



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources



(OPEN ACCESS)

## Comparison of nano-silica produced from rice husk with commercial nano-silica in silicon uptake and rice growth

Fatemeh Nickkhoy Shaldehi<sup>1</sup>, Reza Ebrahimi Gaskarei<sup>\*2</sup>

1. M.Sc. Graduate of Soil Science, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: [m\\_nickkhoo8@yahoo.com](mailto:m_nickkhoo8@yahoo.com)

2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Soil Science, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: [rezaeabrahimi@guilan.ac.ir](mailto:rezaeabrahimi@guilan.ac.ir)

| Article Info                                                                                                                                                                                                                                                                                             | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Article type:</b><br/>Full Length Research Paper</p> <p><b>Article history:</b><br/>Received: 04.24.2024<br/>Revised: 01.04.2025<br/>Accepted: 01.06.2025</p> <p><b>Keywords:</b><br/>Critical limit of soil silica in paddy field,<br/>Environmental stress and silica,<br/>Silica fertilizer</p> | <p><b>Background and Objectives:</b> Silicon is an essential element for rice plants and its maximum uptake occur in vegetative growth stage. It increases resistance to environmental stresses and reduces possibility of rot. To ensure the effectiveness of the use of siliceous fertilizers in paddy fields in north of Iran, more research should be done in order to decide about the necessity of its use. Due to the high price of imported nano-silica fertilizer, on the other hand, the cheap and availability of the outer shell of paddy as the annual waste of rice mills, as well as, the role that silicon plays in rice growth and increase the resistance of rice to living stresses such as pests and diseases and non-living stresses such as cold, heat, drought and salt, investigating the effectiveness of nano-silica produced from rice husk on silicon absorption and vegetative growth of rice compared to imported amorphous nano-silica from USA is one of objectives of this applied research.</p> <p><b>Materials and Methods:</b> In order to compare effectiveness of nano-silica extracted from the outer shell of paddy compared to commercial imported nano-silica from USA on silicon absorption and vegetative growth of rice, a research with paddy soil with 4 treatments (amorphous nano-silica, semi-crystalline nano-silica, imported commercialized nano-silica from USA and rice husk ash, also control sample (without addition of silica) and 4 replications were conducted in greenhouse of agriculture faculty sciences in university of Guilan.</p> <p><b>Results:</b> Results showed that among the vegetative growth characteristics of the rice plant, leaf area and stem height at the time of tillering and at the end of vegetative growth period, significantly in the plant treated with amorphous nano-silica produced from rice husk in compared with imported amorphous nano-silica, it was more. Despite this, number of leaves, dry weight of stem and leaf, wet weight of stem and leaf were traits that did not show significant difference between treatments. In addition, the results of determination of silicon in plants with ICP device showed that the amount of silicon in leaves and stems in plants treated with nanosilica was significantly higher than plants treated with imported commercial nano-silica. Investigations approved that silica produced from rice husk is nano-particles. The relationships in the principal component analysis showed that among the traits related to the vegetative growth of the rice plant, except the height of the stem in the early growth, the rest of</p> |

---

the traits had a positive correlation with the amount of silicon in the leaves and stems. Also, the results of principal component analysis confirmed that there are three distinct groups including plants treated with amorphous nano-silica, the control sample, and plants treated with semi-crystalline nano-silica, rice husk ash, and imported commercial nano-silica, considering the clear overlap between these three treatments.

**Conclusion:** Results indicate the difference in rice plant characteristics between different treatments. Most of these changes are due to the change in the amount of silicon absorbed. All the traits of rice plants studied in this research, regardless of significance, showed the maximum value in rice plants treated with amorphous nano-silica extracted from rice husk. Results confirmed that amorphous nano-silica produced from rice husk can be used as a suitable source of silicon to improve the vegetative growth of different parts of rice plant.

---

Cite this article: Nickkhoy Shaldehi, Fatemeh, Ebrahimi Gaskarei, Reza. 2025. Comparison of nano-silica produced from rice husk with commercial nano-silica in silicon uptake and rice growth. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 15 (3), 51-74.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejsms.2025.22383.2143

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---



## مقایسه نانو سیلیس تولید شده از پوسته شلتوک با نانو سیلیس تجاری در جذب سیلیسیم و رشد برنج

فاطمه نیکخوی شالدهی<sup>1</sup>، رضا ابراهیمی گسگرئی<sup>2\*</sup>

1. دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم خاک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: [m\\_nickkhoo8@yahoo.com](mailto:m_nickkhoo8@yahoo.com)

2. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: [rezaeabrahimi@guilan.ac.ir](mailto:rezaeabrahimi@guilan.ac.ir)

| اطلاعات مقاله                                                                                                                                                                                                                                                                | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>نوع مقاله:</b> مقاله کامل علمی - پژوهشی</p> <p><b>تاریخ دریافت:</b> 1403/02/05</p> <p><b>تاریخ ویرایش:</b> 1403/10/15</p> <p><b>تاریخ پذیرش:</b> 1403/10/17</p> <p><b>واژه‌های کلیدی:</b> تنش‌های محیطی و سیلیس، حد بحرانی سیلیسیم در خاک شالیزار، کود سیلیسیم‌دار</p> | <p><b>سابقه و هدف:</b> سیلیسیم برای گیاه برنج یک عنصر ضروری است و بیش‌تر در مرحله رویشی جذب می‌شود. مقاومت به تنش‌های محیطی را افزایش و احتمال ورس را کاهش می‌دهد. برای اطمینان از ضرورت مصرف کودهای سیلیسیم‌دار در شالیزارهای شمال، پژوهش‌های بیش‌تری باید انجام شود. به دلیل گران بودن نانوکود سیلیسیم‌دار وارداتی و در دسترس بودن پوسته بیرونی شلتوک با حدود 10 درصد سیلیس، هم‌چنین نقشی که سیلیسیم در رشد و نمو برنج و افزایش مقاومت آن به تنش‌های زنده و غیرزنده دارد، بررسی اثر بخشی دو نوع نانو سیلیس تولید شده از پوسته بیرونی شلتوک بر جذب سیلیسیم و رشد رویشی برنج در مقایسه با نانوسیلیس تجاری آمورف وارداتی آمریکایی، از اهداف این پژوهش است.</p> <p><b>مواد و روش‌ها:</b> این پژوهش با چهار تیمار (نانوسیلیس آمورف، نانوسیلیس شبه‌بلوری، نانوسیلیس آمورف تجاری وارداتی آمریکایی، خاکستر پوسته شلتوک و یک نمونه شاهد (بدون سیلیس و بدون نانوسیلیس) و چهار تکرار در خاک شالیزار در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان انجام شد.</p> <p><b>یافته‌ها:</b> از میان ویژگی‌های مربوط به رشد رویشی، سطح برگ و ارتفاع ساقه در زمان پنجه‌زنی و اواخر دوره رشد رویشی، به‌طور معنی‌دار در گیاه تیمار شده با نانوسیلیس آمورف تولید شده از پوسته شلتوک در مقایسه با نانوسیلیس آمورف وارداتی آمریکایی، بیش‌تر بود. با وجود این تعداد برگ، وزن خشک ساقه و برگ، وزن تر ساقه و برگ، صفاتی بودند که تفاوت معنی‌داری را بین تیمارها نشان ندادند. علاوه‌بر این، نتایج حاصل از تعیین سیلیسیم در گیاه با دستگاه ICP، نشان داد که مقدار سیلیسیم در برگ و ساقه در گیاهان تیمار شده با نانوسیلیس آمورف تولید شده از پوسته شلتوک به‌طور معنی‌دار از گیاهان تیمار شده با نانوسیلیس تجاری وارداتی</p> |

آمریکایی بیش تر بود. بررسی انجام شده، نانو بودن سیلیس تولید شده از پوسته بیرونی شلتوک را هم تأیید کرد. روابط موجود در آنالیز مؤلفه اصلی نشان داد که از بین صفات مربوط به رشد رویشی برنج، به جز ارتفاع ساقه در اوایل رشد، بقیه صفات با مقدار سیلیسیم برگ و ساقه همبستگی مثبت داشت. هم چنین نتایج آنالیز مؤلفه اصلی تأیید کرد که سه گروه کاملاً متمایز از هم شامل گیاهان تیمار شده با نانوسیلیس بی شکل، گیاهان بدون تیمار با سیلیس (شاهد) و نیز گیاهان تیمار شده با نانوسیلیس شبه بلوری، خاکستر پوسته برنج و نانو سیلیس تجاری آمریکایی با در نظر گرفتن همپوشانی واضح بین این سه تیمار، وجود دارد.

