



Evaluation of the Effect of Different Sources of Organic and Mineral Silicate Fertilizers on the Concentration of Nutrients in Two Varieties of Rice

Azam Sadat Yousefi Dazmiri¹ | Mohammad Ali Bahmanyar² | Behi Jalili³ | Mehdi Qajar Sepanlou⁴

1. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran, Iran. E-mail: azamyousefi89@sanru.ac.ir
2. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran, Iran. E-mail: m.bahmanyar@sanru.ac.ir
3. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran, Iran. E-mail: b.jalili@sanru.ac.ir
4. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran, Iran. E-mail: m.ghajar@sanru.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 25 October 2022

Received in revised form

03 October 2023

Accepted 21 November 2023

Published online 13 March 2024

Keywords:

Biochar

Amendment

Paddy field

Rice straw

Silicon

ABSTRACT

Objective: Proper nutrition program is one of the major approaches to improve plant quality and has a significant role in increasing its performance.

Methods: In this regard, to investigate the effect of applying organic and mineral silicate sources on the concentration of silicon, nitrogen, phosphorus and potassium in rice plants (*Oryza sativa* L.), an experiment was conducted as split plots with three replications in the 2019 growing season. The experiment was carried out on the fields of the Dazmirkandeh village in the suburbs of the city of Sari and all the experimental steps were carried out in the laboratory of the Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources. The main factor included two varieties of rice and the sub factor consisted of the type and amount of silicon sources in 11 levels of fertilizer treatment.

Results: The results showed that the main effect of variety and different sources of silicon on the concentration of silicon in the flag leaf was significant at the confidence level of five percent, while their effect in the biomass and grain of rice was significant at the one percent confidence level. The average concentration of nutrients in the aerial organs of the Tarem Hashemi cultivar was higher than that of the Shiroudi cultivar and the different sources of silicon were able to increase the silicon concentration of flag leaves, biomass, and seeds by 70%, 16%, and 20%, respectively, increase the nitrogen by 12%, 55%, and 50%, respectively, increase the phosphorus concentration by 100%, 60%, and 87%, respectively, and finally, increase the potassium concentration by 20%, 15%, and 50%, respectively.

Conclusion: In general, application of all silicate treatments increased the concentration of silicon and other macronutrients in the aerial parts of the plant compared to the control and the basal fertilizer treatments.

Cite this article: Yousefi Dazmiri, A. Z., Bahmanyar, M. A., Jalili, B., & Qajar Sepanlou, M. (2024). Evaluation of the Effect of Different Sources of Organic and Mineral Silicate Fertilizers on the Concentration of Nutrients in Two Varieties of Rice. *Journal of Crops Improvement*, 26 (1), 35-49. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2023.350381.2753>





ارزیابی تأثیر منابع مختلف کود آلی و معدنی سیلیکاته بر غلظت عناصر غذایی دو رقم برنج

اعظم السادات یوسفی دازمیری^۱ | محمدعلی بهمنیار^۲ | بهی جلیلی^۳ | مهدی قاجار سپانلو^۴

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران. رایانامه: azamyousefi89@sanru.ac.ir

۲. گروه علوم خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران. رایانامه: m.bahmanyar@sanru.ac.ir

۳. گروه علوم خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران. رایانامه: b.jalili@sanru.ac.ir

۴. گروه علوم خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران. رایانامه: m.ghajjar@sanru.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

هدف: برنامه تغذیه صحیح یکی از راه کارهای اصلی بهبود کیفیت گیاه است و نقش قابل ملاحظه‌ای در افزایش عملکرد آن دارد.

روش پژوهش: به منظور بررسی تأثیر استفاده از منابع آلی و معدنی حاوی سیلیسیم بر غلظت سیلیسیم، نیتروژن، فسفر و پتاسیم در گیاه برنج (*Oryza sativa* L.)، آزمایشی به صورت کرت‌های خردشده با سه تکرار در مزارع روستای دازمیرکنده از حومه شهرستان ساری در سال ۱۳۹۹ انجام گرفت. کلیه مراحل آزمایش در آزمایشگاه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شد. فاکتور اصلی دو رقم برنج و فاکتور فرعی نوع و مقادیر منابع سیلیسیم در ۱۱ سطح از تیمار کودی بود.

یافته‌ها: براساس نتایج، اثر ساده رقم و منابع مختلف سیلیسیم بر غلظت سیلیسیم در برگ پرچم، زیست‌توده و دانه برنج معنی‌دار شد. میانگین غلظت عناصر غذایی در اندام‌های هوایی در رقم طارم هاشمی بیش از رقم شیرودی بود و منابع مختلف سیلیسیم توانست غلظت عناصر سیلیسیم را در برگ پرچم ۷۰ درصد، زیست‌توده ۱۶ درصد و دانه ۲۰ درصد، نیتروژن را به ترتیب ۱۲، ۵۵ و ۵۰ درصد، فسفر را نیز ۱۰۰، ۶۰ و ۸۷ درصد و در نهایت پتاسیم را ۲۰، ۱۵ و ۵۰ درصد افزایش دهد.

نتیجه‌گیری: به طور کلی کاربرد تمامی تیمارهای سیلیکاته نسبت به تیمار شاهد و کود پایه، موجب افزایش غلظت سیلیسیم و عناصر پرمصرف در اندام‌های هوایی گیاه گردید.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳

کلیدواژه‌ها:

اصلاح کننده

بیوجار

سیلیسیم

شالیزار

کاه و کلش برنج

استناد: یوسفی دازمیری، اعظم السادات؛ بهمنیار، محمدعلی؛ جلیلی، بهی و قاجار سپانلو، مهدی (۱۴۰۳). ارزیابی تأثیر منابع مختلف کود آلی و معدنی

سیلیکاته بر غلظت عناصر غذایی دو رقم برنج. *به زراعی کشاورزی*، ۲۶ (۱)، ۳۵-۴۹. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2023.350381.2753>



۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین راه‌کارها برای افزایش تولید محصولات کشاورزی در واحد سطح، استفاده صحیح از نهاده‌ها به‌ویژه کودهای آلی و شیمیایی می‌باشد. بررسی اثر آن‌ها بر عملکرد و ویژگی‌های کیفی محصولات مهم زراعی می‌تواند در افزایش کمی و کیفی محصولات اثر مثبت داشته باشد (حقیقی^۱ و پسرکلی^۲، ۲۰۱۳). در همین راستا، نقش برخی عناصر نظیر سیلیسیم مورد توجه برخی متخصصین تغذیه گیاه قرار گرفته است.

سیلیسیم یکی از فراوان‌ترین عناصر در پوسته زمین و خاکستر گیاهان است و به‌خاطر اثرات مثبت آن در کشت برنج و به‌عنوان عنصر ضروری مطرح می‌باشد (لیانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۵). با وجود فراوانی سیلیسیم در پوسته زمین، مقادیر قابل‌دسترس این عنصر برای گیاه ناچیز است و جذب آن توسط گیاه در درجه اول به توانایی خاک در تأمین آن بستگی دارد (جواهر^۴ و ویاپوری^۵، ۲۰۱۰). افزایش جذب سیلیسیم با استفاده از منابع کودی سیلیسیم می‌تواند از طریق افزایش مقادیر قابل‌دسترس این عنصر در خاک رخ دهد و سیستم ریشه‌ای گیاه، سیلیسیم بیش‌تری را از خاک جذب نماید (لیانگ^۶ و همکاران، ۲۰۱۵). پژوهش‌گران در مطالعه‌ای که روی نقش سیلیسیم بر افزایش تولید در کشاورزی پایدار داشتند، اظهار نمودند که کشت مداوم و طولانی‌مدت برنج در مزارع منجر به کاهش محتوای سیلیسیم قابل جذب خاک می‌گردد. این امر از این جهت که برنج به‌عنوان گیاه انباشت‌گر سیلیسیم محسوب می‌شود، باید مورد توجه قرار گیرد (کوواکس^۷ و همکاران، ۲۰۲۲).

