیط خاک رها می‌کند که موجب هوازدگی سریعتر انواع سیلیکات‌ها و تبدیل آنها اسید سیلیسیک می‌شود که قابل جذب برای گیاهان می‌باشد (Joshi *et al*., 2023).

Table 4. Effect of silicates and silicate-dissolving bacteria (SSB) on the growth and yield traits of guar inoculated with *Bradyrhizobium* sp. CB3035.

Treatments		Nodule (no./plant)	NDW (mg/plnat)	SDW (g/plant)	RDW (g/plant)	SiC (mg/kg)
Control $_{\text{not included in ANOVA}}$		0	0	4.2	1.1	130.2
(–) SSB	Control	8.7 d	209.4 c	6.1 c	1.8 c	165.5 d
	Na_2SiO_3	9.6 cd	289.6 bc	8.1 b	2.1 c	326.0 c
	K_2SiO_3	11.4 c	327.5 b	8.7 b	2.7 bc	319.1 c
	Ca_2SiO_3	9.3 cd	388.5 b	6.7 bc	2.1 c	285.9 c
	Mg_2SiO_3	10.7 c	317.5 b	6.8 bc	2.1 c	281.2 c
(+) SSB	Control	11.7 c	367.5b	8.7 b	2.2 c	192.6 c
	Na_2SiO_3	16.3 b	485 a	10.7 a	2.9 b	410.2 b
	K_2SiO_3	22.3 a	517.5 a	12.1 a	3.8 a	550.1 a
	Ca_2SiO_3	19.3 ab	485 a	10.9 a	3.1 b	431.2 b
	Mg_2SiO_3	17.9 b	523.8 a	10.7 a	3.1 b	410.5 b

In each evaluated trait, the values with the same letters are not different based on the Duncan's multiple range test at $\alpha = 0.05$. Control $_{\text{not included in ANOVA}}$ was not inoculated with rhizobium and it was planted in soil without silicate application and not inoculated with silicate-dissolving bacteria. Abbreviations: nodule dry weight (NDW), shoot dry weight (SDW), root dry weight (RDW), and silicon content (SiC).

Table 5. Effect of silicates and silicate-dissolving bacteria (SSB) on the growth and yield traits of guar inoculated with *Bradyrhizobium* sp. CB3035.

Treatments		SNC (mg/g)	RNC (mg/g)	100-SW (g)	SY (g/plant)	SGC (%)
Control $_{\text{not included in ANOVA}}$		9.1	2.4	1.3	1.7	28.0
(–) SSB	Control	13.8 d	3.6 d	1.4 c	2.8 d	28.8 a
	Na_2SiO_3	15.6 cd	4.6 c	1.8 b	3.1 c	33.2 a
	K_2SiO_3	17.9 c	4.7 c	1.8 b	3.9 b	28.5 a
	Ca_2SiO_3	18.3 c	4.6 c	1.7 bc	3.4 c	29.3 a
	Mg_2SiO_3	18.3 c	6.5 bc	1.9 b	3.1 c	31.5 a
(+) SSB	Control	15.9 cd	5.1 c	1.3 c	3.5 c	30.9 a
	Na_2SiO_3	22.8 b	7.1 b	2.7 a	4.2 ab	32.8 a
	K_2SiO_3	31.9 a	13.7 a	2.6 a	4.8 a	32.5 a
	Ca_2SiO_3	28.4 ab	8.9 b	2.4 ab	4.2 ab	30.4 a
	Mg_2SiO_3	25.4 b	7.2 b	2.3 ab	4.0 b	34.2 a

In each evaluated trait, the values with the same letters are not different based on the Duncan's multiple range test at $\alpha = 0.05$. Control $_{\text{not included in ANOVA}}$ was not inoculated with rhizobium and it was planted in soil without silicate application and not inoculated with silicate-dissolving bacteria. Abbreviations: shoot nitrogen content (SNC), root nitrogen content (RNC), 100-seed weight (100-SW), seed yield per plant (SY), and seed gum content (SGC).

علاوه بر این، محققان گزارش کردند که تلقیح خاک با باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات‌ها نقش موثری در بهبود تغذیه باقلا[1] (Hafez *et al*., 2021) و خردل هندی[2] (Maleva *et al*., 2017) از سایر عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم و افزایش زیست توده آنها شدند. محققان نشان دادند که سیلیس در تنظیم سیگنال‌های سیستمیک، مانند اسید سالیسیلیک، اسید جاسمونیک و اتیلن در گیاهان نقش دارد. هنگامی که سیگنال‌های سیستمیک به بافت‌های هدف خود می‌رسند، حالتی از سازگاری اکتسابی سیستمیک و یا دفاع را در آنها ایجاد می‌کنند که منجر به انعطاف‌پذیری بالاتر گیاهان در برابر تنش می‌شود (Ye *et al*., 2013; Aliverdi and Jalilifard, 2024).