**نتیجه گیری:** نتایج دلالت بر تفاوت ویژگی های گیاه برنج بین تیمارها دارد که عمدتاً ناشی از مقدار متفاوت سیلیسیم جذب شده در گیاهان است. تمام صفات مورد مطالعه در گیاه برنج تیمار شده با نانوسیلیس آمورف تولید شده از پوسته شلتوک، حداکثر مقدار را نشان داد. نتایج تأیید می کند که می توان از نانوسیلیس تولید شده از پوسته شلتوک برنج به عنوان یک منبع مناسب سیلیسیم دار، برای بهبود رشد رویشی قسمت های مختلف گیاه برنج استفاده کرد و در صورت تولید در مقیاس تجاری، این کود، می تواند نیاز شالیزارهای داخل کشور را برطرف کند.

**استناد:** نیکخوی شالدهی، فاطمه، ابراهیمی گسگرئی، رضا (۱۴۰۴). مقایسه نانو سیلیس تولید شده از پوسته شلتوک با نانو سیلیس تجاری در جذب سیلیسیم و رشد برنج. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۵ (۳)، ۷۴-۵۱.

DOI: 10.22069/ejsms.2025.22383.2143



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

## مقدمه

در ایران حدود 750000 هکتار شالیزار داریم. گیاه برنج سیلیسیم را بیش تر از تمام عناصر ضروری از خاک جذب می کند. این عنصر برای اکثر گیاهان یک عنصر مفید ولی برای برنج یک عنصر ضروری است (1). به رغم کافی بودن سیلیس محلول خاک در اغلب خاک های معدنی، کمبود سیلیس می تواند در نتیجه تخلیه این عنصر در اثر کشت طولانی مدت و برداشت زیاد سیلیس از خاک توسط برنج، رخ دهد. حد بحرانی سیلیسیم برای برنج، 40 میلی گرم در کیلوگرم خاک با عصاره گیر استات سدیم مولار در  $\text{pH}=4$  است (2). در صورت کشت مداوم برنج، سرعت خروج سیلیس از محلول خاک سریع تر از جایگزینی آن رخ می دهد (2). برنج سیلیس را به فرم منوسیلیسیک اسید ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) با پدیده انتشار از خاک جذب می کند. شالیزاری که 6 تن در هکتار دانه تولید می کند 230-470 کیلوگرم سیلیسیم از خاک جذب می کند (3). خروج سیلیسیم از خاک، بین 50 تا 110 کیلوگرم به ازای هر تن عملکرد دانه برنج، برآورد می شود. با فرض متوسط خروج 80 کیلوگرم سیلیسیم به ازای هر تن عملکرد دانه، مزرعه برنج با عملکرد 6 تن در هکتار، حدود 480 کیلوگرم سیلیسیم در هکتار جذب و از خاک خارج می کند. خاک هایی که در معرض کمبود سیلیسیم هستند شامل: خاک شالیزارهای قدیمی در مناطق معتدله، خاک های آلی با مقادیر کم سیلیسیم معدنی و خاک های هوا دیده و آبشویی شده حاره ای. آزمایش خاک و تجزیه گیاه برای ارزیابی وضعیت سیلیسیم در شالیزارها باید مرتب انجام شود. کمبود سیلیسیم موجب کاهش فتوسنتز و در نتیجه کاهش عملکرد دانه در برنج می شود. هم چنین، تعداد خوشه در هر مترمربع و تعداد سنبله های پر در خوشه برنج کاهش و احتمال ورس (خوابیدن) افزایش می یابد. خروج کاه و کلش برنج و برنگشتن پوسته

شلتوک به شالیزار طی سالیان متوالی، منجر به تخلیه تدریجی سیلیسیم قابل جذب از خاک می شود. اگر کاه و کلش برنج به طور کامل از شالیزار خارج شود توازن سیلیسیم منفی شده (150 تا 350 کیلوگرم سیلیسیم در هکتار) و کمبود سیلیسیم رخ می دهد. سیلیس به فرم سیلیکا ژل ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) در دیواره و فضای بین سلولی یاخته های ریشه، برگ و برگواره ها و نیز به شکل منوسیلیسیک اسید و ترکیبات اورگانوسیلیس در بافت های گیاه ذخیره می شود.

ذخیره سیلیس مازاد، در دیواره یاخته های رو پوستی هنگامی که غلظت منوسیلیک اسید بیش از 2 مول در مترمکعب باشد، به سیلیکا ژل پلیمریزه و در یاخته های رو پوستی انباشته می شود. برگ های مسن تر نسبت به برگ های جوان تر، سیلیس بیش تری ذخیره می کنند. سیلیسی که توسط برنج انباشته می شود در برگ ها، 7/1٪، پوسته شلتوک، 13٪، ریشه ها، 10٪ و ساقه ها، 6٪ است (3). حد مطلوب سیلیسیم در برگ و ساقه برنج، 8-10 درصد است (2) و اگر کم تر باشد، گیاه برنج دچار کاهش عملکرد می شود. نوع جذب این عنصر توسط ریشه گیاه برنج از نوع جذب فعال است. برای بهبود رشد برنج، کود سیلیسیم دار را می توان همراه با کودهای پایه قبل از نشاکاری، مصرف کرد. یک گروه از پژوهشگران کود سیلیسیم دار را در سطوح 0، 100، 200، 300 و 400 کیلوگرم در هکتار، در شالیزار مصرف کردند (4). گروهی دیگر، کود سیلیسیم دار را در سطوح 0، 100، 150، 200 و 300 کیلوگرم در هکتار در شالیزار مصرف کردند و مقدار جذب آن، هنگامی که کود سیلیسیم دار، 300 یا 400 کیلوگرم در هکتار مصرف شده بود، ماکزیم بود (4). در واقع با افزایش کود سیلیسیم دار مصرفی، مقدار سیلیسیم جذب شده، در اندام های مختلف گیاه افزایش یافت. این دو مطالعه هم چنین نشان داد که با افزایش کود سیلیسیم دار