۲. پیشینه پژوهش

در طی پژوهش‌های انجام‌شده با هدف بررسی تأثیر کودهای سیلیکاته بر کیفیت تولید برنج، هنگامی که پژوهش‌گران از کودهای نیتروژن تلفیق شده با سیلیسیم استفاده نمودند، مشاهده کردند که سیلیسیم نقش قابل‌ملاحظه‌ای در جذب مواد غذایی از خاک دارد و می‌تواند بهره‌وری کود نیتروژن را بدون تغییر نسبت زیست‌توده به دانه، افزایش دهد (زو^۸ و همکاران، ۲۰۲۰). در چین مشاهده شد، استفاده از کود سیلیکاته همراه با منابع کودی نیتروژن، فسفر و پتاسیم، به‌طور قابل‌توجهی جذب عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم در زیست‌توده گیاهان را افزایش می‌دهد (بوراسکا^۹ و همکاران، ۲۰۲۲). در مطالعه‌ای که روی اثر متقابل نیتروژن و سیلیسیم بر روی پنج گونه گیاهی رایج در چمنزارهای کوه آلپ صورت پذیرفت، مشاهده شد که زیست‌توده و نرخ خالص فتوسنتزی به شکل معنی‌داری افزایش می‌یابد (گوآ^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۸). هم‌چنین مشاهده شد، مصرف هم‌زمان بیوچار و منابع کودی سیلیکاته از طریق کاهش تجمع آرسنیک در دانه‌های برنج، نقش مؤثری بر بهبود کیفیت برنج دارد (ونجیا^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۰).

افزایش میزان مصرف سیلیسیم منجر به افزایش جذب و تجمع سیلیسیم در کاه و کلش و زیست‌توده برنج و غلات می‌شود. در واقع محتوای سیلیسیم انباشته‌شده در دانه نیز در کرت‌های آزمایشی با دز سیلیسیم بالاتر به‌طور قابل‌توجهی بیش‌تر بود و تجمع عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم درون دانه و زیست‌توده متأثر از میزان مصرف نیتروژن و سیلیسیم بود (کونگ^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۷).

1. Haghghi
2. Pessarakli
3. Liang
4. Jawahar
5. Vaiyapuri
6. Liang
7. Kovacs
8. Xu
9. Borawska
10. Goa
11. Wenjia
12. Coung

طی مطالعات پژوهش‌گران بر روی بیوچار کاه‌وکش برنج عنوان شد، مقادیر بالای سیلیسیم موجود در بیوچار می‌تواند به‌عنوان یک منبع انتشار آهسته این عنصر به‌ویژه در خاک‌هایی که دست‌یابی زیستی پایینی به سیلیسیم دارند، محسوب گردد زمانی که کاه‌وکش برنج به بیوچار تبدیل می‌شود، ظرفیت رهاسازی و یا آزادسازی سیلیسیم در طی فرایند کربناته‌شدن به‌شدت تغییر می‌کند، زیرا بیوچار کاه‌وکش برنج علاوه بر دارا بودن قدرت بالا در انحلال سیلیسیم، به‌عنوان یک اصلاح‌کننده خاک نیز تلقی می‌شود (زیائو^۱ و همکاران، ۲۰۱۲).

لذا پژوهش مزبور با هدف بررسی تأثیر منابع مختلف آلی و معدنی حاوی سیلیسیم (به‌طور عمده از کاه‌وکش و یا منابع معدنی محلی و قابل‌دسترس)، بر غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم و سیلیسیم در دو رقم برنج طارم هاشمی و شیروودی صورت پذیرفت.

۳. روش‌شناسی پژوهش

برای انجام این پژوهش یک قطعه زمین زراعی به مساحت ۱۰۰۰ مترمربع از اراضی روستای دازمیرکنده واقع در کیلومتر ۱۵ جاده دریا شهرستان ساری (۳۶ درجه و ۴۳ دقیقه و ۳۳ ثانیه و ۵۳ درجه و ۴ دقیقه و ۲۳ ثانیه شرقی) انتخاب شد و نمونه‌برداری از خاک آن جهت تعیین برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قبل از کشت، از عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متری انجام شد و در آزمایشگاه حاصلخیزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری آماده‌سازی شد. پس از آن برخی از خصوصیات آن مانند بافت خاک به روش هیدرومتری (Bower, 1952)، pH خاک در گل اشباع به‌وسیله الکتروود شیشه‌ای (مدل JENWAY. 3510، ساخت انگلستان) و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع با هدایت‌سنج الکتریکی (مدل JENWAY. ۹۵۰۰، ساخت انگلستان) در دمای ۲۵ درجه اندازه‌گیری شد. کربن آلی به روش والکی بلک (نلسون^۲ و سامرز^۳، ۱۹۹۶)، فسفر قابل‌جذب به روش اولسن (اولسن^۴، ۱۹۵۴)، پتاسیم قابل‌جذب به روش استات آمونیوم (بامز^۵ و همکاران، ۱۹۴۵)، اندازه‌گیری آهک خاک به روش تیترسنجی انجام شد (جدول ۱).

جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

بافت	شن لای رس (درصد)	نیتروژن کربن آلی (درصد)	اسیدیته	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	فسفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	پتاسیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	سیلیسیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)
	۴۸/۸	۳۵/۶	۱۵/۶	۰/۱۱۷	۱/۷۱	۷/۰۷	۰/۳
	۲۲۸/۹	۲۲۰	۶/۷۴	۲۲۸/۹	۲۲۰	۲۲۸/۹	۲۲۸/۹

پس از انجام آزمایش‌های فوق، آماده‌سازی زمین صورت پذیرفت. عملیات خزانه‌گیری در فروردین‌ماه انجام گرفت و افزودن کود پایه براساس نیاز خاک و مطابق دستورالعمل مؤسسه تحقیقات خاک و آب براساس توصیه کودی با هدف تولید متوسط محصول ۵ تن در هکتار (ازت: ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار، فسفر: ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار و پتاس: ۲۸۰ کیلوگرم در هکتار) تعیین گردید و در کرت‌های آزمایش اعمال شد (داوودی و همکاران، ۱۳۹۳).

آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار در سال زراعی ۱۳۹۹ انجام

1. Xiaoyu
2. Sommers
3. Nelson
4. Olsen
5. Barnes

گرفت. تعداد سه نشا در هر کپه، تعداد ۲۰ کپه در هر مترمربع و مدیریت آبیاری به روش مرسوم منطقه (غرقاب) بود. فاکتور اصلی دو رقم برنج محلی و پرمحصول مقبول در منطقه (طارم هاشمی و شیرودی) و فاکتور فرعی منابع سیلیسیم (نوع کود و مقادیر مصرفی) انتخاب گردید.

تیمارها در ۱۱ سطح شامل ۱- یا شاهد، ۲- کود پایه، ۳ و ۴- کود پایه و کاه و کلش برنج در دو سطح، ۵ و ۶- کود پایه و بیوچار کاه و کلش برنج در دو سطح، ۷ و ۸- سیلیکات پتاسیم جامد (۲۶ درصد SiO_2) در دو سطح، ۹ و ۱۰- کود پایه و کود معدنی سیلیسیم از معدن وریام شهرستان نکا (به عنوان اصلاح کننده محلی موجود در استان) در دو سطح و ۱۱- کود پایه و کود مایع سیلیکات پتاسیم (۳۰ درصد SiO_2) در یک سطح در چهار مرحله (جمعاً به تعداد ۱۱ به شرح جدول ۲).

جدول ۲. تعریف تیمارهای کودی به کار گرفته شده در پژوهش

شماره تیمار کودی	نامگذاری اختصاری	نوع تیمار کودی و مقادیر مصرفی
۱	B	بدون مصرف کود شیمیایی و آلی
۲	F	براساس آزمون خاک از منابع کودی اوره، سوپر فسفات تریپل، سولفات پتاسیم و سولفات روی
۳	F+S ₁	کود پایه+ کاه و کلش برنج در سطح ۲ تن در هکتار
۴	F+S ₂	کود پایه+ کاه و کلش برنج در سطح ۴ تن در هکتار
۵	F+Sb ₁	کود پایه+ بیوچار کاه و کلش برنج در سطح ۵۰۰ کیلوگرم
۶	F+Sb ₂	کود پایه+ بیوچار کاه و کلش برنج در سطح ۱ تن در هکتار
۷	F+SiK ₁	کود پایه+ سیلیکات پتاسیم جامد در سطح ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار
۸	F+SiK ₂	کود پایه+ سیلیکات پتاسیم جامد در سطح ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار
۹	F+SiM ₁	کود پایه+ کود معدنی سیلیسیم از معدن وریام در سطح ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار
۱۰	F+SiM ₂	کود پایه+ کود معدنی سیلیسیم از معدن وریام در سطح ۸۰۰ کیلوگرم در هکتار
۱۱	F+SiKL	کود پایه+ کود مایع سیلیکات پتاسیم با ۳۰ درصد SiO_2 در یک سطح در چهار مرحله

تعداد ۶۶ کرت و ابعاد هر کرت ۳×۳ متر و فاصله بین کرت‌ها در حدود ۳۰ سانتی متر که با مرزهای نایلون شده از هم مجزا شد. کرت‌ها به گونه‌ای طراحی شد که برای هر کرت ورودی و خروجی آب جداگانه تعبیه شد تا آب کرت‌ها با هم مخلوط نشوند.

