Plant Prod., 2025, 48(3), 455-467
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.48044.2213
Received: 25 September 2024
Accepted: 2 March 2025

Plant Productions

Research Article

Effects of silica addition to paddy soil on morphological traits and silica accumulation in rice stems

Sahar Hosseynpour [1], Reza Ebrahimi Gaskarei[2*]

1. M.Sc. Graduate, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran
2. Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture University of Guilan, Rasht, Iran

Citation: Hosseynpour, S., Ebrahimi Gaskarei, R. (2025). Effects of silica addition to paddy soil on morphological traits and silica accumulation in rice stems. *Plant Productions,* 48(3), 455 - 467.

Abstract

Introduction

Silicon, primarily absorbed by rice roots in the form of H_4SiO_4, plays a pivotal role in rice cultivation. It is estimated that approximately 300 kg of silicon is absorbed from the soil per hectare when producing 5 tons of paddy. The critical silicon content in rice during the tillering and ripening stages is 5% of dry weight in the stem and flag leaf. Sufficient silicon levels in the stem help reduce lodging, thus potentially lowering harvesting costs.

Materials and Methods

This research was carried out at the Faculty of Agriculture, University of Guilan, using a completely randomized design with 13 treatments and three replications. The objective was to evaluate the effects of varying silica levels, derived from four different sources, on rice plant height, stem diameter, number of nodes, and silica concentration in the stem. Silica sources included paddy husk, husk ash, husk powder and a siliceous liquid fertilizer. The experiment was performed using 39 pots containing paddy soil. The efficacy of these silica sources was assessed based on changes in plant height, stem diameter, number of nodes, and silica accumulation in both stems and leaves.

Results and Discussion

In the initial measurement, no significant differences in stem height were observed among the 13 treatments, indicating that silicon likely requires a longer period to influence stem elongation in rice. However, with extended exposure to silica amendments, marked effects on morphological traits became evident. For example, in the S3 treatment (silica extracted from paddy husk), stem height increased from 15 cm to 8 cm over the growth period. The average number of nodes in

* **Corresponding Author:** Reza Ebrahimi Gaskarei
E-mail: rezaebrahimi@guilan.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.

the S3 treatment increased from 3.66 to 7.33 and in the C3 treatment from 3.33 to 6.66, demonstrating a statistically significant difference between the S3 treatment and the others. At the conclusion of vegetative growth, the stem diameters in the control, S3, and C3 treatments were 2.63, 4.98 and 4.97 mm, respectively, with the S3 and C3 treatments significantly outperforming the control.

Silicon uptake and translocation to the stem were highest in the S3 and C3 treatments with statistically significant differences observed among treatments. In July, the silicon content in stems was 7.06% for S3, 6.04% for C3, and only 1.94% for the control (B). By August, significant differences in stem silicon concentration persisted across all treatments, peaking at 10.79% for S3, 8.03% for C3, and 3.69% for the control. In September, the silicon content in stems decreased, with the highest value of 2.1% in S3, which remained statistically significant higher than in C1 and B. The next highest, C3 at 2.06 %, was also significantly higher than C1 and B. Except for C1, all other treatments showed significant differences only when compared to the control. It is noteworthy that the optimal silicon content optimal for rice stems is 8-10%; levels below 5% indicate deficiency. Both S3 and C3 treatments were identified as optimal in terms of plant height, stem diameter, number of internodes and internode length.

Conclusion

The results indicate that as rice plants age and increase in size, silicon concentrations in the stem and leaf decrease, with a more pronounced decline in the leaf. This likely reflects the translocation of silicon from these organs to the husk at the onset of reproductive growth. Among the various treatments, application of 0.24 grams of extracted silicon per 3 kg of soil yielded the greatest improvement in plant growth, followed by commercial siliceous fertilizer. Comparisons between paddy husk ash and rice husk powder treatments revealed that husk ash was more effective for most morphological traits evaluated.

Overall, silica addition enhanced rice growth. Therefore, in paddy soils with silicon concentrations less than 100 mg. kg^{-1}, silicon fertilizer application is recommended. Utilizing silica extracted from rice husk milling by-products can fulfill the silicon requirements of rice fields, providing a sustainable and environmentally friendly source of the essential element of paddy soil fertility management.

Keywords: Agricultural residue, Rice husk, Silica fertilizer, Silicon extraction

تولیدات گیاهی، ۱۴۰۴، ۴۸(۳)، ۴۵۵-۴۶۷
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.48044.2213
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲

تولیدات گیاهی
مقاله پژوهشی

اثرات افزودن سیلیسیم به خاک شالیزار بر صفات مورفولوژیک و تجمع سیلیس در ساقهٔ برنج

سحر حسین پور [۱]، رضا ابراهیمی گسکریی [۲] *

۱-دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکدهٔ علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۲-استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکدهٔ علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

سیلیسیم محلول خاک به صورت اسید مونوسیلیسیک توسط ریشهٔ برنج جذب می‌شود. یک شالیزار با عملکرد ۵ تن شلتوک در هکتار، حدود ۳۰۰ کیلوگرم سیلیسیم از خاک جذب می‌کند. در مراحل پنجه‌زنی و ساقه‌دهی، حد بحرانی سیلیسیم در ساقهٔ برنج، ۵ درصد و حد مطلوب آن حدود ۱۰ درصد وزن خشک است. کمبود سیلیسیم در ساقه باعث خوابیدگی بوته‌ها، افزایش هزینه برداشت و افزایش حساسیت به آفات و بیماری‌ها می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی اثر افزودن سیلیس به خاک شالیزار بر ارتفاع، تعداد گره، قطر و میزان سیلیس در ساقه، در دانشکدهٔ علوم کشاورزی دانشگاه گیلان در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۱۳ تیمار شامل سه سطح از سیلیس از چهار منبع مختلف شامل سیلیس استخراج شده از پوستهٔ شلتوک (S_1، S_2، S_3)، خاکستر پوستهٔ شلتوک (A_1، A_2، A_3)، پودر پوستهٔ شلتوک (P_1، P_2، P_3) و کود تجاری سیلیسیم‌دار (C_1، C_2، C_3) در ۳۹ گلدان حاوی خاک شالیزار اجرا شد. در ابتدای رشد (تیر ۹۸)، ارتفاع ساقه در تمام ۱۳ تیمار حدود ۱۵ سانتی‌متر و بدون تفاوت معنی‌دار بود. اما در آخرین اندازه‌گیری (شهریور ۹۸)، ارتفاع ساقه‌ها تفاوت معنی‌دار یافت و بیشترین ارتفاع (۸۳ سانتی‌متر) مربوط به تیمار S_3 بود. همچنین، میانگین تعداد گره در ساقه در تیمار S_3 از ۳/۶۶ به ۷/۳۳ و در تیمار C_3، از ۳/۳۳ به ۶/۶۶ عدد افزایش یافت که تیمار S_3 از نظر آماری با سایر تیمارها تفاوت معنی‌دار داشت. در پایان رشد رویشی، قطر ساقه در تیمارهای S_3 و C_3 به ترتیب ۴/۹۸ و ۴/۹۷ میلی‌متر بود که به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارها بود. همچنین این دو تیمار بیشترین مقدار سیلیسیم ساقه را داشتند. در تیرماه، مقدار سیلیسیم در ساقهٔ تیمار شده با سیلیس استخراج شده از پوستهٔ شلتوک (S_3)، ۷/۰۶، تیمارشده با کود سیلیسیم دار تجاری (C_3) ۶/۰۴ و در تیمار شاهد (B) ۱/۹۴ درصد به دست آمد. در مرداد ماه نیز مقدار سیلیسیم در ۱۳ تیمار تفاوت معنی‌دار داشت. بیشترین مقدار سیلیس در ساقه در تیمار (S_3) معادل ۱۰/۷۹، در تیمار C_3 ، ۸ /۰۳ و در شاهد (B)، ۳/۶۹ درصد بود. در شهریور ماه مقدار سیلیسیم در ساقه روند کاهشی داشت و بیشترین مقدار سیلیسیم ساقه مربوط به تیمار S_3 و C_3 به ترتیب ۲/۱۵ و ۲/۰۶ درصد بود که فقط با تیمارهای C_1 و B تفاوت معنی‌دار داشتند. در واقع مقدار سیلیس در ساقه در پایان رشد رویشی در تیمارهایی که سیلیس دریافت کرده بودند، اگرچه بسیار بیشتر از تیمار شاهد بود ولی با هم تفاوت معنی‌دار نداشتند. با افزایش سن و زیست‌توده گیاه، مقدار سیلیسیم ساقه کاهش یافت که به احتمال زیاد ناشی از انتقال سیلیسیم به پوسته شلتوک در آغاز رشد زایشی است. استفاده از خاکستر پوستهٔ شلتوک نسبت به پودر آن، در بیشتر صفات عملکرد بهتری نشان داد. به طور کلی افزودن ۰/۲۴ گرم سیلیسیم استخراج شده