مقیاس نانو ذره نیز به رشد رویشی برنج کمک می‌کند (2). در بستر رشد حاوی 50 میکرومولار آرسنیک در اثر آزادشدن  $H_2O_2$  و استرس اکسیداتیو، مقدار کلروفیل زیست‌توده و رشد گیاه برنج کاهش یافت. افزودن نانو ذرات سیلیس توانست از سیستم فتوسنتزی در برابر فلزات سمی، با کاهش سطوح رادیکال آزاد و تنظیم فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، محافظت کند (5). نانو ذرات سیلیس با ارتقای جذب مواد مغذی، زیست‌توده برنج را در طول تنش ناشی از آرسنیک با افزایش محتوای کلروفیل و عملکرد سیستم فتوسنتزی، بهبود بخشید. در شرایط استرس اکسیداتیو و بسته شدن روزنه‌ها، نانو ذرات سیلیس، مقدار کلروفیل، ارتفاع و وزن خشک را در گیاهچه‌های برنج افزایش داد. نانوذرات سیلیس فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را افزایش و باعث کاهش جذب کادمیوم و افزایش رشد برنج تحت استرس کادمیوم شد (6). در چند سال گذشته، مطالعات پراکنده و محدود برای تایید ضرورت مصرف کودهای سیلیکاته در شالیزارهای شمال کشورمان انجام شده است. با سنجش سیلیسیم قابل‌جذب در خاک شالیزار در روستای گیلانده در شهر چابکسر در شرق گیلان، میزان فراهمی سیلیسیم قابل‌جذب 9/5 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک گزارش شده است (6). طبق پژوهش مشترکی که توسط بسیج کشاورزی، گروه خاکشناسی دانشگاه گیلان، مؤسسه تحقیقات برنج و استانداری گیلان انجام شد، از مجموع 400 نمونه خاک شالیزار در 40 نمونه از غرب گیلان، 19 نمونه سیلیسیم کم‌تر از حد بحرانی داشت (گزارش پژوهشی منتشر نشده). به دلیل گران بودن کود سیلیسیم‌دار وارداتی، ارزان و در دسترس بودن پوسته بیرونی شلتوک به عنوان پسماند سالانه کارخانجات شالیکوبی هم‌چنین نقشی که سیلیسیم در رشد و نمو و افزایش مقاومت برنج به تنش‌های زنده و غیرزنده دارد، اثر بخشی نانو سیلیس آمورف و شبه کریستالی

مصرفی، ضمن بهبود عملکرد و سطح برگ، مقدار سیلیس در برگ، پوسته، کاه و کلش افزایش می‌یابد (4). مصرف کود سیلیکاته در شالیزار، باعث افزایش 5 تا 20 درصد ماده خشک و عملکرد شلتوک می‌شود. سیلیسیم، باعث عمود قرار گرفتن برگ‌ها و نفوذ بیش‌تر نور در داخل پوشش گیاهی برنج شده و در اثر فتوسنتز بیش‌تر، عملکرد بهبود می‌یابد. با مصرف سیلیس تحمل به ورس، 15 درصد افزایش و بیماری بلاست و شیوع کرم ساقه‌خوار کاهش می‌یابد (4). بنابراین مصرف کودهای سیلیکاته در زراعت برنج، مفید است و مقدار قابل توصیه آن با توجه به نوع رقم، خاک و اقلیم بین 100-250 کیلوگرم در هکتار متغیر است. نصف کود سیلیسیم‌دار باید با کودهای پایه و بقیه به صورت سرک، 30 تا 45 روز بعد از نشاکاری مصرف شود (3). افزایش شیوع بیماری‌های بلاست و لکه قهوه‌ای در برنج، نشانه کمبود سیلیسیم است. افزودن سیلیس به خاک شالیزارها موجب افزایش مقاومت برنج به بیماری بلاست می‌شود. ارقامی از برنج که سیلیس بیش‌تری در اندام هوایی ذخیره می‌کنند، کم‌تر دچار بیماری بلاست برگ و بلاست گردن خوشه می‌شوند. افزودن سیلیکات سدیم به خاک تهی شده از سیلیس که در آن برای طولانی‌مدت برنج کشت شده بود، توانست به مقدار 40٪ از بلاست گردن خوشه بکاهد. در نتیجه با افزودن سیلیس به شالیزار، می‌توان بیماری بلاست را در حد قابل‌توجه کاهش داد و این می‌تواند در کاهش بیماری در فصل کشت بعدی نیز، مؤثر باشد. مقدار سیلیسیم در کاه و کلش برنج، از 2 تا 10 درصد نوسان می‌کند (2). جذب بیش‌تر سیلیس سبب اثرات مطلوب بر رشد برنج و افزایش مقاومت آن به تنش‌های محیطی از جمله تنش شوری، تنش خشکی، تنش دمایی، سمیت فلزی، تحمل به بیماری‌های گیاهی و حمله آفات می‌شود. استفاده از سیلیس در

تولید شده از پوسته شلتوک در مقایسه با نانو سیلیس آمورف وارداتی آمریکایی، بر جذب سیلیسیم و رشد رویشی برنج، به عنوان هدف پژوهش، بررسی شد.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش یک نمونه خاک مرکب از یک شالیزار قدیمی در دهستان جیرده در شهرستان شفت در غرب استان گیلان با محدوده جغرافیایی  $37^{\circ} 10' 23''$  تا  $37^{\circ} 10' 25''$  عرض شمالی و  $49^{\circ} 29' 02''$  تا  $49^{\circ} 29' 03''$  از عمق 0-25 سانتی متری برداشته شد و با سه تکرار، مقدار سیلیس قابل جذب آن با عصاره گیر استات سدیم یک مولار ( $\text{pH}=4$ ) تعیین شد. نانو کود سیلیسیم دار تولیدی نیز به مجتمع آزمایشگاهی پارس (آزمایشگاه مرجع وزارت جهاد کشاورزی) در کرج ارسال و مقدار سیلیسیم آن، تعیین شد (8). برخی ویژگی‌های مهم این خاک شامل کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم و فسفر، در مؤسسه تحقیقات برنج کشور تعیین شد. کربن آلی با روش والکلی - بلک، پتاسیم قابل جذب با روش استات آمونیوم نرمال (10)، فسفر قابل جذب با روش اولسن، ازت کل با روش کج‌لدال (9)، اسیدیته خاک به روش پتانسیومتری در نسبت 1:2/5 خاک به محلول 0/01 مولار کلرید کلسیم ( $\text{CaCl}_2$ ) و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره گل اشباع با هدایت سنج و بافت خاک به روش هیدرومتری، تعیین شد (10). پتانسیل اکسید و احیا با استفاده از زوج الکترو پلاتین و مرجع (نقره اشباع) دستگاه Eh متر مدل 86505، مستقیماً در داخل خاک تیمارهای اشباع از آب، در عمق 5 سانتی متری، اندازه گیری شد. برای قرائت هر نمونه الکترو پلاتین را داخل سوسپانسیون قرار داده و پس از گذشت حدود 10 دقیقه قرائت شد. جهت استاندارد کردن دستگاه از سوسپانسیون کوئین هیدروژن استفاده شد (11). پس از اطمینان از ناکافی

بودن سیلیس در خاک این شالیزار و همین‌طور اطمینان از نانو ذره بودن سیلیس تولید شده، آزمایش با 1 شاهد، 4 تیمار و 4 تکرار، در 20 سطل پلاستیکی در دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان انجام شد. تیمارهای آزمایش به شرح زیر بود:

- 1- خاک شالیزار + توصیه کودی + بدون افزودن سیلیس و نانوسیلیس (شاهد یا کنترل)
- 2- خاک شالیزار + توصیه کودی + نانوسیلیس آمورف تولید شده در این پژوهش (تیمار 1)
- 3- خاک شالیزار + توصیه کودی + نانوسیلیس شبه بلوری تولید شده در این پژوهش (تیمار 2)
- 4- خاک شالیزار + توصیه کودی + نانو سیلیس آمورف تجاری آمریکایی (تیمار 3)
- 5- خاک شالیزار + توصیه کودی + خاکستر پوسته بیرونی شلتوک برنج (تیمار 4)

سطل‌ها پس از آماده‌سازی به گلخانه منتقل و خاک داخل هر سطل بعد از یک هفته ماندن در وضعیت غرقاب، کامل هم زده شد. درواقع شرایط مشابه شخم زدن شالیزار اجرا و بعد نشای برنج، کشت و توصیه کودی و تیمارهای سیلیسیم، اعمال شد.