تمامی کود پایه و کودهای آلی و معدنی تعیین شده برای هر تیمار پس از آماده سازی کرت‌های آزمایشی، قبل از نشاکاری با خاک هر کرت مخلوط شد. به استثنای کود نیتروژنه که طی سه مرحله شامل یک سوم از آن مخلوط با خاک یک روز قبل از نشاکاری، یک سوم مقارن با زمان پنجه زنی و یک سوم نهایی هم‌زمان با ساقه رفتن به صورت سرک مصرف شد. تیمار کود مایع سیلیکات پتاسیم نیز طی چهار مرحله؛ اوایل پنجه زنی به غلظت ۲ در هزار، دو هفته بعد در اواسط پنجه زنی نیز به غلظت ۲ در هزار، به ساقه رفتن با غلظت ۵ در هزار و خوشه دهی با غلظت ۸ در هزار اعمال شد (غلظت‌های پیشنهادی بر پایه نیاز گیاه در مرحله رشد گیاه انتخاب گردید).

جدول ۳. برخی از خصوصیات کاه و کلش، بیوچار حاصل از کاه و کلش و کود سیلیسیم معدنی

خصوصیات	کاه و کلش برنج	بیوچار کاه و کلش برنج	کود معدنی وریام
سیلیسیم (درصد)	۱۹/۳۱	۱۴/۰	۵۸/۵۱
نیتروژن کل (درصد)	۰/۹	۱/۹	۰/۰۰۱
فسفر کل (درصد)	۰/۳۰۲	۰/۱۵۶	۰/۳۸۹
پتاسیم کل (درصد)	۰/۱۱۵	۰/۷۷۳	۰/۰۷۴

نمونه‌های برگ پرچم در پایان مرحله خوشه‌دهی به تعداد ۱۰۰ نمونه از هر کرت برداشت شد. پس از تکمیل مرحله رشد گیاه نیز نمونه‌برداری از دانه و زیست‌توده گیاه از تعداد ۱۴ بوته از هر کرت در زمان برداشت نهایی انجام شد و به آزمایشگاه انتقال یافت و هر کدام از بخش‌های برگ پرچم، دانه و زیست‌توده به‌صورت مجزا با آب مقطر شست‌وشو شد و برای انجام آزمایش آماده گردید.

میزان نیتروژن (N) به‌روش کج‌دال، فسفر (P) به‌روش کیو^۱، پتاسیم (K) به‌روش خاکستر خشک و با دستگاه فلیم فوتومتر (مدل M۴۱۰، Sherwood انگلستان) و سیلیسیم (Si) به‌روش هضم اتوکلاو و اسپکتروفتومتری (مدل PG Instrument T90، انگلستان)، برای اندام‌های برگ پرچم، زیست‌توده و دانه تعیین گردیدند. آنالیز و تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار آماری Statistix (نسخه ۸) صورت پذیرفت و مقایسه میانگین براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار LSD^۲ در سطح ۵ درصد انجام شد.

۴. یافته‌های پژوهش

۴.۱. سیلیسیم

مطابق جدول تجزیه واریانس زیر؛ اثرات ساده رقم، تیمار کودی و اثرات متقابل رقم× تیمار برای زیست‌توده و دانه برنج و همین‌طور اثر ساده دو رقم، اثرات متقابل رقم× تیمار کودی در سطح یک درصد معنی‌دار شدند. در حالی‌که اثر ساده منابع مختلف سیلیسیم بر غلظت سیلیسیم در برگ پرچم در سطح پنج درصد معنی‌دار گردید (جدول ۴).

جدول ۴. جدول تجزیه واریانس اثرات رقم و منابع مختلف سیلیسیم بر غلظت سیلیسیم جذب‌شده در اندام‌های مختلف گیاه برنج

منابع تغییرات	درجه آزادی	برگ پرچم	زیست‌توده	دانه
تکرار	۲	۰/۱۳۰۲۵	۰/۱۶	۰/۰۳۹
رقم	۱	۱/۲۸۸۰۱**	۱۳۵۲/۰۲**	۳۷۵/۲۸۰**
خطای تکرار× رقم	۲	۰/۰۱۲۵۵	۰/۲۱	۰/۱۰۹
تیمار	۱۰	۰/۱۴۷۸۰*	۱۰۶/۸۷**	۵۳۵/۴۸۰**
رقم× تیمار	۱۰	۲۲۹۷۲**	۱۰۹/۷۳**	۴۶۶/۳۹۹**
خطای تکرار× رقم× تیمار	۴۰	۰/۵۴۷۲	۰/۰۸	۰/۰۹۵
ضرب تغییرات (رقم× تکرار)		۶/۷۵	۶/۷۲	۱/۰۷
ضرب تغییرات (تیمار× رقم× تکرار)		۱۴/۰۸	۴/۱۰	۱/۰۰

***، * و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و عدم تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

غلظت سیلیسیم در تمام اندام‌های هوایی گیاهان تحت تیمار، بدون در نظر گرفتن سطوح و منبع کودی سیلیکاته، نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. بنابراین، کاربرد منابع سیلیسیم منجر به افزایش جذب این عنصر توسط گیاه می‌شود که می‌توان دلیل آن را افزایش فراهمی سیلیسیم در محلول خاک و در نتیجه جذب بیش‌تر آن توسط گیاه دانست. نتایج نشان داد بیش‌ترین غلظت سیلیسیم در برگ پرچم در رقم طارم و مربوط به تیمار F+SiK_۲ (کود پایه و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات پتاسیم جامد) بود که نسبت به تیمار شاهد و هم‌چنین تیمار مربوط به نیاز کودی پایه، توانست غلظت سیلیسیم را حدود ۷۰ درصد افزایش دهد. بهترین تیمار کودی از منظر غلظت سیلیسیم در زیست‌توده در تیمارهای مربوط به سیلیسیم معدنی و در

1. Kuo

2. Least Significant Difference

رقم شیرودی و تیمار (کود پایه و ۸۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات معدنی) مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد، ۲۶ درصد و نسبت به کود پایه ۱۶ درصد افزایش نشان داد. بیشترین غلظت سیلیسیم در دانه مربوط به رقم طارم و تیمار $F+SiM_1$ (۴۸/۶۷ درصد) و کمترین غلظت در رقم شیرودی و تیمار شاهد B (۱۱/۳۸ درصد) مشاهده شد که افزایش غلظت حدود ۲۰ درصد نسبت به تیمار شاهد و کود پایه از خود نشان داد. بنابراین براساس مشاهدات حاصل از این پژوهش می‌توان گفت که در دسترس بودن سیلیسیم در خاک، نقش مستقیم بر میزان جذب این عنصر توسط گیاه دارد (جدول ۵).