نویسنده مسئول: رضا ابراهیمی گسکریی
رایانامه: rezaebrahimi@guilan.ac.ir

از پوستهٔ بیرونی شلتوک به ۳ کیلوگرم خاک (معادل ۲۴۰ کیلوگرم سیلیس در هکتار) بهترین تیمار بود و بیشترین اثر مثبت را بر رشد برنج داشت.

کلیدواژه‌ها: استخراج سیلیس، بقایای کشاورزی، پوستهٔ شلتوک، کود سیلیس‌دار

مقدمه

برنج پس از گندم مهم‌ترین محصول زراعی جهان است. بیش از ۱۸ عنصر برای رشد و نمو برنج ضروری است. عنصر سیلیسیم برای اغلب گیاهان یک عنصر مفید است (Dong *et al.*, 2024; Nakata *et al.*, 2008) ولی برای برنج ضروری است (Mengel, 2001). گزارش شده است که مصرف سیلیسیم برای افزایش تحمل به خشکی با افزایش کارایی فتوشیمیایی و جذب مواد مغذی معدنی در برنج مفید است (Chen *et al.*, 2011) این عنصر در محلول خاک به طور عمده به فرم اسید مونوسیلیسیک (H_4SiO_4) است و برنج نیز آن را به همین فرم جذب می‌کند (Yan *et al.*, 2024). در گیاه برنج مقدار جذب سیلیسیم بیشتر از نیتروژن است (Doberman, 2000). گیاه برنج با تولید ۵ تن در هکتار شلتوک در حدود ۴۷۰-۲۳۰ کیلوگرم سیلیسیم را به فرم H_4SiO_4 از خاک شالیزار برحسب نوع خاک و رقم جذب می‌کند (Jahanshah *et al.*, 2011). حد بهینهٔ سیلیسیم در برگ و ساقه برنج ۱۰-۸ درصد وزن خشک است و اگر کمتر باشد یعنی مقدار سیلیسیم ناکافی است. جذب این عنصر توسط ریشه برنج از خاک از نوع جذب فعال بوده و تا ۱۰۰ میلی‌گرم سیلیسیم در هر گرم بافت گیاه برنج (۱۰ درصد وزنی) عادی است. به طور کلی گیاهانی که مقدار زیاد سیلیسیم در اندام‌های خود انباشت می‌کنند گیاهان انباشت‌گر سیلیسیم نامیده می‌شوند که سیلیسیم انباشت شده ممکن است از ۵ تا ۲۰ درصد وزن خشک گیاه باشد (Dong *et al.*, 2024; Agarie *et al.*, 1996). پژوهش‌هایی در زمینهٔ توزیع، تجمع و فیزیولوژی سیلیسیم در مراحل مختلف رشد برنج انجام شده است (Dong *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2010; Motomura *et al.*, 2000). مطالعات محدودی برای تأیید ضرورت مصرف کودهای سیلیسیم‌دار در شالیزارها انجام شده است. با سنجش میزان سیلیسیم خاک در منطقهٔ چابکسر گیلان (روستای گیلانده) فراهمی این عنصر ۹/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم در خاک شالیزار گزارش شده است (Ramezani, 2014; Shahdi, 2002). در گزارشی مصرف کود سیلیسیم‌دار در خاک شالیزار، کارایی کود نیتروژن دار مصرف شده را افزایش داد (Cassman *et al.*, 2002). حد بحرانی سیلیسیم در شالیزار در مطالعات گذشته ۴۰ و در تحقیقات اخیر حدود ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک اعلام شده است (Jugal K. Malav *et al.*, 2015). پوستهٔ بیرونی شلتوک برنج با حدود ۲۰ درصد سیلیسیم، در حجم انبوه به عنوان پسماند هر سال در کارخانجات شالیکوبی، بر جای می‌ماند. تولید شلتوک برنج در جهان حدود ۷۵۶ میلیون تن و سهم ایران حدود ۲ میلیون تن است (FAO, 2011). مقدار تولید سالانه پوستهٔ بیرونی شلتوک در کارخانجات شالیکوبی در فرایند تبدیل شلتوک به برنج، حدود یک پنجم وزن شلتوک تولید شده است (Chakraborty *et al.*, 2011)، یعنی در ایران سالانه تولیدحدود ۴۰۰ هزار تن پوسته بیرونی شلتوک به عنوان پسماند آلی سیلیسیم دار قابل پیش‌بینی است. در کشور ما، پوستهٔ درونی شلتوک (پوستهٔ نرم) به عنوان خوراک دام و طیور مصرف می‌شود اما پوستهٔ بیرونی شلتوک با ۷۰ درصد لیگنوسلولز و ۲۰ درصد سیلیسیم، ارزش تغذیه‌ای برای خوراک دام و طیور ندارد (Angelova *et al.*, 2011). استخراج سیلیس از زیست تودهٔ گیاهی به تازگی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Park *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2011) در مطالعه‌ای، تأثیر دما و زمان کلسینه کردن بر استخراج سیلیس از پوستهٔ شلتوک با و نیز بدون شستشو با اسید را بررسی و دمای پایین، زمان کمتر و شستشو با اسید را برای استخراج سیلیسیم پیشنهاد کردند (Chen *et al.*,