با توجه به نتایج آزمایش خاک (جدول 1) کود کلرور پتاسیم و کود اوره هر کدام 200 و کود سوپر فسفات تریپل، 50 کیلوگرم در هکتار مصرف شد. نیازی به مصرف کود روی (زینک) نبود. سپس گلدان‌ها زیر تابش مستقیم خورشید با شدت نور کافی رشد کردند. ارتفاع گیاه در سه زمان و پهنای برگ، وزن تر برگ، وزن تر ساقه، وزن خشک برگ، وزن خشک ساقه در پایان رشد رویشی، اندازه‌گیری سپس اندام‌ها جداگانه خشک و تبدیل به پودر و مقدار سیلیسیم آن‌ها، با طیف سنج نشری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) در دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی گیلان تعیین شد (11). نرمال بودن توزیع

داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف بررسی و بعد از اطمینان، تحلیل داده‌ها با روش آنالیز واریانس و در صورت معنی‌دار بودن و تفاوت بین واریانس تیمارها، مقایسه میانگین با آزمون توکی، آنالیزهای آماری با نرم‌افزار SPSS و نمودارها با نرم‌افزار Excel رسم شد.

### نتایج و بحث

**ویژگی‌های خاک:** طبق نتایج حاصله (جدول 1) بافت خاک شالیزار، رسی و مقدار سیلیسیم آن 10 میلی‌گرم بر کیلوگرم است که بسیار کم‌تر از حد بحرانی سیلیسیم در خاک شالیزار (40 میلی‌گرم بر کیلوگرم) است (12) بنابراین می‌توان گفت که مقدار سیلیس در خاک این شالیزار ناکافی است. دلیل آن تخلیه سالانه سیلیس از خاک در بلندمدت و عدم جایگزینی آن

است (ضمیمه جدول 1). یکی از ویژگی‌های شیمیایی مهم خاک‌های غرقاب، پتانسیل اکسید و احیا است. این عامل بر تغییرات الکتروشیمیایی ناشی از غرقاب شدن خاک از جمله حلالیت و قابلیت دسترسی عناصر غذایی، انحلال و رسوب کانی‌ها در خاک شالیزار مؤثر است (13). در خاک شالیزار مورد مطالعه، پتانسیل اکسید و احیاء، 64- میلی‌ولت به‌دست آمد یعنی این خاک دارای شرایط احیایی شدید است بنابراین در این خاک، احیای عناصری مانند آهن و منگنز سریع رخ می‌دهد. علائمی از مسمومیت آهن و منگنز به‌دلیل قابلیت دسترسی فراوان این دو عنصر، در هفته‌های اول رشد در برگ‌های پایینی گیاه برنج در شرایط غرقاب مشاهده شد (شکل 1).

جدول 1- ویژگی‌های خاک شالیزار از روستای جیره در شهرستان شفت در غرب استان گیلان.

Table 1. Paddy soil properties in Jiredeh village, Shaft, East of Guilan.

| Zn<br>(mg/kg) | Si<br>(mg/kg) | K<br>(mg/kg) | P<br>(mg/kg) | TN<br>(%) | OC<br>(%) | Eh<br>(mV) | pH<br>1:2.5 | EC<br>(ds/m) | Clay<br>% | Silt<br>% | Sand<br>% |
|---------------|---------------|--------------|--------------|-----------|-----------|------------|-------------|--------------|-----------|-----------|-----------|
| 2             | 10            | 120          | 16.3         | 0.21      | 2.44      | -64.17     | 7.02        | 0.9          | 42        | 36        | 22        |

ضمیمه جدول 1- مقدار سیلیسیم در خاک بعضی از شالیزارها در غرب استان گیلان.\*

Table 1.1. Silicon content in some paddy soils in East of Guilan.

| Sample<br>No. | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Si<br>(mg/kg) | 23 | 37 | 11 | 39 | 28 | 26 | 37 | 36 | 34 | 25 | 21 | 33 | 36 | 32 | 25 | 24 | 26 | 18 | 24 |

\* بخشی از نتایج آزمایش خاک شالیزارهای غرب گیلان در پژوهش منتشر نشده با سیلیس کم‌تر از 40 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک



شکل 1- علائم مسمومیت آهن و منگنز در برگ‌های پایینی گیاه برنج در اوایل دوره غرقاب.

Figure 1. Iron and manganese toxicity symptoms in rice lower leaves in early period of flooding.

(کنترل)، حداقل است. پهنای برگ برای تیمار 1، 1/66، 1/41، 1/38 و 1/37 برابر مقدار این ویژگی به ترتیب در شاهد و تیمارهای 4، 3 و 2 است. در واقع نانو سیلیس آمورف تولید شده از پوسته بیرونی شلتوک، باعث افزایش بیش‌تری در سطح برگ در مقایسه با نانو سیلیس آمورف وارداتی از آمریکا و بقیه تیمارها شد. سیلیسیم سطح برگ را افزایش و این خود باعث بهبود فتوسنتز می‌شود (15 و 16). نانوسیلیس اثر بهتری را نسبت به کودهای سیلیسیم‌دار در بهبود سطح برگ ایفای کند (18).

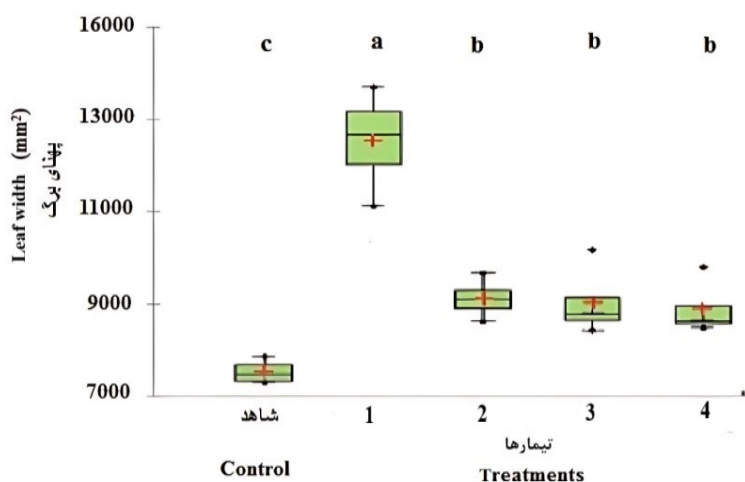
دلیل وجود شرایط احیاء در شالیزار، غرقاب بودن خاک و رابطه معکوس آن با کربن آلی است. در محیط غرقاب در صورت وجود کربن آلی زیاد، فعالیت میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی افزایش و امکان احیاء عناصر غذایی از جمله آهن و منگنز، فراهم می‌شود (14). کربن آلی خاک شالیزارها به دلیل کندبودن اکسایش بقایای گیاهی در شرایط غرقاب، معمولاً زیاد است (2 و 14).

**سطح برگ:** به استناد میانگین سطح برگ (جدول 2) تفاوت بین تیمارها معنی دار (شکل 2) و این ویژگی در تیمار 1 (نانوسیلیس آمورف) حداکثر و در شاهد

جدول 2- آماره توصیفی سطح برگ ( $\text{mm}^2$ ) در تیمارهای مختلف و شاهد.