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر متقابل رقم و تیمارهای کودی بر میزان غلظت سیلیسیم در برگ پرچم، زیست توده و دانه برنج (درصد)

تیمار کودی	برگ پرچم		زیست توده		دانه	
	طارم هاشمی	شیرودی	طارم هاشمی	شیرودی	طارم هاشمی	شیرودی
B	۱/۴۳ ^c	۱/۶۴ ^{bc}	۲/۵۹ ^e	۱/۶۳ ^f	۱/۴۴ ^l	۱/۱۳ ^m
F	۱/۴۶ ^{bc}	۱/۶۸ ^{bc}	۱/۷۳ ^f	۱/۷۷ ^e	۱/۵۴ ^j	۱/۵۴ ⁱ
F+ S ₁	۱/۶۱ ^{bc}	۱/۴۵ ^c	۲/۵۲ ^c	۳/۲۸ ^d	۳/۰۴ ^h	۱/۴۶ ^{kl}
F+ S ₂	۱/۷۱ ^{bc}	۱/۶۱ ^{bc}	۲/۳۶ ^e	۲/۶۳ ^e	۴/۸۵ ^a	۱/۶۵ ⁱ
F + S _{b1}	۱/۷۳ ^{bc}	۱/۴۳ ^c	۲/۴۶ ^e	۲/۶۰ ^e	۳/۴۶ ^g	۴/۱۵ ^c
F + S _{b2}	۱/۷۳ ^{bc}	۱/۵۳ ^{bc}	۱/۶۰ ^e	۱/۴۵ ^c	۳/۸۳ ^c	۳/۸۵ ^c
F + SiK ₁	۲/۴۲ ^c	۱/۴۳ ^c	۲/۵۵ ^c	۱/۸۶ ^b	۴/۲۲ ^b	۴/۱۴ ^c
F + SiK ₂	۲/۴۶ ^a	۱/۴۳ ^c	۲/۴۱ ^c	۱/۸۴ ^b	۳/۸۵ ^c	۳/۸۴ ^c
F + SiM ₁	۱/۸۸ ^b	۱/۵۱ ^{bc}	۲/۴۳ ^e	۲/۰۵ ^b	۴/۸۶ ^a	۱۶/۶۴ ⁱ
F + SiM ₂	۱/۶۲ ^{bc}	۱/۵۱ ^{bc}	۲/۴۰ ^e	۲/۰۶ ^a	۳/۸۴ ^c	۳/۷۴ ^f
F + SiKL	۱/۷۷ ^{bc}	۱/۴۹ ^{bc}	۱/۵۰ ^f	۱/۸۷ ^b	۱/۵۲ ^k	۴/۰۶ ^d

در هر ستون حرف یا حروف مشابه نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین هاست (براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد).
 B: تیمار شاهد، F: تیمار کود پایه، F+ S₁: کود پایه + ۲ تن در هکتار کاه و کلش برنج، F+S₂: کود پایه + ۴ تن در هکتار کاه و کلش برنج، F+S_{b1}: کود پایه + ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار بیوجار کاه و کلش برنج، F+S_{b2}: کود پایه + ۱ تن در هکتار بیوجار کاه و کلش برنج، F+SiK₁: کود پایه + ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات پتاسیم جامد، F+SiK₂: کود پایه + ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات پتاسیم جامد، F+SiM₁: کود پایه + ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات معدنی، F+SiM₂: کود پایه + ۸۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات معدنی، F+SiKL: کود پایه + محلول پاشی سیلیکات پتاسیم محلول.

پیش از این مطالعه، سایر پژوهش‌گران با کاربرد مقادیر متفاوت از SiO₂ در مزارع برنج ویتنام مشاهده نمودند که استفاده از سیلیسیم به همراه کود پایه، منجر به افزایش جذب و تجمع غلظت سیلیسیم در تمامی بخش‌های زیست توده می‌شود که در تمامی سطوح نسبت به تیمار شاهد اختلاف معنی‌دار شد (کونگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۷).

پژوهش‌گران در طی پژوهش‌های انجام شده با هدف بررسی تأثیر کودهای سیلیکاته بر کیفیت عناصر غذایی موجود در برنج، با مصرف نانوسیلیس در مزارع برنج مشاهده نمودند که غلظت سیلیسیم در شلتوک برنج افزایش قابل توجهی داشته و مصرف سیلیکات منیزیم در ارقام مختلف برنج، عملکرد دانه را به مقادیر ۲۱ الی ۳۳ درصد افزایش می‌دهد (زو^۲ و همکاران، ۲۰۲۰). هم‌چنین استفاده از سیلیسیم در مزارع برنج منجر به افزایش غلظت این عنصر در اندام‌های هوایی گیاه به‌ویژه دانه می‌شود (چن^۳ و همکاران، ۲۰۱۰). در مطالعات مشابهی عنوان شد که افزایش جذب سیلیسیم با استفاده از منابع کودی سیلیسیم می‌تواند از طریق افزایش مقادیر قابل دسترس این عنصر در خاک رخ دهد و سیستم ریشه‌ای گیاه، سیلیسیم بیش‌تری را از خاک جذب نماید (تایاد^۴ و همکاران، ۲۰۲۲).

1. Cuong
2. Xu
3. Chen
4. Tayad

۲.۴. نیتروژن

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر ساده رقم بر غلظت نیتروژن در برگ پرچم و زیست‌توده، در سطح یک درصد معنی‌دار و در دانه در سطح پنج درصد معنی‌دار گردید. از سوی دیگر اثر ساده سیلیسیم بر غلظت نیتروژن برگ پرچم در سطح پنج درصد، بر زیست‌توده در سطح یک درصد معنی‌دار و بر غلظت نیتروژن دانه غیرمعنی‌دار شد. هم‌چنین اثرات متقابل رقم و تیمار بر غلظت نیتروژن موجود در برگ پرچم در سطح پنج درصد و در زیست‌توده در سطح یک درصد معنی‌دار شد، اما برای دانه غیرمعنی‌دار شد (جدول ۶).

جدول ۶. جدول تجزیه واریانس اثرات رقم و منابع مختلف سیلیسیم بر غلظت نیتروژن در اندام‌های مختلف گیاه برنج

منابع تغییرات	درجه آزادی	برگ پرچم	زیست‌توده	دانه
تکرار	۲	۰/۰۳۴۱۸	۰/۰۴۵۰۹	۰/۰۰۷۵۴
رقم	۱	۶/۹۵۱۷۶**	۰/۰۶۶۸۸**	۰/۶۸۲۱۸*
خطای تکرار × رقم	۲	۰/۰۱۶۴۰	۰/۰۰۹۵۲	۰/۰۲۱۷۰
تیمار	۱۰	۰/۰۱۱۲۶۱*	۰/۰۳۴۵۷**	۰/۰۲۳۴۱ ^{ms}
رقم × تیمار	۱۰	۰/۰۹۹۱۰*	۰/۰۷۳۰۱**	۰/۰۲۵۰۳ ^{ms}
خطای تکرار × رقم × تیمار	۴۰	۰/۰۴۵۳۳	۰/۰۰۹۴۷	۰/۰۱۶۱۴
ضریب تغییرات (رقم × تکرار)		۵/۷۹	۱۴/۴۹	۹/۰۹
ضریب تغییرات (تیمار × رقم × تکرار)		۹/۶۳	۱۴/۴۶	۷/۴۸

***, **, * : به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و عدم تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

نتایج مقایسه میانگین غلظت نیتروژن در برگ پرچم نشان داد، بیش‌ترین غلظت نیتروژن (۲/۷۷ درصد) در رقم طارم و تیمار F+ Sb₁ (کود پایه و ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار بیوجار کاه و کلش برنج) مشاهده شد. از سوی دیگر، کم‌ترین غلظت نیتروژن (۱/۶۳ درصد) در تیمار F+SiM₁ (کود پایه و ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات پتاسیم معدنی) در رقم شیرودی مشاهده شد (جدول ۷).

جدول ۷. مقایسه میانگین اثر متقابل رقم و تیمارهای کودی بر میزان غلظت نیتروژن (درصد) در برگ پرچم و زیست‌توده برنج