2011; Park *et al*., 2023). در یک تحقیق دیگر، استخراج سیلیسیم از گیاه جگن بررسی و در آن، از تلفیق دو روش شامل شستشو با اسید و نیز احتراق کنترل شده در دمای ۶۰۰–۸۰۰ درجهٔ سلسیوس استفاده شد. نتایج نشان داد که سیلیس بی‌شکل با خلوص ۹۸ درصد در دمای ۶۰۰ درجهٔ سلسیوس قابل استحصال است (Ji *et al*., 2023; Ghorbani *et al*., 2013). به استناد سطح زیر کشت برنج و تولید سالانهٔ شلتوک کشور (Ministry of Agriculture Jihad, 2015) ظرفیت ۹۰ هزار تن سیلیس سالانه قابل استحصال است. با توجه به مقدار قابل تولید سالانه پوستهٔ شلتوک برنج به عنوان دورریز یا پسماندکارخانجات شالیکوبی فقط در شمال کشور حدود ۱۸ هزار تن سیلیس از این منبع می‌تواند استحصال شود (Ebrahimi Gaskarei, 2017). به دلیل هزینهٔ بالای کود سیلیسیم‌دار وارداتی و در دسترس نبودن آن و همچنین ارزان و در دسترس بودن پوستهٔ بیرونی شلتوک و نقشی که سیلیسیم بر رشد و نمو برنج و افزایش مقاومت آن در برابر آفات، بیماری‌ها و به ویژه ورس (خوابیدن) دارد، تولید سیلیسیم به فرم جامد پودری از این مادهٔ دورریز و بررسی اثر بخشی آن بر رشد برنج در مقایسه با کود سیلیسیم‌دار، از اهداف این پژوهش کاربردی است.

مواد و روش‌ها

نمونهٔ خاک از شالیزار منطقهٔ خش بیجار از توابع چابکسر در شهرستان رودسر در شرق گیلان تهیه و پس از هواخشک شدن و عبور از الک ۱۰ مش، برخی از ویژگی‌های آن شامل pH و هدایت الکتریکی (Mc Lean, 1982)، کربن آلی به روش اکسیداسیون (Walkley, 1934)، بافت به روش هیدرومتری (Day, 1955)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش چاپمن (Chapman, 1965) و مقدار سیلیسیم با اسپکتروفتومتر به روش دانتوف (Dantoff *et al*., 2001) با تعیین شدت رنگ آبی، انجام شد.

نتایج اولیهٔ آزمایش خاک مورد مطالعه، نشان داد که مقدار سیلیسیم قابل جذب این خاک بسیار کمتر از حد بحرانی سیلیسیم برای شالیزار است (جدول ۱). درصد مادهٔ آلی و درصد شن در خاک این شالیزار، بالا و درصد رس پایین است. سیلیسیم این خاک پایین‌تر از حد بحرانی سیلیسیم برای خاک شالیزار است. حد بحرانی برای سیلیسیم خاک در شالیزار در منابع جدید ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک اعلام شده است (Jugal K. Malav *et al*., 2015).

به منظور آگاهی از تأثیر مصرف منابع سیلیسیم‌دار بر توزیع سیلیسیم در برگ و ساقه در طول رشد رویشی سه بار نمونه‌برداری انجام و سیلیسیم موجود در برگ و ساقه با روش رنگ‌سنجی آبی و با دستگاه اسپکتروفتومتر تعیین شد.

تیمارهای آزمایشی حاوی سیلیس به شرح زیر آماده شدند:

پودر پوستهٔ شلتوک: مقداری از پوستهٔ بیرونی شلتوک با دستگاه، آسیاب، سپس پودر حاصله از الک ۲۰۰ مش عبور و به عنوان ماده حاوی سیلیس و یک تیمار سیلیسیم‌دار، مصرف و اثربخشی آن بررسی شد.

خاکستر پوستهٔ شلتوک: به پودر پوستهٔ بیرونی شلتوک، به مدت ۸ ساعت در کورهٔ الکتریکی با دمای ۸۰۰ درجهٔ سانتی گراد، حرارت داده شد و خاکستر حاصله به عنوان مادهٔ حاوی سیلیس و به عنوان تیمار سیلیسم‌دار، در گلدان ها استفاده شد (Kalra, 1998; Ji *et al*., 2023).

جدول ۱- ویژگی های خاک شالیزار استفاده شده در گلدان، جمع آوری شده از خش بیجار چابکسر در گیلان

Table1. Paddy soil characteristics used in pots, collected from Khashbijar in Chaboksar in Guilan

SiO_2	pH	CEC	Clay	Silt	Sand	Soil texture	OM	N	P	K
($mg.kg^{-1}$)	-	(me $100g^{-1}$)	%	%	%	-	%	%	($mg.kg^{-1}$)	($mg.kg^{-1}$)
20.5	6.1	20	10	44	46	Silty loam	9.1	0.45	11	120

سیلیس جامد استخراج شده از پوسته شلتوک: مقدار ۵ گرم خاکستر حاصل از پوستهٔ بیرونی شلتوک را در ارلن مایر ریخته و به آن ۳۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه اضافه و با اسید کلریدریک دو مولار، pH آن روی یک، تنظیم و به مدت ۲ ساعت، با دستگاه شیکر تکان داده شد. سپس با کاغذ صافی واتمن ۴۲، فیلتر و مواد باقی‌مانده روی کاغذ صافی چندین بار با اسید کلریدریک دو مولار شستشو و سیلیس آن خالص‌سازی شد (Kalapathy *et al.*, 1999; Ji *et al.*, 2021) سیلیس استخراج شده با ۶۰ میلی‌لیتر هیدروکسید پتاسیم نرمال ترکیب و pH آن با اسید کلریدریک نرمال در ۷/۰۴ تنظیم و در آون در ۴۰ درجه سلسیوس، خشک و به عنوان تیمار حاوی سیلیس استخراج شده از پوستهٔ شلتوک، در سه سطح، استفاده شد (Ji *et al.*, 2021).

کود تجاری سیلیسیم دار وارداتی مایع حاوی ۲۰ درصد سیلیس، خریداری و در سه سطح (C_1، C_2، C_3)، مصرف شد.