Table 2. Descriptive statistics of leaf width ( $\text{mm}^2$ ) in different treatments.

| متغیر (Variable)      | حداقل (Minimum) | حداکثر (Maximum) | میانگین (Average) | ضریب تغییرات (Variation coefficient) |
|-----------------------|-----------------|------------------|-------------------|--------------------------------------|
| شاهد (Control)        | 7308.61         | 7875.01          | 7529.84           | 0.03                                 |
| تیمار 1 (Treatment 1) | 11124.53        | 13699.04         | 12540.18          | 0.08                                 |
| تیمار 2 (Treatment 2) | 8632.77         | 9654.60          | 9119.56           | 0.04                                 |
| تیمار 3 (Treatment 3) | 8432.36         | 10180.51         | 9032.13           | 0.08                                 |
| تیمار 4 (Treatment 4) | 8474.78         | 9811.94          | 8888.19           | 0.06                                 |



شکل 2- مقایسه سطح برگ اندازه‌گیری شده در تیمارها و شاهد.

Figure 2. Comparison of leaf surface measured in treatments and control.

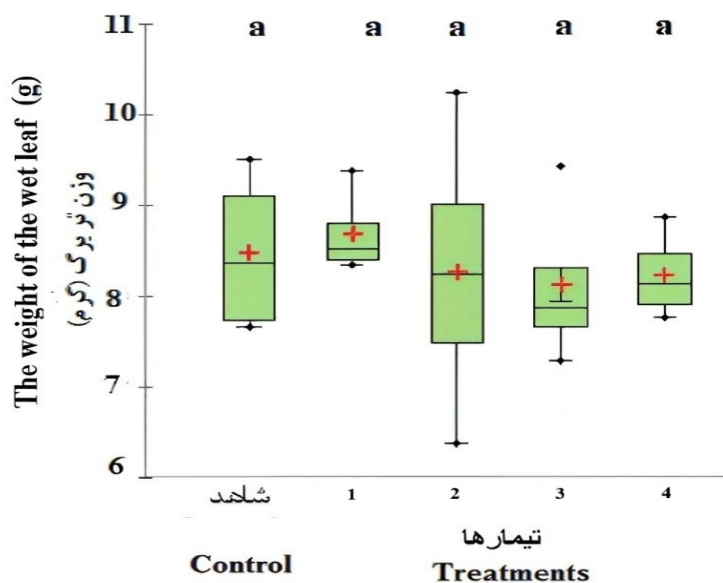
وزن تر برگ و ساقه: آماره‌های توصیفی مقادیر وزن تر برگ و ساقه (جدول‌های 3 و 4) بین تیمارها تفاوت معنی‌دار نداشت (شکل‌های 3 و 4) اگرچه وزن تر برگ برای تیمار 1 (نانوسیلیس آمورف تولید شده از پوسته بیرونی شلتوک) حداکثر بود. وزن تر

ساقه در تیمار 1، بیش‌ترین و در شاهد، کم‌ترین مقدار بود. گزارش‌ها بیانگر تأثیر بهتر نانوسیلیس بر وزن تر اندام‌های برنج در مقایسه با کود سیلیسیم‌دار است (18).

جدول 3- آماره توصیفی وزن تر برگ (گرم) در تیمارهای مختلف و شاهد.

Table 3. Descriptive statistics of leaf fresh weight in different treatments and control.

| متغیر (Variable)      | حداقل (Minimum) | حداکثر (Maximum) | میانگین (Average) | ضریب تغییرات (Variation coefficient) |
|-----------------------|-----------------|------------------|-------------------|--------------------------------------|
| شاهد (Control)        | 7.65            | 9.51             | 8.47              | 0.10                                 |
| تیمار 1 (Treatment 1) | 8.34            | 9.38             | 8.69              | 0.05                                 |
| تیمار 2 (Treatment 2) | 6.37            | 10.24            | 8.27              | 0.19                                 |
| تیمار 3 (Treatment 3) | 7.30            | 9.44             | 8.12              | 0.11                                 |
| تیمار 4 (Treatment 4) | 7.77            | 8.88             | 8.23              | 0.05                                 |



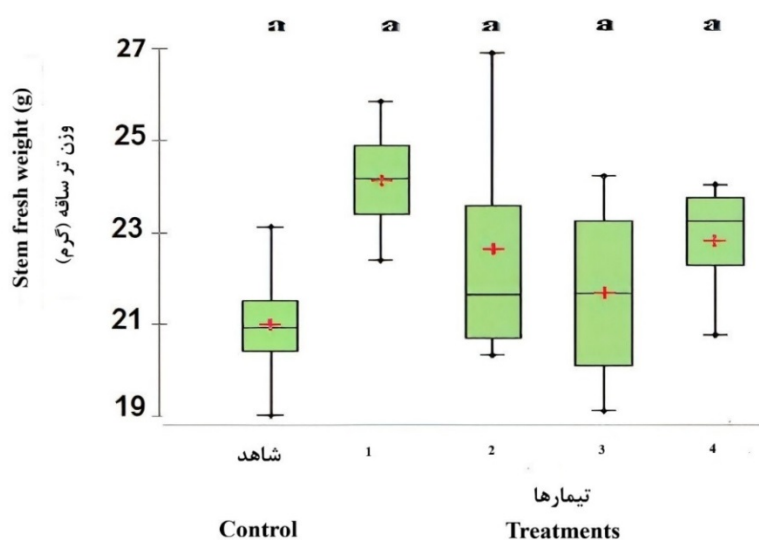
شکل 3- مقایسه وزن تر برگ در تیمارهای مختلف و شاهد.

Figure 3. Leaf fresh weight in different treatments and control.

جدول 4- آماره توصیفی وزن تر ساقه در تیمارهای مختلف و شاهد.

Table 4. Descriptive statistics of stem fresh weight in treatments and control.

| متغیر<br>(Variable)      | حداقل<br>(Minimum) | حداکثر<br>(Maximum) | میانگین<br>(Average) | ضریب تغییرات<br>(Variation coefficient) |
|--------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------------------|
| شاهد<br>(Control)        | 19.01              | 23.10               | 20.99                | 0.07                                    |
| تیمار 1<br>(Treatment 1) | 22.39              | 25.84               | 24.13                | 0.06                                    |
| تیمار 2<br>(Treatment 2) | 20.33              | 26.89               | 22.63                | 0.13                                    |
| تیمار 3<br>(Treatment 3) | 19.11              | 24.22               | 21.67                | 0.11                                    |
| تیمار 4<br>(Treatment 4) | 20.78              | 24.05               | 22.82                | 0.06                                    |



شکل 4- مقایسه وزن تر ساقه در تیمارها و شاهد.

Figure 4. Stem fresh weight in treatments and control.

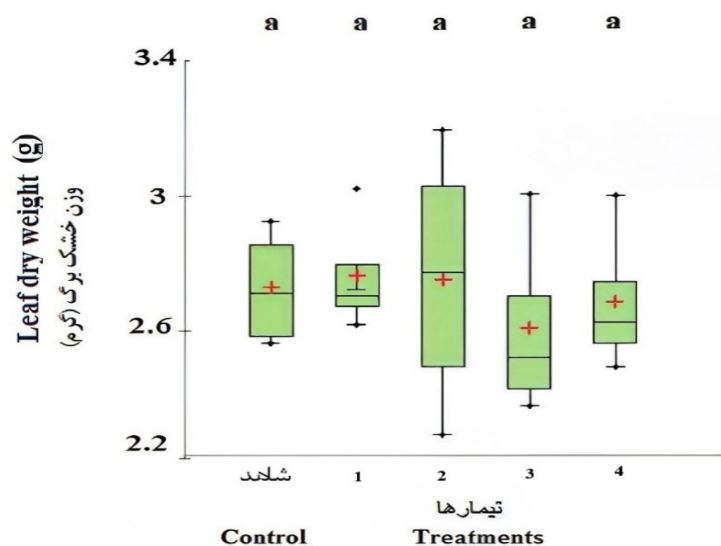
میانگین وزن خشک در برگ و ساقه در تیمار 1، بیشترین بود. مصرف سیلیسیم در شالیزار باعث افزایش وزن خشک ساقه برنج می‌شود (16) به‌ویژه اگر نانو سیلیس مصرف شود (17).