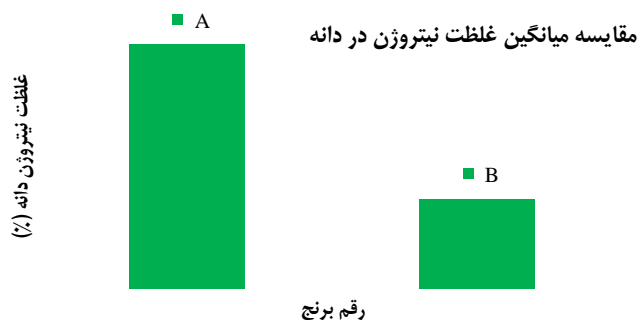
تیمار کودی	طارم هاشمی	شیرودی	برگ پرچم	زیت توده
B	۲/۴۷ ^{abc}	۱/۷۵ ^{fg}	۰/۷۴ ^{bc}	۰/۵۲ ^{fg}
F	۲/۴۷ ^{abc}	۲/۰۶ ^{def}	۰/۷۱ ^{bcd}	۰/۶۱ ^{c-g}
F + S ₁	۲/۵۵ ^{abc}	۱/۸۲ ^{fg}	۰/۶۸ ^{b-e}	۰/۵۴ ^{efg}
F + S ₂	۲/۵۵ ^{abc}	۱/۸۷ ^{efg}	۰/۸۰ ^b	۰/۵۲ ^{efg}
F + Sb ₁	۲/۷۷ ^a	۲/۳۳ ^{bcd}	۱/۱۱ ^a	۰/۶۴ ^{b-g}
F + Sb ₂	۲/۷۷ ^a	۲/۲۱ ^{de}	۰/۷۴ ^{bc}	۰/۶۴ ^{b-g}
F + SiK ₁	۲/۳۳ ^{bcd}	۱/۷۹ ^{fg}	۰/۶۶ ^{b-f}	۰/۶۰ ^{c-g}
F + SiK ₂	۲/۶۵ ^{ab}	۱/۷۱ ^{fg}	۰/۵۵ ^{efg}	۰/۶۸ ^{b-g}
F + SiM ₁	۲/۴۸ ^{abc}	۱/۶۳ ^g	۰/۶۴ ^{b-g}	۰/۷۸ ^b
F + SiM ₂	۲/۴۷ ^{abc}	۱/۸۴ ^{efg}	۰/۴۹ ^g	۰/۷۴ ^{bc}
F + SiKL	۲/۳۹ ^{bcd}	۱/۷۲ ^{fg}	۰/۵۶ ^{efg}	۰/۷۳ ^{bc}

در هر ستون و ردیف حرف یا حروف مشابه نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌هاست (براساس آزمون LSD در سطح پنج درصد).
 B: تیمار شاهد، F: تیمار کود پایه، F + S₁: کود پایه + ۲ تن در هکتار کاه و کلش برنج، F+S₂: کود پایه + ۴ تن در هکتار کاه و کلش برنج، F+Sb₁: کود پایه + ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار بیوجار کاه و کلش برنج، F+Sb₂: کود پایه + ۱ تن در هکتار بیوجار کاه و کلش برنج، F+SiK₁: کود پایه + ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات پتاسیم جامد، F+SiK₂: کود پایه + ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات پتاسیم جامد، F+SiM₁: کود پایه + ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات معدنی، F+SiM₂: کود پایه + ۸۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات معدنی، F+SiKL: کود پایه + محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم محلول.

میانگین غلظت نیتروژن زیست‌توده در رقم طارم هاشمی بیش از رقم شیروودی بود. تیمار $F+Sb_1$ (۵۰۰ کیلوگرم در هکتار بیوجار کاه و کلش برنج)، بیش‌ترین میانگین تجمع غلظت نیتروژن در رقم طارم هاشمی (۱/۱۱) درصد، در زیست‌توده و در رقم شیروودی در تیمار $F+SiM_1$ (۰/۷۸) مشاهده شد. در برگ پرچم تیمار آلی (کود پایه + ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار کاه و کلش برنج) به‌عنوان بهترین تیمار، حدود ۱۲ درصد بیش از تیمار شاهد افزایش غلظت نیتروژن داشت. همین‌طور زمانی که از منبع آلی کاه و کلش برنج به‌عنوان منبع کود سیلیکاته استفاده شد، غلظت نیتروژن در زیست‌توده نسبت به تیمار شاهد (۰/۵۲) و تیمار کود پایه (۰/۶۱) حدود ۵۰ درصد افزایش نشان داد، اما در مورد غلظت نیتروژن دانه، میانگین رقم طارم هاشمی بیش از رقم شیروودی بود.

مقایسه میانگین غلظت نیتروژن در دانه برای تیمارهای مختلف، اختلاف معنی‌داری را نشان نداد. مطابق شکل (۱) میانگین غلظت نیتروژن در رقم طارم (۱/۷۲ درصد) بیش از رقم شیروودی (۱/۵۲ درصد) بود. در مطالعه‌ای عنوان شد، کاربرد کودهای حاوی سیلیسیم، با افزایش قابلیت گره‌زایی ریشه، منجر به افزایش جذب نیتروژن از خاک می‌شود (زو^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). به‌علاوه، نتایج پژوهشی دیگر نشان داد در زمان مصرف سیلیکات پتاسیم در مزارع برنج، کارایی مصرف نیتروژن تا ۳۱/۴ درصد نسبت به تیمار شاهد و ۱۷/۰۴ درصد نسبت به تیمار کود پایه افزایش می‌یابد (ونگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۹). در پژوهشی مشابه نیز مشاهده شد که مصرف هم‌زمان نیتروژن و سیلیسیم می‌تواند محتوای مواد مغذی خاک، غلظت سیلیسیم و نیتروژن در برگ، زیست‌توده و دانه حبوبات را نسبت به تیماری که در آن نیتروژن به‌تنهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد (زین زیائو^۳ و زو^۴، ۲۰۱۴).

بیش‌ترین میانگین غلظت نیتروژن دانه طارم هاشمی و شیروودی (۱/۸۸ و ۱/۷۳ درصد) به‌ترتیب در تیمار $F+SiK_1$ (کود پایه و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات پتاسیم جامد) و $F+S_1$ (کود پایه و ۲ تن در هکتار کاه و کلش برنج) مشاهده شد (شکل ۱).



شکل ۱. نمودار مقایسه میانگین غلظت نیتروژن (درصد) در دانه گیاه برنج در دو رقم طارم هاشمی و شیروودی

۳.۴. فسفر

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد، اثر ساده رقم بر غلظت فسفر برگ پرچم و دانه نیز در سطح یک درصد معنی‌دار شد، اما بر غلظت فسفر زیست‌توده معنی‌دار نشد. در تمام تیمارهای به‌کاررفته اثر ساده تیمار بر غلظت فسفر در تمام

اجزای هوایی برنج در سطح یک درصد معنی‌دار شد. در ضمن، اثر متقابل تیمار × رقم در تمام بخش‌های هوایی مورد بررسی در سطح یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۸).

جدول ۸. جدول تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرات رقم و منابع مختلف سیلیسیم بر غلظت فسفر در اندام‌های مختلف گیاه برنج

منابع تغییرات	درجه آزادی	برگ پرچم	زیست‌توده	دانه
تکرار	۲	۰/۷۲۷	۰/۵۹۵۲	۰/۷۲
رقم	۱	۶۹۳/۹۴۴**	۰/۰۰۲۳ ^{ns}	۱۴۴۷/۷۱**
خطای تکرار × رقم	۲	۰/۳۸۴	۰/۱۴۵۷	۰/۷۵
تیمار	۱۰	۵۸/۲۰۰**	۸/۳۸۱۸**	۳۱۹/۹۱**
رقم × تیمار	۱۰	۴۵/۲۰۹**	۱۴/۲۲۹۸**	۱۳۴/۴۸**
خطای تکرار × رقم × تیمار	۴۰	۱/۱۹۱	۰/۰۸۳۹	۰/۲۸
ضریب تغییرات (رقم × تکرار)		۳/۹۹	۵/۰۱	۲/۶۰
ضریب تغییرات (تیمار × رقم × تکرار)		۷/۰۲	۳/۸۰	۱/۵۷

**، * و ns: به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و عدم تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

در برگ پرچم در هر دو رقم کشت شده در تیمار + SiKLF (کود پایه و محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم)، بیش‌ترین غلظت (۰/۳۱ درصد) و تیمار شاهد (۰/۱۰۵ درصد) کم‌ترین غلظت فسفر را به خود اختصاص داد. چنانچه مشاهده شد، افزایش تقریباً ۲۰۰ درصدی نسبت به تیمار شاهد و ۱۰۰ درصد نسبت به تیمار کود پایه اتفاق افتاد. در زیست‌توده، بیش‌ترین تجمع غلظت فسفر در تیمار ۸۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیسیم معدنی در رقم شیرودی مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد افزایش غلظت حدوداً ۱۹۴ درصد و نسبت به کود پایه ۶۰ درصد افزایش غلظت نشان داد. بهترین تیمار کودی مؤثر بر غلظت فسفر در دانه نیز تیمار مربوط به ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیسیم معدنی ارزیابی شد که این تیمار نسبت به تیمار شاهد حدود ۱۹۸ درصد و نسبت به کود پایه ۸۷ درصد افزایش غلظت فسفر داشت. بنابراین منابع معدنی سیلیسیم در جهت افزایش جذب فسفر مؤثرتر از منابع آلی ظاهر شدند. رقم طارم در برگ پرچم و دانه غلظت بیش‌تری از فسفر را نشان داد، در حالی که بیش‌ترین غلظت فسفر زیست‌توده در رقم شیرودی مشاهده شد (جدول ۹).