تیمارهای اعمال شده در این آزمایش گلدانی شامل شاهد (بدون افزودن سیلیسیم)، سیلیسیم سنتز شده در سه سطح، S_3=۰/۱۲، S_2=۰/۰۶ و S_1=۰/۰۳ گرم در سه کیلوگرم خاک، پودر پوسته بیرونی شلتوک P_3=۲/۴، P_2=۱/۲ و P_1=۰/۶ گرم در سه کیلوگرم خاک، خاکستر پوسته بیرونی شلتوک با سطوح A_3=۰/۱۲، A_2=۰/۰۶ و A_1=۰/۰۳ گرم در سه کیلوگرم خاک و کود سیلیکات پتاسیم تجاری مایع با سطوح C_3=۵/۵، C_2=۳/۵ و C_1=۱/۵ میلی‌لیتر در هر لیتر آب آبیاری (طبق دستور مصرف شرکت تولیدی مربوطه، در گلدان‌ها با سه کیلوگرم خاک با سه تکرار، مصرف شد. گلدان‌ها به گلخانه منتقل و بر اساس نتایج آزمون خاک مقدار مساوی از کودهای پایه شامل اوره، سوپرفسفات تریپل و کلرور پتاسیم و نیز ماده حاوی سیلیس بر اساس تیمارها، با خاک هر گلدان مخلوط و سه عدد نشاء برنج با ارتفاع برابر (حدود ۱۵ سانتی متر) و با فاصلهٔ مناسب در خاک هر گلدان، کشت شد. در اوایل رشد، خاک گلدان‌ها در وضعیت غرقاب (ارتفاع آب ۴ سانتی‌متر) حفظ و پس از دو هفته همزمان با وجین، تیمارهای حاوی سیلیس مجدد اعمال شد. نمونه‌برداری از گیاه در طول رشد به منظور تعیین صفات مرفولوژیک مرتبط با رشد، در سه زمان (شروع پنجه زنی، اواسط پنجه زنی و پایان ساقه‌دهی) شامل ارتفاع ساقه، تعداد میان‌گره، طول میان‌گره و در پایان دورهٔ رشد رویشی قطر ساقه نیز با کولیس اندازه‌گیری شد. همچنین به منظور تعیین مقدار سیلیسیم در گیاه در سه مرحله، هربار ۲ بوته را از یک سانتی‌متری سطح خاک بریده و مقدار سیلیسیم ساقه در عصاره مربوطه به روش رنگ سنجی آبی با اسپکتروفتومتر تعیین شد (Ma and Yamaji, 2006). نتایج تحقیق در ۱۳ تیمار با سه تکرار، در قالب طرح کاملاً تصادفی با نرم افزار SPSS آنالیز و مقایسه میانگین‌ها در سطح آماری یک درصد با آزمون توکی، انجام شد.

نتایج و بحث

مقدار SiO_2 در مواد سیلیسیم‌دار افزوده شده به خاک مقدار SiO_2 در ماده سیلیسیم‌دار سنتز شده در آزمایشگاه شیمی خاک دانشگاه گیلان، تعیین ولی مقدار SiO_2 درخاکستر پوسته بیرونی شلتوک برنج و نیز در پودر پوسته بیرونی شلتوک به استناد آنالیزهای موجود، در جدول ۲ گزارش شده است (Ma *et al.*, 2002). مقدار منبع سیلیسیم‌دار افزوده شده به خاک هر گلدان بر اساس درجه در تیمارها در زیر گزارش شده است (جدول ۲). خلوص منبع، فرم قابل جذب، موجودی سیلیسیم در خاک و حد بحرانی سیلیسم در خاک شالیزار محاسبه شده است. در جدول ۲، سیلیس (SiO_2) موجود در کود تجاری، فرم قابل جذب گیاه ولی در خاکستر پوسته شلتوک و پودر پوسته بیرونی شلتوک، سیلیسم کل است.

ارتفاع ساقه در ۶ زمان با فواصل دو هفته‌ای در طول دوره رشد رویشی برنج (از اواسط خرداد تا اواسط شهریور) اندازه‌گیری شد. طبق نتایج تجزیهٔ واریانس

(جدول ۳) و ارتفاع گیاه (جدول ۴) مشخص شد که تیمارهای اعمال شده بر ارتفاع ساقه در ۵ زمان اندازه‌گیری شده در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌دار دارد و فقط در اولین اندازه‌گیری، بین ۱۳ تیمار تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. به نظر می‌رسد سیلیسیم برای اثرگذاری بر ارتفاع ساقه در گیاه برنج، به زمان طولانی‌تر نیاز دارد، لذا زمان مصرف یا افزودن سیلیسیم به خاک شالیزار بر اثربخشی آن مؤثر است.

جدول ۲- مقدار سیلیس در منابع سیلیسیم دار مصرفی

Table 2. SiO_2 content in silica sources used in this research

Source of Silica	SiO_2 (% w/w)
Synthesized Silica	81
Rice Husk Ash	44
Rice Husk Powder	20
Commercial Silica Fertilizer	20

جدول ۳- خلاصهٔ نتایج تجزیه واریانس برای ارتفاع ساقه

Table 3. Summary of variance analysis results for stem height

Date	Mean Squares	Degree of Freedom	F.value
First measurement	0.40	12	1.20^{ns}
SEM	0.33	26	
Second measurement	7.36	12	4.69^{**}
SEM	0.91	26	
Third measurement	23.56	12	10.53^{**}
SEM	0.81	26	
Fourth measurement	99.61	12	7.61^{**}
SEM	0.80	26	
Fifth measurement	97.96	12	25.90^{**}
SEM	0.66	26	
Sixth measurement	114.11	12	50.27^{**}
SEM	1.00	26	

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال یک درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Means in each column, followed by similar letter are not significantly different at 1% probability level using Tukey test

جدول ۴- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر ارتفاع ساقه (سانتی‌متر) در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری

Table 4. Mean comparison of treatments effect on stem height (cm) at different times measurements

Treatment	First	Second	Third	Forth	Fifth	Sixth
B	14.66^{a}	19.50^{b}	33.26^{d}	33.66^{d}	56.66^{c}	56.66^{d}
S_1	14.83^{a}	21.00^{b}	31.00^{bc}	52.00^{a-c}	72.00^{b}	74.33^{bc}
S_2	14.66^{a}	23.00^{ab}	33.66^{a-c}	52.66^{a-c}	73.66^{b}	78.33^{b}
S_3	15.5^{a}	25.83^{a}	37.66^{a}	57.83^{a}	79.66^{a}	83.00^{a}
A_1	15.32^{a}	20.66^{a}	33.00^{bc}	42.00^{cd}	72.66^{b}	74.5^{bc}
A_2	15.66^{a}	22.66^{ab}	34.00^{a-c}	43.33^{b-d}	74.00^{b}	76.00^{bc}
A_3	15.33^{a}	22.83^{ab}	34.66^{a-c}	46.66^{b-d}	75.00^{ab}	77.00^{bc}
P_1	15.00^{a}	21.80^{b}	30.33^{dc}	48.66^{a-c}	71.00^{b}	73.33^{c}
P_2	14.66^{a}	22.00^{b}	32.33^{bc}	50.00^{a-c}	72.30^{b}	76.66^{bc}
P_3	15.00^{a}	22.30^{ab}	34.33^{a-c}	52.00^{a-c}	72.00^{b}	76.33^{bc}
C_1	15.00^{a}	20.60^{b}	30.66^{dc}	43.00^{b-d}	73.33^{b}	76.33^{bc}
C_2	14.66^{a}	21.16^{b}	32.33^{bc}	50.66^{a-c}	74.00^{ab}	77.33^{bc}
C_3	14.50^{a}	23.00^{ab}	35.32^{ab}	53.00^{ab}	75.00^{ab}	78.66^{ab}
SEM	0.33	0.91	0.81	0.80	0.66	1.00