نتیجه‌گیری

وجود اثر هم‌افزایی کاربرد سیلیکات‌ها و باکتری حل‌کننده آنها بر ویژگی‌های مورد بررسی در گوار مشاهده شد. اگرچه کاربرد سیلیکات‌ها و باکتری حل‌کننده آنها بر محتوای صمغ بذر گوار تأثیری نداشت، ولی برآیند افزایش عملکرد دانه در بوته به واسطه کاربرد سیلیکات‌ها و باکتری حل‌کننده آنها منتج به افزایش تولید صمغ در هر بوته است. از این رو، پیشنهاد می‌شود در بررسی‌های مزرعه‌ای، نتیجه این افزایش عملکرد گوار مورد توجه قرار گیرد. با توجه وجود پیشینه مستند در رابطه با عمل ایمن‌سازی سیلیس برای گیاهان در برابر تنش علف‌کشی، ممکن است کاربرد سیلیکات و باکتری حل‌کننده آن موجب کاهش کارایی علف‌کش‌های اختصاصی گوار علیه علف‌های هرز شود. از این رو، لازم است این موضوع نامطلوب در تحقیقات آینده مورد توجه و بررسی قرار گیرد.

سپاس‌گزاری

بخشی از هزینه‌های اجرایی این پژوهش توسط حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا همدان تامین گردید که بدین وسیله صمیمانه تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

1- Vicia faba
2- Brassica juncea

References

Aliverdi, A., & Khorshidvand, Y. (2024). Melatonin mitigation of herbicide-induced injury to guar crop improves nodulation. *Rhizosphere*, 29, 100866.

Aliverdi, A., & Jalilifard, F. (2024). Effect of silicon application on the resistance of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) to field dodder (*Cuscuta campestris* Yunck.). *Journal of Sugar Beet*, 39, In Press.

Anonymous. (2016). Oicial methods of analysis of AOAC international, 20th edn. Latimer GW (ed). AOAC International, Washington, DC

Anitha, R., Vanitha, K., Tamilselvi, Jeyakumar, C.P., Vijayalakshmi, D., Yuvaraj, M., Nageswari, R., Dhanushkodi, V., & Cyriac, J. (2023). Potential applications of silicate solubilizing bacteria and potassium silicate on sugarcane crop under drought condition. *Silicon*, 15, 6879-6887.

Arayangkoon, T., Schomberg, H.H., & Weave. R.W. (1990). Nodulation and N_2 fixation of guar at high root temperature. *Plant and Soil*, 126(2), 209-213.

Bell, R., Edwards, D., & Asher, C. (1989). External calcium requirements for growth and nodulation of six tropical food legumes grown in flowing culture solution. *Australian Journal of Agricultural Research*, 40(1), 85-96.

Buttar, G., Thind, H., Saroa, G., & Grover, K. (2009). Performance of wheat (*Triticum aestivum*) as influenced by N fertilization in cluster-bean (*Cyamopsis tetragonoloba*)-wheat (*Tritcum aestivum*) system. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 79(4), 302-304.

Chaganti, C., Phule, A.S., Chandran, L.P., Sonth, B., Kavuru, V.P.B., Govindannagari, R., & Sundaram, R.M. (2023). Silicate solubilizing and plant growth promoting bacteria interact with biogenic silica to impart heat stress tolerance in rice by modulating physiology and gene expression. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1168415.

Garg, N., & Bhandari, P. (2016). Silicon nutrition and mycorrhizal inoculations improve growth, nutrient status, K^+/Na^+ ratio and yield of *Cicer arietinum* L. genotypes under salinity stress. *Plant Growth Regulation*, 78, 371-387.

Ghasemi, K., Sepanlou, M.G., & Hadadinejad, M. (2020). Effect of silicon nutrition on strawberry cv. camerosa yield and growth in outdoor hydroponic system. *Plant Productions*, 43(1), 93-106. [In Persian]

Gresta, F., Trostle, C., Sortino, O., Santonoceto, C., & Avola, G. (1019). Rhizobium inoculation and phosphate fertilization effects on productive and qualitative traits of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.). *Industrial Crops and Products*, 139, 111513.

Hafez, E.M., Osman, H.S., El-Razek, U.A.A., Elbagory, M., Omara, A.E.-D., Eid, M.A., & Gowayed, S.M. (2021). Foliar-applied potassium silicate coupled with plant growth-promoting rhizobacteria improves growth, physiology, nutrient uptake and productivity of faba bean (*Vicia faba* L.) irrigated with saline water in salt-affected soil. *Plants*, 10(5), 894.

Hinson, P.O., & Adams, C.B. (2020). Quantifying tradeoffs in nodulation and plant productivity with nitrogen in guar. *Industrial Crops and Products*, 153, 112617.

Johnson, S.N., Hartley, S.E., Ryalls, J.M.W., Frew, A., DeGabriel, J.L., Duncan, M., & Gherlenda, A.N. (2017). Silicon-induced root nodulation and synthesis of essential amino acids in a legume is associated with higher herbivore abundance. *Functional Ecology*, 31(10), 1903-1909.