بر اساس نتایج این آزمایش غلظت فسفر در اجزای اندام‌های هوایی در تمام تیمارها نسبت به شاهد و کود پایه افزایش فوق‌العاده نشان داد. در رقم طارم تیمارهای کاه‌کولش برنج بیش‌ترین غلظت فسفر را نشان دادند که نسبت به کم‌ترین غلظت در تیمار شاهد تقریباً ۵۰ درصد افزایش غلظت مشاهده شد.

پژوهش‌گران طی مطالعات خود مشاهده نمودند زمانی که از منابع کودی سیلیسیم استفاده می‌شود، دستیابی و جذب فسفر در گیاه افزایش می‌یابد. وجود سیلیسیم در فاز محلول خاک، منجر به ایجاد رقابت با فسفر برای جذب سطحی توسط ذرات خاک و آزادسازی فسفر درون خاک می‌شود که به دنبال آن منجر به افزایش جذب و تجمع فسفر توسط گیاه می‌شود. به‌علاوه، در این مطالعه بیان شد که مصرف سیلیسیم باعث بهبود ساختار و حالت قرارگیری برگ شده و با افزایش کارایی فتوسنتز، میزان محصول را افزایش می‌دهد (زو^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). سایر پژوهش‌گران نیز در این راستا اظهار نمودند، سیلیسیم با دخالت در فرایندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی، نقش بسزایی در کاهش عدم تعادل فسفر در انواع گونه‌های گیاهی ایفا می‌کند (کوواکس^۲ و همکاران، ۲۰۲۲).

1. Xu

2. Kovacs

جدول ۹. مقایسه میانگین اثر متقابل رقم و تیمارهای کودی بر میزان غلظت فسفر در برگ پرچم، زیست توده و دانه برنج (درصد)

تیمار کودی	برگ پرچم		زیست توده		دانه	
	طارم هاشمی	شیروودی	طارم هاشمی	شیروودی	طارم هاشمی	شیروودی
B	۰/۱۰ ^j	۰/۱۳۳ ^{ef}	۰/۰۴ ⁱ	۰/۰۳ ^j	۰/۱۷ ^k	۰/۲۷ ^h
F	۰/۱۴ ^{ef}	۰/۱۱۶ ^z	۰/۰۸ ^{de}	۰/۰۶ ^g	۰/۲۷ ^h	۰/۲۱ ⁱ
F + S ₁	۰/۱۹ ^{cd}	۰/۱۰ ^j	۰/۰۹ ^c	۰/۰۵ ^h	۰/۲۵ ^e	۰/۲۴ ⁱ
F + S ₂	۰/۲۱ ^{bc}	۰/۱۱ ^{ij}	۰/۰۸ ^{cd}	۰/۰۸ ^{de}	۰/۳۴ ^e	۰/۲۱ ⁱ
F + Sb ₁	۰/۱۰ ^j	۰/۱۱ ^{ij}	۰/۰۷ ^f	۰/۰۹ ^c	۰/۲۵ ^e	۰/۲۱ ⁱ
F + Sb ₂	۰/۱۸ ^d	۰/۱۳ ^{de-h}	۰/۰۸ ^{de}	۰/۰۸ ^e	۰/۴۲ ^c	۰/۳۰ ^f
F + SiK ₁	۰/۲۰ ^c	۰/۱۲ ^{f-i}	۰/۰۶ ^g	۰/۰۴ ⁱ	۰/۳۹ ^d	۰/۲۹ ^g
F + SiK ₂	۰/۲۲ ^{cb}	۰/۱۲ ^{f-i}	۰/۰۵ ^{gh}	۰/۰۹ ^{bc}	۰/۴۸ ^b	۰/۲۹ ^g
F + SiM ₁	۰/۱۹ ^{cd}	۰/۱۱ ^{hij}	۰/۰۸ ^e	۰/۰۹ ^{bc}	۰/۵۰ ^a	۰/۳۰ ^f
F + SiM ₂	۰/۱۸ ^d	۰/۱۳ ^{efg}	۰/۰۹ ^b	۰/۱۰ ^a	۰/۳۹ ^d	۰/۴۷ ^b
F + SiKL	۰/۳۱ ^a	۰/۱۴ ^c	۰/۰۷ ^f	۰/۰۸ ^{de}	۰/۴۸ ^b	۰/۳۱ ^f

در هر ستون و ردیف حرف یا حروف مشابه نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار بین میانگین هاست (براساس آزمون LSD در سطح پنج درصد).
 B: تیمار شاهد، F: تیمار کود پایه، F+ S₁: کود پایه + ۲ تن در هکتار کاه و کلش برنج، F+ S₂: کود پایه + ۴ تن در هکتار کاه و کلش برنج، F+ Sb₁: کود پایه + ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار بیوجار کاه و کلش برنج، F+ Sb₂: کود پایه + ۱ تن در هکتار بیوجار کاه و کلش برنج، F+ SiK₁: کود پایه + ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات پتاسیم جامد، F+ SiK₂: کود پایه + ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات پتاسیم جامد، F+ SiM₁: کود پایه + ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات معدنی، F+ SiM₂: کود پایه + ۸۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات معدنی، F+ SiKL: کود پایه + محلول پاشی سیلیکات پتاسیم محلول.

در بررسی تأثیر تیمارهای سیلیکاته بر روند انتقال عناصر غذایی در برنج نتایج نشان داد، سیلیسیم منجر به افزایش غلظت اسیدهای آمینه در اندامهای مختلف گیاه برنج می شود. پژوهشگران از کاه برنج به عنوان منبع آلی سیلیسیم استفاده نمودند؛ دو عامل غلظت سیلیسیم و اسیدیته خاک را مهم ترین عوامل مؤثر بر تحرک فسفر خاک عنوان کردند و بیان داشتند کاربرد کاه و کلش برنج در مزرعه می تواند دسترسی فسفر خاک را تا چهار برابر نسبت به تیمار شاهد افزایش دهد (گوش^۱ و همکاران، ۲۰۲۲).

۴.۴ پتاسیم

براساس جدول تجزیه واریانس اثر ساده و متقابل رقم و تیمار بر غلظت پتاسیم در تمامی اندامهای هوایی گیاه تحت تمامی تیمارهای سیلیکاته در سطح یک درصد (به جز اثر ساده رقم بر غلظت پتاسیم در برگ پرچم که در سطح پنج درصد) معنی دار شدند (جدول ۱۰).

جدول ۱۰. جدول تجزیه واریانس اثرات رقم و منابع مختلف سیلیسیم بر غلظت پتاسیم در اندامهای مختلف گیاه برنج

منابع تغییرات	درجه آزادی	برگ پرچم	زیست توده	دانه
تکرار	۲	۱۱/۳۵۶	۰/۶	۲/۰۵۳۱
رقم	۱	۷۲۶/۷۴۳*	۱۸۵۵۴/۳**	۹۳/۳۴۳۶**
خطای تکرار × رقم	۲	۱۷/۱۳۷	۰/۸	۰/۵۷۸۱
تیمار	۱۰	۱۲۳/۱۷۴**	۴۷۷/۵**	۴۷/۰۳۸۷**
رقم × تیمار	۱۰	۲۲۰/۳۲۹**	۴۱۷/۰**	۷۸/۵۱۳۷**
خطای تکرار × رقم × تیمار	۴۰	۷/۰۱۴	۳/۷	۱/۵۷۳۶
ضریب تغییرات (رقم × تکرار)		۸/۲۱	۰/۶۷	۲/۵۸
ضریب تغییرات (تیمار × رقم × تکرار)		۵/۲۵	۱/۴۴	۴/۲۵

***، **، * : به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و عدم تفاوت معنی دار می باشد.

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین غلظت پتاسیم در برگ پرچم در هر دو رقم طارم و شیرودی در تیمار F+SiKL (کود پایه و محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم محلول) مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد و کود پایه حدود ۲۰ درصد افزایش غلظت پتاسیم داشت. بیش‌ترین غلظت پتاسیم در زیست‌توده در تیمارهای S₂ (کود پایه و ۱ تن در هکتار بیوجار) رخ داد که نسبت به تیمار شاهد افزایش غلظت حداقل ۱۹ درصد و ۱۷ درصد نسبت به کود پایه نشان داد. دانه در رقم شیرودی مقادیر جذب پتاسیم بیش از رقم طارم و تیمار F+SiK₂ (کود پایه و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات پتاسیم جامد) نسبت به تیمار شاهد ۹۰ درصد و حدود ۵۰ درصد غلظت پتاسیم را نسبت به کود پایه بهبود بخشید (جدول ۱۱).