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال یک درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Means in each column, followed by similar letter are not significantly different at 1% probability level using Tukey test

با توجه به نتایج مندرج در جدول ۴، در دومین اندازه‌گیری، تیمار S_3 با ارتفاع ۲۵/۸۳ سانتی‌متر و تیمارهای C_3 و S_2 با ارتفاع ۲۳ سانتی‌متر بیشترین ارتفاع را به خود اختصاص دادند. تیمار S_3 با تیمارهای C_2، C_1، P_2، P_1، S_1 و B از لحاظ آماری تفاوت معنی‌دار داشت. در سومین اندازه‌گیری تیمار S_3 با ارتفاع ۳۷/۶۶ سانتی‌متر و تیمار C_3 با ارتفاع ۳۵/۳۲ سانتی‌متر بیشترین ارتفاع ساقه را داشتند. این دو تیمار از لحاظ آماری با یکدیگر تفاوت معنی‌دار ندارند. تیمار S_3 با تیمارهای C_1، P_2، P_1، A_1، S_1 و B و تیمار C_3 فقط با تیمارهای C_1، P_1 و B از لحاظ آماری تفاوت معنی‌دار دارد و با بقیه تیمارها تفاوتی نشان نداد. در چهارمین اندازه‌گیری نیز بیشترین ارتفاع ساقه (۵۷/۸۳ سانتی‌متر) مربوط به تیمار S_3 است، که اگرچه از لحاظ مقدار بیشترین ارتفاع را دارا بود ولی از لحاظ آماری تنها با تیمارهای C_1،A_3،A_2،A_1،B تفاوت معنی‌دار دارد. در پنجمین اندازه‌گیری بیشترین ارتفاع ساقه مربوط به تیمار S_3 معادل ۷۹/۶۶ سانتی‌متر به دست آمد که از لحاظ آماری با تیمارهای C_1،P_3،P_2،P_1،A_1،S_2،S_1،B تفاوت داشت. در ششمین اندازه‌گیری نیز تیمار S_3 بیشترین ارتفاع ساقه (۸۳ سانتی‌متر) را به خود اختصاص داد که با تمام تیمارها بجز تیمار C_3، تفاوت معنی‌دار دارد. گزارش شده است که جذب بیشتر سیلیسیم باعث بهبود ارتفاع گیاه برنج می‌شود و با افزودن مقدار بیشتر سیلیس به بستر رشد، ارتفاع و استحکام ساقه برنج افزایش می‌یابد (Fallah, 2008; Dong *et al* ., 2024) .سیلیسیم باعث بهبود رشد رویشی، افزایش ماده خشک و کاهش تعرق می‌شود و بر کیفیت ساقه و ارتفاع آن اثر مثبت می‌گذارد (Agarie *et al.,* 1993; Dong *et al.,* 2024). مقدار سیلیسیم در ساقه برنج با افزایش مقاومت به ورس هم رابطهٔ مستقیم دارد (Mobasser *et al.,* 2008; Dong *et al.,* 2024).

فاصلهٔ بین گره‌ها و تعداد میان‌گره در ساقه: این دو پارامتر در سه زمان مختلف در طول رشد گیاه، اندازه‌گیری شد (جدول ۵). با توجه به اطلاعات درج شده در این جدول، در هر سه زمان هم از نظر تعداد گره‌ها و هم از نظر فاصله بین گره‌ها، بین تیمارها در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌دار است. در اولین اندازه‌گیری میانگین بیشترین تعداد گره و کمترین فاصله بین گره‌ها (به ترتیب ۳/۶۶ عدد و ۲ سانتی‌متر) در تیمار S_3 مشاهده شد که از لحاظ تعداد با تیمارهای C_1،P_1،A_1،B و از لحاظ طول با تیمارهای C_2، C_1، P_2، P_1، A_3، A_2،A_1، B تفاوت معنی‌دار نشان داد. در دومین اندازه‌گیری نیز بیشترین تعداد گره و کمترین طول میان گره‌ها مربوط به تیمار S_3 بود (به ترتیب ۶ عدد و ۱ سانتی‌متر) که از لحاظ آماری، تعداد گره با کلیه تیمارها، و از لحاظ طول میان‌گره فقط با تیمارهایB، A_1 و C_1 تفاوت معنی‌دار دارد.

در سومین اندازه‌گیری نیز بیشترین تعداد گره و کمترین طول میان‌گره (به ترتیب ۷/۳۳ عدد و ۱/۳۳ سانتی‌متر) مربوط به تیمار S_3 بود که از لحاظ تعداد گره با تیمارهای C_2،P_2،P_1،A_1،S_1،B و از لحاظ طول میان‌گره با تیمارهای B،P_1،P_2،A_2،A_1،C_2،C_1 تفاوت معنی‌دار داشت. بر اساس نتایج این تحقیق، افزودن سیلیسیم به خاک شالیزار با سیلیسیم ناکافی، منجر به کاهش فاصلهٔ بین گره‌ها در ساقه برنج شد. گزارش شده است که با افزایش مقدار سیلیسیم در ساقه برنج، فاصلهٔ بین گره‌ها در ساقه کاهش می‌یابد (Fallah, 2008 ; Dong *et al.,* 2024). در یک پژوهش دیگر، مصرف سیلیسیم منجر به افزایش تعداد گره‌ها و کاهش ورس در برنج شد(Khader *et al.,* 2011; Donge *et al.,* 2024). این وضعیت امکان برداشت مکانیزه برنج را فراهم می‌کند و در کاهش هزینه برداشت محصول، بسیار مهم است.

قطر ساقهٔ برنج فقط در پایان رشد رویشی، اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که از لحاظ آماری، بین

۱۲ تیمار و شاهد در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌دار وجود دارد (جدول ۶).

تیمار S_3 با قطر ۴/۹۸ میلی‌متر و تیمار C_3، با قطر ۴/۹۷، بیشترین قطر ساقه را به خود اختصاص دادند. این دو تیمار از لحاظ‌آماری با کلیه تیمارها تفاوت معنی‌دار دارند. با افزایش قطر ساقه، استحکام ساقه، افزایش و خطر ورس یا خوابیدن در برنج، کمتر می‌شود (Khader *et al.,* 2011; Dong *et al.,* 2024). در پژوهش دیگر، مصرف سیلیسیم بر قطر آن اثر مثبت داشت و با تجمع سیلیسیم در ساقه، استحکام ساقه افزایش و گیاه در برابر تنش‌های محیطی، بطور محسوسی مقاوم‌تر شد (Dong *et al.,* 2024; Hosseini *et al*., 2009).