وزن خشک برگ و ساقه: به استناد آماره‌های توصیفی مربوط به وزن خشک برگ (جدول 5) و وزن خشک ساقه (جدول 6) تفاوت معنی‌دار بین تیمارها مشاهده نشد (شکل‌های 5 و 6) با وجود این

جدول 5- آماره توصیفی وزن خشک برگ در تیمارها و شاهد.

Table 5. Descriptive statistics of leaf dry weight in treatments and control.

| متغیر<br>(Variable)      | حداقل<br>(Minimum) | حداکثر<br>(Maximum) | میانگین<br>(Average) | ضریب تغییرات<br>(Variation coefficient) |
|--------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------------------|
| شاهد<br>(Control)        | 2.56               | 2.92                | 2.72                 | 0.06                                    |
| تیمار 1<br>(Treatment 1) | 2.62               | 3.02                | 2.76                 | 0.06                                    |
| تیمار 2<br>(Treatment 2) | 2.26               | 3.19                | 2.75                 | 0.15                                    |
| تیمار 3<br>(Treatment 3) | 2.38               | 3.01                | 2.60                 | 0.11                                    |
| تیمار 4<br>(Treatment 4) | 2.49               | 3.01                | 2.68                 | 0.08                                    |



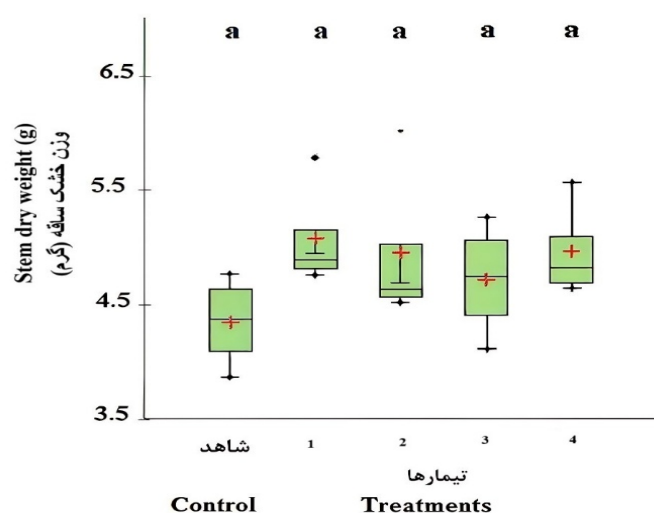
شکل 5- مقایسه وزن خشک برگ در تیمارهای مختلف و شاهد.

Figure 5. Comparison of leaf dry weight between treatments and control.

جدول 6- آماره توصیفی وزن خشک ساقه در تیمارهای مختلف و شاهد.

Table 6. Descriptive statistics of stem dry weight in different treatments and control.

| متغیر<br>(Variable)   | حداقل<br>(Minimum) | حداکثر<br>(Maximum) | میانگین<br>(Average) | ضریب تغییرات<br>(Variation coefficient) |
|-----------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------------------|
| شاهد (Control)        | 3.87               | 4.76                | 4.35                 | 0.09                                    |
| تیمار 1 (Treatment 1) | 4.76               | 5.78                | 5.08                 | 0.09                                    |
| تیمار 2 (Treatment 2) | 4.52               | 6.03                | 4.95                 | 0.14                                    |
| تیمار 3 (Treatment 3) | 4.12               | 5.26                | 4.72                 | 0.11                                    |
| تیمار 4 (Treatment 4) | 4.65               | 5.56                | 4.96                 | 0.08                                    |



شکل 6- مقایسه وزن خشک ساقه بین تیمارها و شاهد.

Figure 6. Comparison of stem dry weight in treatments and control.

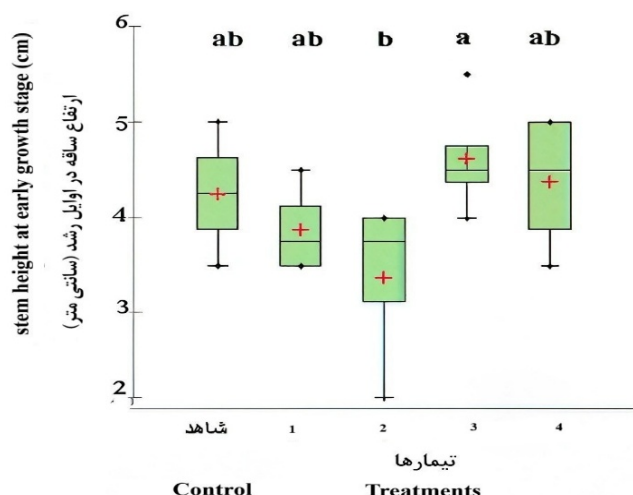
بهبود ارتفاع گیاه برنج می‌شود و با افزایش سیلیسیم در گیاه، علاوه بر ارتفاع ساقه، استحکام ساقه نیز افزایش می‌یابد به طوری که افزایش محتوای سیلیس در ساقه برنج منجر به افزایش مقاومت به ورس (خوابیدن) می‌شود (18). در اوایل رشد نانو سیلیس آمریکایی (تیمار 3) بر ارتفاع گیاه بیش‌تر اثرگذار بود ولی با گذشت زمان، تیمار 1 اثر بهتری داشت. به استناد نتایج پژوهش‌های پژوهش‌گران دیگر، نانو سیلیس در مقایسه با سیلیس، اثر مثبت‌تری بر ارتفاع ساقه، ایفا می‌کند (19).

ارتفاع ساقه: ارتفاع ساقه در اوایل، اواسط و اواخر رشد رویشی تعیین شد. مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین و ضریب تغییرات ارتفاع ساقه (جدول‌های 7، 8 و 9) به طور معنی‌داری بین تیمارها در سه زمان، متفاوت است (شکل‌های 7، 8 و 9). به طور میانگین، ارتفاع ساقه در اوایل رشد گیاه برای تیمار 3 (نانو سیلیس آمورف آمریکایی) بیش‌ترین ولی در اواسط و اواخر رشد برای نانو سیلیس آمورف تولید شده از پوسته شلتوک، حداکثر بود. نمونه شاهد نیز کم‌ترین مقدار را در اواسط دوره رشد نشان داد. در مطالعه‌ای گزارش شده است که سیلیسیم باعث

جدول 7- آماره توصیفی ارتفاع ساقه در تیمارها و شاهد در اوایل رشد رویشی.