Joshi, A., Mahawar, S., Kajala, R., Chauhan S., & Jain, D. (2023). Importance of silica solubilising bacteria in agriculture. *The Pharma Innovation Journal*, 12(4), 133-139.

Kurdali, F., Al-Chammaa, M., & Al-Ain, F. (2019). Growth and N_2 fixation in saline and/or water stressed *Sesbania aculeata* plants in response to silicon application. *Silicon*, 11, 781-788.

MacMillan, J., Adams, C.B., Trostle, C., & Rajan, N. (2021). Testing the efficacy of existing USDA Rhizobium germplasm collection accessions as inoculants for guar. *Industrial Crops and Products*, 161, 113205.

Mahmood, S., Daur, I., Hussain, M.B., Nazir, Q., Al-Solaimani, S.G., Ahmad, S., Bakhashwain, A.A., & Elsafor, A.K. (2017). Silicon application and rhizobacterial inoculation regulate mung bean response to saline water irrigation. *Clean*, 45, 1600436.

Maleva, M., Borisova, G., Koshcheeva, O., & Sinenko, O. (2017). Biofertilizer based on silicate solubilizing bacteria improves photosynthetic function of *Brassica juncea*. *AGROFOR International Journal*, 2(3), 13-19.

Mali, M., & Aery Naresh, C. (2008). Silicon effects on nodule growth, dry-matter production, and mineral nutrition of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(6), 835-840.

Mubarak, A.R., Salih, N.O., & Hassabo, A.A. (2015). Fate of ^{15}N-labeled urea under a guar-wheat rotation as influenced by crop residue incorporation in a semi-arid Vertisol. *Tropical Agriculture*, 92(3), 172-183.

Naik, C.S.R., Ankaiah, R., Sudhakar, P., Reddy, T.D., Murthy, V.R., Spandana B., & Jatothu, J.L. (2013). Variation in the protein and galactomannan content in guar seeds of different genotypes. *Plant Archives*, 13(1), 247-252.

Nath, D., Selvi, D., Thiyageshwari, S., Anandham, R., & Venkatesan, K. (2022). Silicon sources and bacterial inoculants on growth parameters, leaf yield, quality of coriander (*Coriandrum sativum* L.) and soil adsorbed silicon in sandy loamy soil. *International Journal of Plant and Soil Science*, 34(22), 194-208.

Owino-Gerroh, C., Gascho, G.J., & Phatak, S.C. (2005). Pigeonpea response to silicon, phosphorus, and Rhizobium inoculation in an acid coastal plain soil. *Journal of Plant Nutrition*, 28(5), 797-804.

Putra, R., Waterman, J.M., Mathesius, U., Wojtalewicz, D., Powell, J.R., Hartley, S.E., & Johnson, S.N. (2022). Benefits of silicon-enhanced root nodulation in a model legume are contingent upon rhizobial efficacy. *Plant and Soil*, 477, 201-217.

Ribeiro, V.H.V., Maia, L.G.S., Arneson, N.J., Oliveira, M.C., Read, H.W., Ané, J.M., Santos, J.B., & Werle, R. (2021). Influence of PRE-emergence herbicides on soybean development, root nodulation and symbiotic nitrogen fixation. *Crop Protection*, 144, 105576.

Ruban, P., & Jeyaramraja, P.R. (2023). Isolation and characterization of a silicate-solubilizing bacterial strain associated with the roots of groundnut (*Arachis hypogaea* L.). *Indonesian Journal of Agriculture and Environmental Analytics*, 2(1), 47-54.

Saito, K., Yamamoto, A., Sa, T., & Saigusa, M. (2005). Rapid, micro-methods to estimate plant silicon content by dilute hydrofluoric acid extraction and spectrometric molybdenum method. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 51(1), 29-36.

Sari, I.P., Lestari, Y., Hamim, H., & Santi, L.P. (2022). Application of silica solubilizing bacteria to improve the water use efficiency of maize. *Menara Perkebunan*, 90(1), 71-80.

Shahzad, M., Z¨orb, C., Geilfus, C.M., & Mühling, K.H. (2013). Apoplastic Na^+ in *Vicia faba* leaves rises after short-term salt stress and is remedied by silicon. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 199(3), 161-170.

Shrestha, R., Adams, C.B., Ravelombola, W., MacMillan, J., Trostle, C., Ale, S., & Hinson P. (2021). Exploring phenotypic variation and associations in root nodulation, morphological, and growth character traits among 50 guar genotypes. *Industrial Crops and Products*, 171, 113831.

Ye, M., Song, Y.Y., Long, J., Wang, R.L., Baerson, S.R., Pan, Z., Zhu-Salzman, K., Xie, J., Cai, K., Luo, S., & Zeng, R. (2013). Priming of jasmonate-mediated antiherbivore defense responses in rice by silicon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(38), 3631-3639.

Zuccarini, P. (2008). Effects of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of *Phaseolus vulgaris* under NaCl stress. *Biologia plantarum*, 52(1), 157-160.