جدول ۵- تأثیر تیمار خاک بر تعداد و طول میانگره در سه زمان

Table 5. Effect of soil treatment on the number and length of internode in three times

	First measurement		Second measurement		Third measurement	
Treatment	Length (cm)	Number	Length (cm)	Number	Length (cm)	Number
B	4.00^{a}	2.00^{b}	3.66^{a}	2.66^{c}	3.83^{a}	4.33^{e}
S_1	2.66^{bc}	3.33^{ab}	2.33^{a-c}	4.33^{b}	2.16^{b-d}	5.66^{b-e}
S_2	2.66^{bc}	2.66^{ab}	2.33^{a-c}	4.33^{b}	1.88^{cd}	6.00^{a-d}
S_3	2.00^{c}	3.66^{a}	1.00^{c}	6.00^{a}	1.33^{d}	7.33^{a}
A_1	3.50^{ab}	2.00^{b}	2.66^{ab}	3.66^{bc}	3.33^{a-c}	4.66^{de}
A_2	3.33^{ab}	2.33^{ab}	2.33^{a-c}	4.33^{b}	3.00^{a-c}	5.33^{b-e}
A_3	3.33^{ab}	2.66^{ab}	2.33^{a-c}	4.00^{bc}	2.66^{a-d}	6.00^{a-d}
P_1	3.33^{ab}	2.00^{b}	1.66^{bc}	3.00^{bc}	3.66^{ab}	5.00^{c-e}
P_2	3.66^{ab}	2.66^{ab}	2.33^{a-c}	3.66^{bc}	3.33^{a-c}	5.00^{c-e}
P_3	3.00^{a-c}	3.33^{ab}	2.00^{a-c}	4.00^{bc}	3.00^{a-c}	6.33^{a-c}
C_1	3.33^{ab}	2.00^{b}	3.00^{ab}	3.33^{bc}	3.50^{ab}	5.33^{b-e}
C_2	3.33^{ab}	2.66^{ab}	2.66^{ab}	3.66^{bc}	3.44^{a-c}	5.00^{c-e}
C_3	3.16^{a-c}	3.33^{ab}	1.50^{bc}	4.33^{b}	2.16^{b-d}	6.66^{ab}
SEM	0.19	0.22	0.30	0.30	0.31	0.20

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال یک درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Means in each column, followed by similar letter are not significantly different at 1% probability level using Tukey test

جدول ۶- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر قطر ساقه (سانتی‌متر)

Table 6. Mean comparison of treatments effect on stem diameter (cm)

Treatment	B	S1	S2	S3	A1	A2	A3	P1	P2	P3	C1	C2	C3	SEM
Diameter	2.63^{c}	3.8^{b}	3.83^{b}	4.98^{a}	3.21^{bc}	2.64^{c}	3^{bc}	3.16^{bc}	3.52^{bc}	3.59^{bc}	3.25^{bc}	2.72^{bc}	4.97^{a}	0.14

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال یک درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Means in each column, followed by similar letter are not significantly different at 1% probability level using Tukey test

جدول ۷- مقایسه میانگین سیلیسیم در برگ و ساقه برنج در تیمارها در زمان های مختلف

Table 7. Mean comparison of silicon in rice leaf and stem in different treatments and dates

	June		July		August	
Treatment	Leaf (%)	Stem(%)	Leaf(%)	Stem(%)	Leaf (%)	Stem(%)
B	1.61^{c}	1.94^{c}	4.78^{d}	3.69^{e}	1.24^{b}	0.52^{c}
S_1	4.96^{a-c}	4.84^{a-c}	8.73^{a-c}	7.69^{cb}	2.78^{ab}	1.53^{ab}
S_2	7.89^{a}	5.76^{ab}	9.21^{a-c}	8.61^{ab}	3.47^{ab}	1.8^{ab}
S_3	8.13^{a}	7.06^{a}	11.03^{a}	10.79^{a}	5^{a}	2.15^{ab}
A_1	5.58^{a-c}	3.59^{a-c}	6.74^{b-d}	6.67^{b-d}	1.37^{b}	1.55^{ab}
A_2	6.15^{ab}	4^{a-c}	7.53^{b-d}	4.06^{de}	2.23^{b}	1.63^{ab}
A_3	7.31^{ab}	5.23^{a-c}	8.07^{a-c}	6.26^{b-e}	2.35^{b}	1.73^{ab}
P_1	3.4^{cb}	3.47^{cb}	4.78^{d}	4.84^{d-e}	1.71^{b}	1.46^{ab}
P_2	3.52^{cb}	3.57^{a-c}	6.58^{cd}	4.84^{d-e}	1.89^{b}	1.54^{ab}
P_3	4.28^{a-c}	3.8^{a-c}	8.88^{a-c}	5.93^{b-e}	2.07^{b}	1.66^{ab}
C_1	5.5^{a-c}	3.8^{a-c}	7.25^{b-d}	7.48^{cb}	1.82^{b}	1.08^{bc}
C_2	7.14^{ab}	4.12^{a-c}	9.18^{a-c}	7.10^{cb}	1.89^{b}	1.69^{ab}
C_3	7.76^{a}	6.04^{ab}	9.72^{ab}	8.03^{ab}	4.98^{a}	2.06^{a}
SEM	0.79	0.88	0.63	0.76	0.69	0.61

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال یک درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 1% probability level using Tukey test

نتایج حاصل از توزیع و تجمع سیلیسیم در اندام‌های هوایی در سه مرحله از رشد رویشی در زیر ارائه شده است. با توجه به توزیع سیلیسیم در برگ و ساقه در تیرماه و به استناد نتایج مقایسه میانگین، بین ۱۳ تیمار در برگ و ساقه، اختلاف معنی‌دار وجود دارد (جدول ۷). مقدار سیلیسیم ساقه در گیاه تیمار شده با سیلیسیم سنتز شده S_3، ۷/۰۶٪، در تیمار کود تجاری C_3 ۶/۰۴ و کمترین مقدار هم در تیمار شاهد برابر ۱/۹۴ درصد بدست آمد. تیمارهای A_1، A_2و P_1 ، P_2 تفاوت معنی‌دار با شاهد نداشتند. حداکثر سیلیسیم در برگ در خاک تیمار شده، با سیلیسیم سنتز شده S_3 ۸/۱۳ درصد، به دست آمد که از لحاظ آماری فقط با تیمار B، P_1 و P_2 تفاوت معنی‌دار دارد. با توجه به توزیع سیلیسیم در ساقه و برگ در مرداد ماه، مقدار سیلیسیم در تیمارها تفاوت معنی‌دار، دارد(جدول ۷). بیشترین مقدار در ساقه گیاه تیمار شده با سیلیسیم سنتز شده S_3 برابر ۱۰/۷۹ و کمترین مقدار مربوط به شاهد B و برابر ۳/۶۹ درصد است. (جدول ۷). مقدار سیلیس در برگ در گیاه تیمار شده با سیلیسیم سنتز شده S_3 معادل ۱۱/۰۳ ، با بیشترین سطح سیلیس تجاری، ۹/۷۲ و کمترین مقدار هم مربوط به تیمار شاهد و برابر ۴/۷۸ درصد است.در برگ، تیمار S_3 با تیمارهای C_1، P_2، P_1، A_2، A_1، B تفاوت معنی‌دار دارد ولی با سایر تیمارها در یک محدوده است. در ساقه گیاه تیمار شده با بیشترین سطح سیلیسیم سنتز شده از پوسته شلتوک (S_3) با تیمارهایC_2، C_1، P_3، P_2، P_1، A_3، A_2، A_1، S_2، B تفاوت معنی‌دار دارد. بیشترین درصد سیلیسیم در برگ هم مربوط به خاک تیمار شده با سیلیس استخراج شده از پوسته شلتوک بود. در شهریور ماه توزیع سیلیسیم در ساقه و برگ به این صورت بود که از نظر مقدار سیلیسیم، بین تیمار شاهد و مابقی تیمارها، در ساقه و برگ، تفاوت معنی‌دار مشاهده شد(جدول ۷). بیشترین مقدار سیلیسیم در ساقه (۲/۱۵ ٪) مربوط به تیمار تغذیه شده با سیلیسیم سنتز شده S_3 است که با تیمارهای C_1 و B از لحاظ آماری تفاوت معنی‌دار ولی با بقیه تیمارها در یک محدوده قرار دارد.تیمار بعدی یعنی بیشترین سطح سیلیس تجاری C_3 معادل ۲/۰۶ درصد، بیشترین درصد سیلیسیم ساقه را بعد از تیمار S_3 به خود اختصاص داد که از لحاظ آماری تنها با تیمار C_1وB تفاوت معنی‌دار دارد. کلیه تیمارها به جز تیمار C_1 با شاهد B تفاوت معنی‌دار دارند. بیشترین مقدار سیلیسیم در برگ مربوط به سیلیسیم سنتز شده (S_3) برابر ۵ درصد و کود تجاری (C_3) ۴/۹۸ درصد است. این دو تیمار با کلیه به جز تیمار S_1 وS_2 تیمارها از لحاظ آماری تفاوت معنی‌دار دارند. کمترین درصد سیلیسیم در برگ هم مربوط به تیمار شاهد B است (معادل ۱/۲۴ درصد). در این تحقیق برگ برنج در مقایسه با ساقه، تجمع سیلیسیم بیشتری داشت. اگر مقدار