Table 7. Descriptive statistics of stem height in different treatments in early growth.

| متغیر<br>(Variable)      | حداقل<br>(Minimum) | حداکثر<br>(Maximum) | میانگین<br>(Average) | ضریب تغییرات<br>(Variation coefficient) |
|--------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------------------|
| شاهد<br>(Control)        | 3.50               | 5.00                | 4.25                 | 0.15                                    |
| تیمار 1<br>(Treatment 1) | 3.50               | 4.50                | 3.87                 | 0.12                                    |
| تیمار 2<br>(Treatment 2) | 2.00               | 4.00                | 3.37                 | 0.28                                    |
| تیمار 3<br>(Treatment 3) | 4.00               | 5.50                | 4.62                 | 0.13                                    |
| تیمار 4<br>(Treatment 4) | 3.50               | 5.00                | 4.37                 | 0.17                                    |



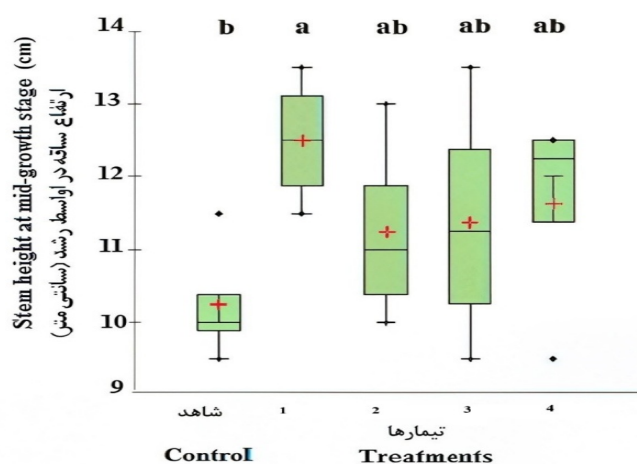
شکل 7- مقایسه ارتفاع ساقه بین تیمارها و شاهد در اوایل رشد رویشی.

Figure 7. Comparison of stem height in treatments in early growth stage.

جدول 8- آماره توصیفی ارتفاع ساقه در تیمارهای مختلف و شاهد در اواسط دوره رشد.

Table 8. Descriptive statistics of stem height in different treatments in middle of growth.

| متغیر (Variable)      | حداقل (Minimum) | حداکثر (Maximum) | میانگین (Average) | ضریب تغییرات (Variation coefficient) |
|-----------------------|-----------------|------------------|-------------------|--------------------------------------|
| شاهد (Control)        | 9.50            | 11.50            | 10.25             | 0.08                                 |
| تیمار 1 (Treatment 1) | 11.50           | 13.50            | 12.50             | 0.07                                 |
| تیمار 2 (Treatment 2) | 10.00           | 13.00            | 11.25             | 0.11                                 |
| تیمار 3 (Treatment 3) | 9.50            | 13.50            | 11.37             | 0.15                                 |
| تیمار 4 (Treatment 4) | 9.50            | 12.50            | 11.62             | 0.2                                  |



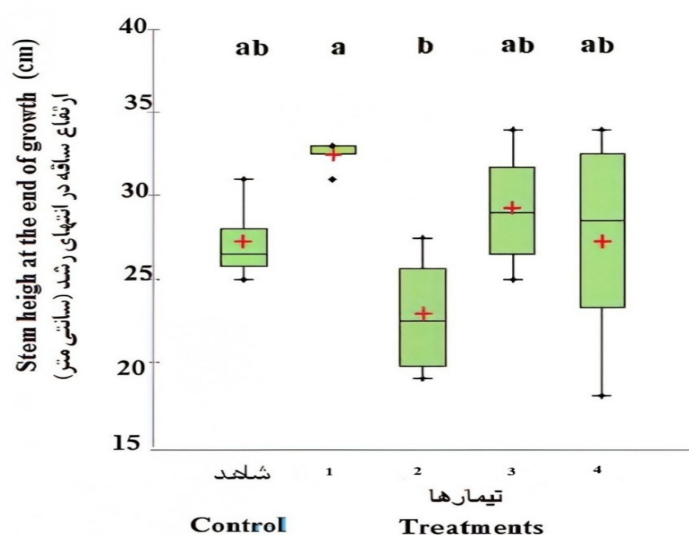
شکل 8- مقایسه ارتفاع ساقه بین تیمارهای مختلف و شاهد در اواسط رشد رویشی.

Figure 8. Comparison of stem height in treatments and control in middle growth stage.

جدول 9- آماره توصیفی ارتفاع ساقه در تیمارها و شاهد در انتهای رشد رویشی.

Table 9. Descriptive statistics of stem height in treatments and control end of vegetative growth.

| متغیر<br>(Variable)      | حداقل<br>(Minimum) | حداکثر<br>(Maximum) | میانگین<br>(Average) | ضریب تغییرات<br>(Variation Coefficient) |
|--------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------------------|
| شاهد<br>(Control)        | 25.00              | 31.00               | 27.25                | 0.09                                    |
| تیمار 1<br>(Treatment 1) | 31.00              | 33.00               | 32.50                | 0.03                                    |
| تیمار 2<br>(Treatment 2) | 19.00              | 27.50               | 22.87                | 0.17                                    |
| تیمار 3<br>(Treatment 3) | 25.00              | 34.00               | 29.25                | 0.13                                    |
| تیمار 4<br>(Treatment 4) | 18.00              | 34.00               | 27.25                | 0.26                                    |



شکل 9- مقایسه ارتفاع ساقه در تیمارها و شاهد در انتهای رشد رویشی.

Figure 9. Comparison of stem height in treatments and control end of vegetative growth.

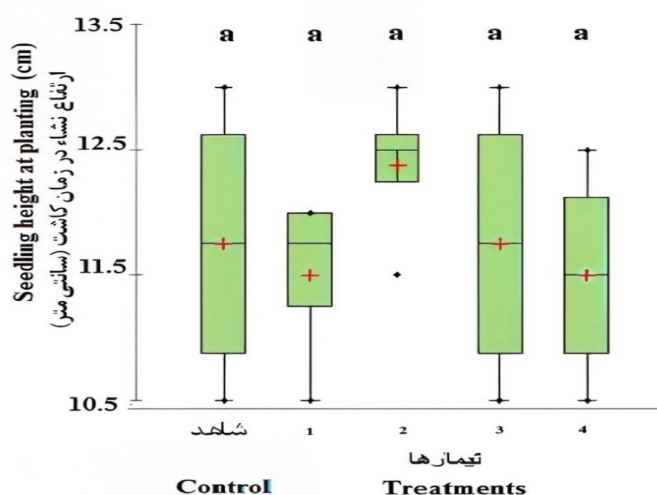
اختصاص داد. گزارش شده که مصرف نانوسیلیس، علاوه بر کاهش اثرات منفی استرس کم آبی، با غلظت 90 میلی گرم در خاک شالیزار، منجر به رشد مطلوب برنج شد (20).

ارتفاع گیاه: آماره های توصیفی مربوط به ارتفاع گیاه در چهار زمان در طول رشد (جدول های 9، 10، 11 و 12) تفاوت معنی داری بین تیمارها نشان نداد (شکل های 9، 10، 11 و 12). بلندترین ارتفاع را در زمان پنجه زنی و برداشت گیاه، تیمار 1 به خود

جدول 10- آماره توصیفی ارتفاع نشاء در تیمارهای مختلف و شاهد در زمان نشاکاری.