جدول ۱۱. مقایسه میانگین اثر متقابل رقم و تیمارهای کودی بر میزان غلظت پتاسیم در برگ پرچم، زیست‌توده و دانه برنج (درصد)

تیمار کودی	برگ پرچم		زیست‌توده		دانه	
	طارم هاشمی	شیرودی	طارم هاشمی	شیرودی	طارم هاشمی	شیرودی
B	۱/۴۴ ^{fg}	۱/۴۴ ^{fg}	۱/۱۶ ^h	۱/۴۳ ^d	۲/۷۰ ^{d-g}	۲/۳۱ ^c
F	۱/۴۵ ^{fg}	۱/۷۴ ^a	۱/۳۳ ^{ef}	۱/۴۵ ^d	۲/۶۳ ^{e-i}	۲/۸۴ ^{de}
F + S ₁	۱/۵۳ ^{cde}	۱/۵۱ ^{de}	۱/۳۴ ^{ef}	۱/۶۳ ^b	۳/۳۴ ^c	۲/۷۶ ^{def}
F + S ₂	۱/۵۴ ^{cd}	۱/۴۴ ^{fg}	۱/۳۶ ^e	۱/۷۱ ^a	۳/۱۹ ^c	۲/۵۲ ^{ghi}
F + Sb ₁	۱/۵۳ ^{cde}	۱/۴۸ ^{ef}	۱/۰۳ ⁱ	۱/۳۳ ^d	۲/۵۰ ^{hi}	۲/۶۳ ^{ef-i}
F + Sb ₂	۱/۵۳ ^{cde}	۱/۵۳ ^{cde}	۰/۹۶ ⁱ	۱/۶۴ ^f	۲/۷۰ ^{e-i}	۳/۱۳ ^c
F + SiK ₁	۱/۴۱ ^g	۱/۴۸ ^{ef}	۱/۲۳ ^g	۱/۵۱ ^a	۲/۴۳ ⁱ	۳/۱۸ ^c
F + SiK ₂	۱/۳۶ ^h	۱/۵۷ ^c	۱/۲۰ ^g	۱/۵۰ ^{bc}	۲/۸۱ ^{def}	۴/۴۱ ^a
F + SiM ₁	۱/۴۳ ^{fg}	۱/۵۱ ^{de}	۱/۰۲ ⁱ	۱/۵۴ ^b	۲/۷۴ ^{def}	۳/۷۰ ^b
F + SiM ₂	۱/۵۰ ^{de}	۱/۵۵ ^{cd}	۱/۰۱ ⁱ	۱/۴۳ ^d	۲/۹۱ ^d	۲/۷۰ ^{d-h}
F + SiKL	^a ۱/۷۴	۱/۶۳ ^b	۱/۱۵ ^h	۱/۵۴ ^b	۳/۱۵ ^c	۲/۵۲ ^{ghi}

در هر ستون و ردیف حرف یا حروف مشابه نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌هاست (براساس آزمون LSD در سطح پنج درصد).

B: تیمار شاهد، F: تیمار کود پایه، F+S₁: کود پایه + ۲ تن در هکتار کاه‌کلش برنج، F+S₂: کود پایه + ۴ تن در هکتار کاه و کلش برنج، F+Sb₁: کود پایه + ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار بیوجار کاه و کلش برنج، F+Sb₂: کود پایه + ۱ تن در هکتار بیوجار کاه و کلش برنج، F+SiK₁: کود پایه + ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات پتاسیم جامد، F+SiK₂: کود پایه + ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات پتاسیم جامد، F+SiM₁: کود پایه + ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات معدنی، F+SiM₂: کود پایه + ۸۰۰ کیلوگرم در هکتار سیلیکات معدنی، F+SiKL: کود پایه + محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم محلول.

سیلیسیم از طریق افزایش فعالیت زیستی و شیمیایی عناصر موجود در آب خاک می‌تواند دستیابی گیاه به اشکال قابل جذب عناصر را بهبود بخشد. سیلیسیم در واقع با کنترل جذب سدیم سبب افزایش جذب و غلظت پتاسیم در اندام‌های هوایی گیاه می‌شود (بوچارنیکوا^۱ و همکاران، ۲۰۱۴). استفاده از کود سیلیسیم علاوه بر افزایش جذب سیلیسیم در برنج، مقادیر نیتروژن، فسفر و پتاسیم را در زیست‌توده گیاه نسبت به تیمار شاهد بهبود می‌بخشد (کونگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۷). در مطالعه‌ای مشابه مشاهده شد که مصرف منابع کودی سیلیکاته منجر به افزایش غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، آهن، منگنز و مس در اندام هوایی گیاه می‌شود و با ایجاد تعادل مناسب عناصر غذایی خصوصاً پتاسیم موجود در بافت دیواره سلولی، مقاومت گیاه را نسبت به کرم ساقه‌خوار افزایش می‌دهد (الیوا^۳ و همکاران، ۲۰۲۱).

1. Bocharnikova
2. Cuong
3. Oliva

۵. بحث

بنابر آنچه ذکر شد و نتایج حاصل از این پژوهش، تغذیه صحیح گیاه یکی از راه‌کارهای اصلی کاهش اثرات زیان‌بار تنش‌های زیستی و غیرزیستی است و نقش قابل‌ملاحظه‌ای در افزایش عملکرد آن دارد. در همین ارتباط، نقش برخی عناصر نظیر سیلیسیم مورد توجه برخی متخصصین تغذیه گیاه قرار گرفته است. با این تفاسیر هنوز سیلیسیم به‌عنوان عنصر ضروری طبقه‌بندی نشده است. اما به‌عنوان یک عنصر مفید در نظر گرفته می‌شود. برنج با نزدیک به ۱۵۴ میلیون هکتار برداشت در هر سال، یکی از مهم‌ترین محصولات غلات در جهان است که غذای اصلی و منبع اصلی دریافت کالری بیش از ۳ میلیارد نفر از مردم جهان است (یولاح^۱ و همکاران، ۲۰۱۷).

تهیه یک برنامه دقیق در جهت تأمین سیلیسیم به فرم‌های مورد نیاز گیاه در جهت تولید محصولات سالم و ارگانیک مورد نیاز است. در واقع جایگزینی مناسب کودهای سیلیکاته به‌جای مبارزه شیمیایی علیه تنش‌های زیستی و غیرزیستی بر روی گونه‌های خاص زراعی می‌تواند چالش‌های محیط زیست را کاهش دهد (بوراسکا^۲ و همکاران، ۲۰۲۲). گونه‌های گیاهی با ژنتیک مختلف ممکن است از نظر انباشت سیلیسیم و واکنش نسبت به کود متفاوت باشند. اگرچه تجمع سیلیسیم یک واکنش فیلوژنیک است، ویژگی در دسترس بودن سیلیسیم بر میزان جذب سیلیسیم توسط گیاهان تأثیر دارد. با وجود این که اغلب پژوهش‌ها روی کاربرد سیلیسیم با گیاهان انباشتگر انجام شده است، کاربرد سیلیسیم بر بهبود عملکرد سایر گیاهان نیز مؤثر است (کوواکس^۳ و همکاران، ۲۰۲۲). یکی دیگر از مزایای کاربرد سیلیسیم، افزایش تنفس خاک، در خاک‌های دچار کمبود فسفر می‌باشد. سیلیسیم از اجزای اصلی تنظیم‌کننده حرکت فسفر در خاک‌ها است و این فرضیه وجود دارد که سیلیسیم نقش مهمی بر دسترسی فسفر در انواع خاک‌ها دارد (ونگ^۴ و همکاران، ۲۰۱۹).