سیلیسیم در برگ و ساقه برنج کمتر از ۵ درصد باشد به این معنی است که گیاه برنج سیلیسیم کافی ندارد. حد بهینهٔ سیلیسیم در ساقه برنج ۱۰-۸ درصد است و اگر کمتر از ۵ درصد باشد، گیاه برنج دچار کمبود سیلیسیم است (Davoudi *et al.*, 2014 ; Epstein *et al.*, 1997 ; Mandlink *et al.*, 2020).

در بین اندام‌های برنج، برگ، سیلیسیم بیشتری را تجمع می‌کند (Datnoff *et al.*, 1997; Chen, 1990; Mandlink., *et al.*, 2020). در پژوهشی استفاده از سیلیسیم در کشت برنج، باعث افزایش این عنصر در اندام‌های هوایی به خصوص در برگ و پوسته شلتوک شد (Chen *et al.*, 2010; Mandlink., *et al* 2020). با توجه به مقدار سیلیسیم در ساقه و برگ در سه مرحله از رشد، به نظر می‌رسد با افزایش سن گیاه مقدار سیلیسیم در واحد وزن گیاه (به دلیل رقیق‌سازی ناشی از افزایش زیست تودهٔ گیاه) در این دو اندام، روند کاهشی یافت و این کاهش در برگ بیشتر از ساقه است. به نظر می رسد که در پایان مرحله رویشی و با آغاز رشد زایشی، بخشی از سیلیسیم ساقه و برگ به دانه (پوسته شلتوک) منتقل می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده در این پژوهش، افزودن مقدار ۰/۲۴ گرم سیلیسیم استحصال شده به ۳ کیلوگرم خاک (مصرف ۱۲/ ۰ گرم در دو زمان حدود ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار) بهترین تیمار تلقی می‌شود زیرا باعث بهبود ویژگی‌های برنج مثل ارتفاع گیاه، قطر ساقه، تعداد گره ها و طول میان‌گره ها شد. بعد از آن تیمار کود سیلیسیم‌دار تجاری با مقدار ۵/۵ گرم در لیتر آب آبیاری بیشترین اثر مثبت را داشت. بین تیمار خاکستر پوستهٔ شلتوک و پودر پوستهٔ شلتوک، خاکستر مناسب‌تر بود زیرا همان‌طور که در نتایج مشاهده می‌شود در مورد اغلب صفات مورد مطالعه در این آزمایش، خاکستر در مقایسه با پودر، موثرتر بود.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج این پژوهش، سیلیس استحصال شده از پوستهٔ بیرونی شلتوک، خاکستر پوستهٔ شلتوک و پودر پوستهٔ شلتوک باعث بهبود ویژگی‌های برنج مانند ارتفاع گیاه، قطر ساقه، تعداد گره و طول میان‌گره شد. در مورد اغلب پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق، سیلیس استحصال شده از پوستهٔ بیرونی شلتوک در مقایسه با خاکستر و پودر تولید شده، تأثیر بهتری بر صفات مورد مطالعه در برنج داشت. با توجه به این نتایج، پیش‌بینی می‌شود که از پسماند کارخانجات شالیکوبی می‌توان به عنوان مادهٔ اولیه برای تولید سیلیس استفاده کرد. از کل پوستهٔ بیرونی شلتوک برنج در کشور حدود ۹۰ هزار تن سیلیس قابل استحصال است. با توجه به هزینهٔ بالای تأمین کودهای وارداتی حاوی سیلیس می‌توان گفت تولید این مادهٔ پرکاربرد از پسماند کارخانجات شالیکوبی در مقیاس تجاری به نفع صنعت شالیکوبی‌ها و کشاورزی پایدار مرتبط با کشت برنج است.

سپاس‌گزاری

از شرکت شهرک‌های صنعتی استان گیلان و پارک علم و فناوری گیلان بخاطر حمایت مالی از این پژوهش کاربردی سپاسگزاریم.

References

Agarie, S., Agata, W., Uchida, H., Kubota, F., & Kaufman, P.B. (1996). Function of silica bodies in the epidermal system of rice (*Oryza Sativa* L.): Testing the window hypothesis. *Journal of Experimental Botany*, 47(298), 655-660. https://doi.org/10.1093/jxb/47.5.655

Agarie, S., Uchida, H., Agata, W., Kubota, F., & Kaufamn, B. (1993). Effect of silicon on growth, dry matter production and photosynthesis in rice (*Oryza Sativa* L.). *Crop Production and Improvement Technology*, 34, 225-234. https://cir.nii.ac.jp/crid/1571698599899761792

Angelova, D., Uzunov, I., Uzunova, S., Gigova, A., & Minchev, L. (2011). Kinetics of oil and oil products adsorption by carbonized rice husks. *Chemical Engineering Journal*, 172(1), 306-311. https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.05.114

Cassman, K.G., Peng, S., Olk, D.D., Ladha, J.K, Reichharolt, W., Dobermann, A., & Singh, U. (1998). Opportunities for increased nitrogen use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. *Field Crops Research*, 56, 7-39. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00140-8

Chakraborty, S., Chowdhury, S., & Das Saha, P. (2011). Adsorption of crystal violet from aqueous solution onto NaOH-modified rice husk. *Carbohydrate Polymers*, 86(4), 1533-1541. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.06.058

Chapman, H.D. (1965). Cation exchange capacity. In: Methods of soil analysis. Part II. Black, C.A. (Ed). American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c6

Chen, H., Wang, F., Zhang, C., Shi, Y., Jin, G., & Yuan, S. (2010). Preparation of nano-silica materials: The concept from wheat straw. *Journal of Non Crystalline Solids*, 356(50-51), 2781-2785. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.09.051

Chen, W., Yao, X., Cai, K., & Chen, J. (2011). Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status. *Photosynthesis and Mineral Nutrient Research*, 142, 67-76. https://doi.org/10.1007/s12011-010-8742-x

Chen, Y .(1990). Characteristics of silicon uptake and accumulation in rice. *Journal of Guizhou Agriculture Science*, 6, 37–40.

Datnoff, L.E., Deren, C.W., & Snyder, G.H. (1997). Silicon fertilization for disease management of rice in Florida. *Crop Protection*, 16, 525- 531. https://doi.org/10.1016/S0261-2194(97)00033-1

Dantoff, L.E., Synder, G.H., & Komdorfer, G.H. (2001). Silicon in agriculture. Elsevier, Amsterdam. pp. 285.

Davoudi, M.H., Davaatgar, N., Amiri Larijani, B., Moshiri, F., & Tehrani, M.M. (2014). Guidelines for integrated soil fertility and plant nutrition management of Rice. *Soil and Water Research Institute*, 65 page [in Persian].

Day, P.R. (1955). Particle fraction and particle-size analysis. In: Black, C.A. (Ed), Method of soil analysis. Part I. Agronomy 9, Soil Science Society. America. Madison, WI. pp. 545-567.

Doberman, A. (2000). Rice: Nutrient disorders & nutrient management. International Rice Research Institute, Philippines. 203 page.

Dong, L., Yang, T., Ma, L., Li, R., Feng, Y., & Li, Y. (2024). Silicon fertilizer addition can improve rice yield and lodging traits under reduced nitrogen and increased density conditions. *Agronomy*, 14, 464. https://doi.org/10.3390/agronomy14030464

Ebrahimi Gaskarei, R. (2017). Feasibility and possibility of rice husk availability in rice mill factory in north of Iran. *Research Report*. [In Persian].

Epstein, E. (1991). The anomaly of silicon in plant biology. Proceedings of the National Academy of Sciences of USA, 30, 207.

Fallah, A. (2012). Silicon effect on lodging parameters of rice plants under hydroponic culture . *International Journal of Agri Science* , 2(7), 630-634.

Food and Agriculture Organization. (2011).

Ghorbani, F., Younesi, H., Mehraban, Z., Sabri, C.M., Ghoreyshi, A.A., & Mansoor, A. (2013). Preparation and characterization of highly pure silica from sedge as agricultural waste and its utilization in the synthesis of mesoporous silica. *Journal of Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44 (5), 821-828. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2013.01.019

Hosseini, S.Z., Babayan Jalodar, N., & Khademi, R. (2009). Effect of silica fertilizer on reduction of damage to chilo suppressalis (Walker) in north rice. *National Conference on Water, Soil, Plant and Mechanization of Agriculture.* [In Persian].

Jahanshah, S., & Najafi, N. (2011). The role of silicon in the plant. *Journal of Olive*, 127, 8-17. [In Persian]

Jugal K. Malva ., K. C. Patel., Mohammad Sajid and V. P. Rahmani. (2015). Effect of silicon levels on growth, yield attributes and yield of rice in typic ustochrepts soils. *Ecology, Environment and Conservation*, 21(August Suppl.), AS205-AS208. https://www.researchgate.net/publication/296906109

Kalapathy, U., Proctor, A., & Shultz, J. (1999). A simple method for production of pure silica from rice hull ash. *Bioresource Technology*, 73, 257-262. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00127-3

Kalra, Y.P. (1998). Reference methods for plant analysis. Soil and plant analysis council, Inc, 300 pages. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00127-3

Khader, I., Hashibon, A., Albina, J.M., & Kailer, A. (2011). Wear and corrosion of silicon nitride rolling tools in copper rolling. *Wear*, 271(9–10), 2531-2541. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00127-3

Ma, J.F., & Takahashi, E. (2002). Soil, fertilizer and plant silicon research in Japan. *Elsevier*. 281p.

Ma, J.F., & Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, 2(8), 392-397. 10.1016/j.tplants.2006.06.007

Mandlik, R., Thakral, V., Raturi, G., Shinde, S., Nikolić, M., Tripathi, D.K., Sonah, H., & Deshmuk., H.R. (2020). Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. *Journal of Experimental Botany*, 71(21), 6703-6718. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301

Mc Lean, E.O. (1982). Soil pH and lime requirement. P. 192-224. In, Methods of soil analysis (part II) Chemical and microbiological properties, Page et al. (Ed.). American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc. Publisher. Madison, Wisconsin, USA.

Mengel, K. (2001). Principles of plant nutrition. *International Potash Institute*, 655 pages.

Ministry of Agriculture Jihad. (2015). Agricultural products statistics.

Mobasser, H.R., Ghanbari-Malidareh, A., & Sedghi, A.H. (2008). Effect of silicon application to nitrogen rate and 435plitting on agronomical characteristics of rice (*Oryza sativa* L.). *Silicon in Agriculture*, 26-31 .

Motomura, H., Fujii, T., & Suzuki, M. (2000). Distribution of silicified cells in the leaf blades of pleioblastus chino (Franchet et Savatier) Makino (Bambusoideae). *Annals of Botany*, 85, 751-757. https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1124

Nakata, Y., Ueno, M., Kihara, J., Ichii, M., Taketa, S., & Arase, S. (2008). Rice blast disease and susceptibility to pests in a silicon uptake-deficient mutant. *Crop Protection*, 27, 865-868. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.08.016

Park, J.Y., Gu, Y.M., & Chun, J. (2023). Pilot-scale continuous biogenic silica extraction from rice husk by one-pot alkali hydrothermal treatment and ball milling. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture,* 10, 102. https://doi.org/10.1186/s40538-023-00479-4

Park, J.Y., Gu, Y.M., Park, S.Y., Hwang, E.T., Sang, B.I., Chun, J., & Lee, J.H. (2021). Two-stage continuous process for extraction of silica from rice husk. Using attrition ball milling and alkaline leaching methods. *Sustainability*, 13, 7350. https://doi.org/10.3390/su13137350

Ramezani, Z. (2014). Interaction of nitrogen and silicon on growth and nutrient concentrations in two rice cultivars. Master's Thesis. University of Guilan. [In Persian].

Shahdi, A. (2002). Rice research institute, Research Report. Rasht, Iran. [In Persian].

Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination method for determination of organic matter role and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29–3.

Yan, G., Huang, Q., Zhao, S., Xu, Y., He, Y., Nikolic, M., Nikolic, N., Liang, Y., & Zhu, Z. (2024). Silicon nanoparticles in sustainable agriculture: synthesis, absorption and plant stress alleviation. *Frontiers in Plant Science*,15,1393458. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1393458