افزایش میزان مصرف سیلیسیم منجر به افزایش جذب و تجمع سیلیسیم در کاه و کلش و زیست‌توده برنج و غلات می‌شود. در واقع محتوای سیلیسیم انباشته‌شده در دانه نیز در کرت‌های آزمایشی با دز سیلیسیم بالاتر به‌طور قابل توجهی بیش تر بود و تجمع عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم درون دانه و زیست‌توده متأثر از میزان مصرف نیتروژن و سیلیسیم بود (کونگ^۵ و همکاران، ۲۰۱۷).

با توجه به این موضوع که در حال حاضر در کشورمان هنوز تولید کود سیلیکاته به‌طور گسترده صورت نمی‌گیرد، بی‌شک استفاده از منابع محلی از جمله کاه و کلش برنج و بایوچار حاصل از آن به‌دلیل پایداری در خاک می‌تواند در جهت جایگزینی عناصر غذایی برداشت‌شده و حفظ باروری خاک تا حدود زیادی کارگشا باشد. بنابراین توصیه یک برنامه مدیریتی دقیق در جهت تأمین عناصر غذایی مورد نیاز برنج از جمله سیلیسیم از طریق بازگردانی بقایای محصول به زمین تحت کشت و توصیه کودی دقیق، در جهت رشد یک گیاه سالم، تولید پایدار این محصول و در عین حال حفظ محیط زیست ضروری می‌باشد.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد کاربرد تمامی تیمارهای سیلیکاته نسبت به تیمار شاهد و کود پایه موجب افزایش غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم و سیلیسیم در اندام‌های هوایی گیاه می‌شود و میانگین غلظت عناصر غذایی در اندام‌های

1. Ullah
2. Borawska
3. Kovacs
4. Wang
5. Cuong

هوایی گیاه در رقم طارم بیش از رقم شیروودی بود. عنصر فسفر تحت اثر استفاده از منابع سیلیسیم، بیش‌ترین مقادیر افزایش غلظت را در اندام‌های هوایی نشان داد. براساس مشاهدات این پژوهش، تیمارهای بیوچار کاه و کلش برنج و خود کاه و کلش برنج بیش‌ترین اثر بخشی را روی افزایش غلظت نیتروژن داشتند و تیمار محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم، مؤثرترین تیمار به‌منظور افزایش غلظت فسفر و پتاسیم در اندام‌های هوایی برنج بود و در نهایت تیمار سیلیسیم معدنی، می‌تواند بهترین منبع در جهت افزایش غلظت سیلیسیم در اندام‌های هوایی برنج باشند.

بی‌شک استفاده از منابع محلی از جمله منابع سیلیسیم معدنی، کاه و کلش برنج و بیوچار حاصل از آن به‌دلیل پایداری در خاک می‌تواند در جهت جایگزینی عناصر غذایی برداشت شده و حفظ باروری خاک تا حدود زیادی کارگشا باشد. به همین منظور به پژوهش‌های گسترده‌تری در این حوزه موردنیاز است.

۷. تشکر و قدردانی

از حمایت‌های علمی و تجربی بی‌دریغ استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر محمدعلی بهمنیار و سایر اساتید ارجمندم که مرا در اجرای این آزمایش و نگارش این مقاله یاری دادند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

داوودی، محمدحسین؛ دوانگر، ناصر؛ طهرانی، محمد مهدی؛ مشیری، فرهاد و امیری لاریجانی، بهمن (۱۳۹۳). دستورالعمل مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه برنج. تهران: مؤسسه تحقیقات خاک و آب.

References

- Barnes, R. B., Richardson, D., Berry, J. W., & Hood, R. L. (1945). Flame photometry: A rapid analytical procedure. *Industrial and Engineering*, 17(10), 605-611.
- Borawska, J. B., Mastalerczuk, G., Janicka, M., & Wrobel, B. (2022). Effect of silicon-containing fertilizers on the nutritional value of grass-legume mixtures on temporary grasslands. *Agriculture*, 12, 145.
- Bocharnikova, E., & Matichenkov, V. (2014). Silicon fertilizers: Agricultural and environmental impacts. In *Fertilizers: Components, Uses in Agriculture and Environmental Impacts*. New York: Nova Science Publishers Inc.
- Bower, G. A., Reitemeier, R. F., & Ireman, M. F. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkaline soils. *Soil Science*, 73, 61-251.
- Chen, H., Zheng, C., Tu, C., & Shen, Z. (2010). Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metals. *Chemosphere*, 41, 229-234.
- Cuong, T., Ullah, X., Datta, H., & Hanh, T. C. (2017). Effects of silicon-based fertilizer on growth, yield and nutrient uptake of rice in tropical zone of Vietnam. *Rice Science*, 24(5), 283-290.
- Davoodi, M., Davatgar, H., Amiri Larigani, N., Moshiri, B., & Tehrani, F. (2015). *Guidelines for the management of soil fertility nutrition and rice nutrition*. Tehran: Soil and Water Research Institute. (In Persian).
- Gao, D. T., Fang, X., Bu, H., Li, Q., Wang, X., & Zhang, R. (2018). Interactive effects of nitrogen and silicon addition on growth of five common plant species and structure of plant community in alpine meadow. *Caten*, 169, 80-89.

- Ghosh, A., Biswas, D. R., Das, S., Das, T. K., Bhattacharyya, R., Alam, K., & Rahman, M. M. (2022). Rice straw incorporation mobilizes inorganic soil phosphorus by reorienting hysteresis effect under varying hydrothermal regimes in a humid tropical inceptisols. *Indian Society of Soil Science*, 225, 105531.
- Haghighi, M., & Pessarakli, M. (2013). Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherrytomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. *Scientia Horticulture*, 161, 111-117.
- Jawahar, S., & Vaiyapuri, V. (2010). Effect of sulphur and fertilization on growth and yield of rice. *International Journal of Current Research*, 9(1), 36-38.
- Kovacs, S., Kutasy, E., & Csajbok, J. (2022). The multiple role of silicon nutrition in alleviating environmental stresses in sustainable crop production. *Plants*, 11, 1223.
- Kuo, S. (1996). Phosphorus. In *Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods*. Edited by Sparks D. L. Madison: Wisconsin SSSA Book Series.
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon and organic matter. In *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*. Madison: Wisconsin.
- Liang, Y., Nikolic, M., Belanger, R., Gong, H., & Song, A. (2015). *Silicon in agriculture from theory to practice*. Dordrecht: Springer Science.
- Oliva, K. M. E., Dasilva, F. B. V., Araújo, P. R. M., Deoliveira, E. C. A., & Donascimento, C. W. A. (2021). Amorphous silica-based fertilizer increases stalks and sugar yield and resistance to stalk borer in sugarcane grown under field conditions. *Journal of Plant Nutrient, Soil Society*, 21, 2518-2529.
- Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S., & Dean, L. A. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. Washington: Circular, United States Department of Agriculture.
- Tayad, R., Chirmire, A., Khan, W., Lay, L., Attipoe, J. Q., & Kim, Y. (2022). Silicon as a smart fertilizer for sustainability and crop improvement. *Biomolecules*, 12, 1027.
- Wang, L., Ashraf, U., Chang, C., Abrar, M., & Cheng, X. (2019). Effects of silicon and phosphatic fertilization on rice yield and soil fertility. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 557- 565.
- Wenjia, J., Wang, Z., Yafei, S., Wang, Y., Ch, B., Zhou, B., & Zheng, X. (2020). Impacts of biochar an Silicat fertilizer on arsenic accumulation in Rice (*Oryza sativa* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189, 109928.
- Xiaoyu, L., Lianqing, L., Rongjun, B., Ch. De, Q., Jingjing, W., Grace, P., Genxing, Z., Xuhui, Z., & Jufeng, Z. (2012). Effect of biochar amendment on soil-silicon availability and rice uptake. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(1), 91-96. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200582>.
- Xin Xiao, B., & Zhu, L. (2014). Transformation, morphology and dissolution of silicon and carbon in rice straw- derived biochar under different pyrolytic. *Journal of Environmental Science and Technology*, 43, 3411-3419. <http://dx.doi.org/10.1021/es405676h>.
- Xu, D., Gao, T., Fang, X., Bu, H., Li, Q., Wang, X., & Zhang, R. (2020). Silicon addition improves plant productivity and soil nutrient availability without changing the grass: legume ratio response to N fertilization. *Scientific Reports*, 10, 10295.