Table 10. Descriptive statistics of seedling height in different treatments and control in seedling.

| متغیر<br>(Variable)      | حداقل<br>(Minimum) | حداکثر<br>(Maximum) | میانگین<br>(Average) | ضریب تغییرات<br>(variation Coefficient) |
|--------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------------------|
| شاهد<br>(Control)        | 10.50              | 13.00               | 11.75                | 0.11                                    |
| تیمار 1<br>(Treatment 1) | 10.50              | 12.00               | 11.50                | 0.06                                    |
| تیمار 2<br>(Treatment 2) | 11.50              | 13.00               | 12.37                | 0.05                                    |
| تیمار 3<br>(Treatment 3) | 10.50              | 13.00               | 11.75                | 0.11                                    |
| تیمار 4<br>(Treatment 4) | 10.50              | 12.50               | 11.50                | 0.07                                    |



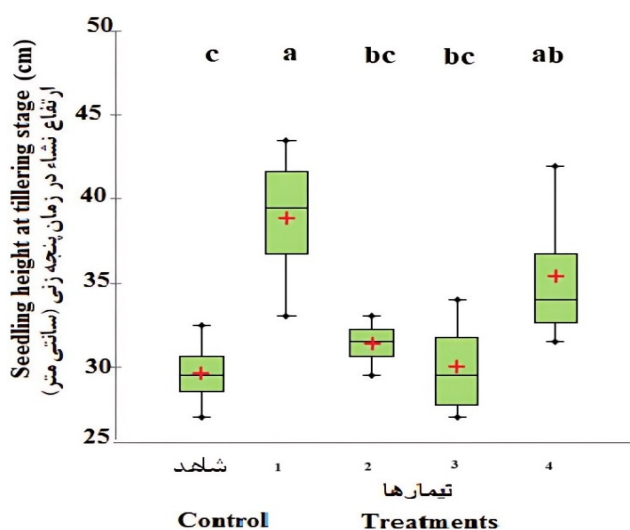
شکل 10- مقایسه ارتفاع گیاه بین تیمارهای مختلف و شاهد در زمان نشاکاری.

Figure 10. Comparison of plant height between different treatments and control at planting time.

جدول 11- آماره توصیفی ارتفاع گیاه برنج در تیمارها و شاهد در زمان پنجه زنی.

Table 11. Descriptive statistics of plant height in different treatments and control at tillering time.

| متغیر<br>(Variable)      | حداقل<br>(Minimum) | حداکثر<br>(Maximum) | میانگین<br>(Average) | ضریب تغییرات<br>(Variation coefficient) |
|--------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------------------|
| شاهد<br>(Control)        | 27.00              | 35.50               | 29.62                | 0.07                                    |
| تیمار 1<br>(Treatment 1) | 33.00              | 43.00               | 38.87                | 0.11                                    |
| تیمار 2<br>(Treatment 2) | 29.50              | 33.00               | 31.37                | 0.04                                    |
| تیمار 3<br>(Treatment 3) | 27.00              | 34.00               | 30.00                | 0.11                                    |
| تیمار 4<br>(Treatment 4) | 31.50              | 32.00               | 35.37                | 0.13                                    |



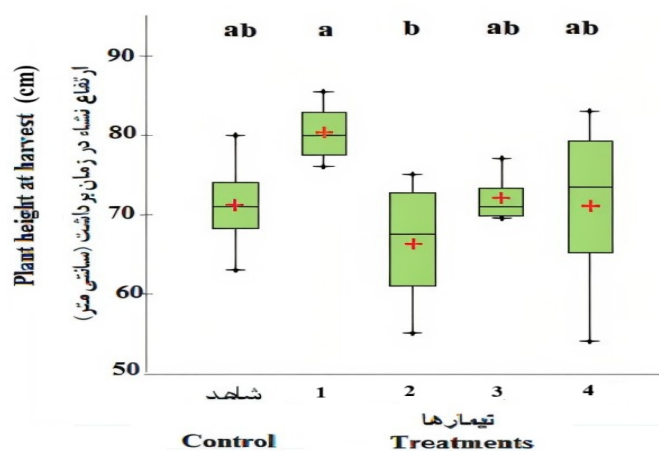
شکل 11- مقایسه ارتفاع گیاه در تیمارها و شاهد در زمان پنجه زنی.

Figure 11. Comparison of plant height in treatments and control at tillering time.

جدول 12- آماره توصیفی ارتفاع گیاه در تیمارهای مختلف و شاهد در زمان برداشت.

Table 12. Descriptive statistics of plant height measured in treatments and control at harvest time.

| متغیر<br>(Variable)      | حداقل<br>(Minimum) | حداکثر<br>(Maximum) | میانگین<br>(Average) | ضریب تغییرات<br>(Variation coefficient) |
|--------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------------------|
| شاهد<br>(Control)        | 63.00              | 80.00               | 71.25                | 0.09                                    |
| تیمار 1<br>(Treatment 1) | 76.00              | 85.50               | 80.37                | 0.05                                    |
| تیمار 2<br>(Treatment 2) | 55.00              | 75.00               | 66.25                | 0.13                                    |
| تیمار 3<br>(Treatment 3) | 69.00              | 77.00               | 72.12                | 0.04                                    |
| تیمار 4<br>(Treatment 4) | 54.00              | 83.00               | 71.00                | 0.17                                    |



شکل 12- مقایسه ارتفاع گیاه در زمان برداشت.

Figure 12. Comparison of plant height at harvest time.

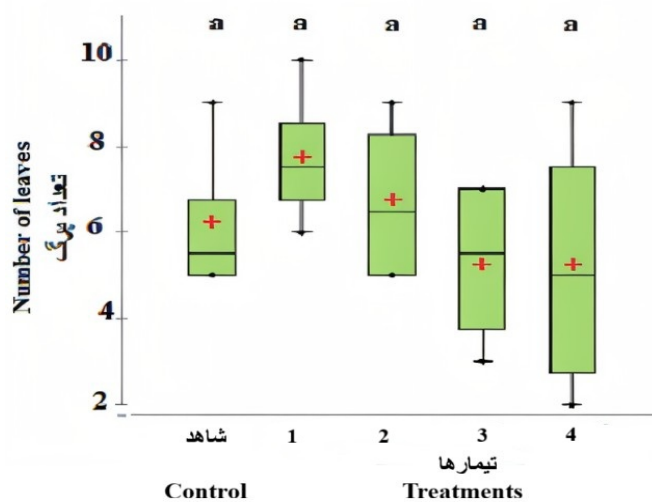
در مطالعه اثر سیلیس بر رشد برنج گزارش شد که بیشترین تعداد برگ (حدود 31 برگ) مربوط به تیمار نانوسیلیس بود و مشخص شد که تعداد برگ در گیاهان به طور چشمگیری تحت تأثیر نانوسیلیس قرار می گیرد (22).

تعداد برگ: آماره های حداقل، حداکثر، میانگین و ضریب تغییرات تعداد برگ (جدول 13) تفاوت معنی داری را بین تیمارهای مختلف نشان نداد (شکل 13). به طور میانگین، تعداد برگ برای تیمار 1 حداکثر (حدود 8 عدد) و برای تیمارهای 3 و 4 حداقل بود.

جدول 13- آماره توصیفی تعداد برگ در تیمارهای مختلف و شاهد.

Table 13. Descriptive statistics of number of leaves in treatments and control.

| متغیر (Variable)      | حداقل (Minimum) | حداکثر (Maximum) | میانگین (Average) | ضریب تغییرات (Variation coefficient) |
|-----------------------|-----------------|------------------|-------------------|--------------------------------------|
| شاهد (Control)        | 5               | 9                | 6.25              | 0.31                                 |
| تیمار 1 (Treatment 1) | 6               | 10               | 7.75              | 0.22                                 |
| تیمار 2 (Treatment 2) | 5               | 9                | 6.75              | 0.31                                 |
| تیمار 3 (Treatment 3) | 3               | 7                | 5.25              | 0.39                                 |
| تیمار 4 (Treatment 4) | 2               | 9                | 5.25              | 0.62                                 |



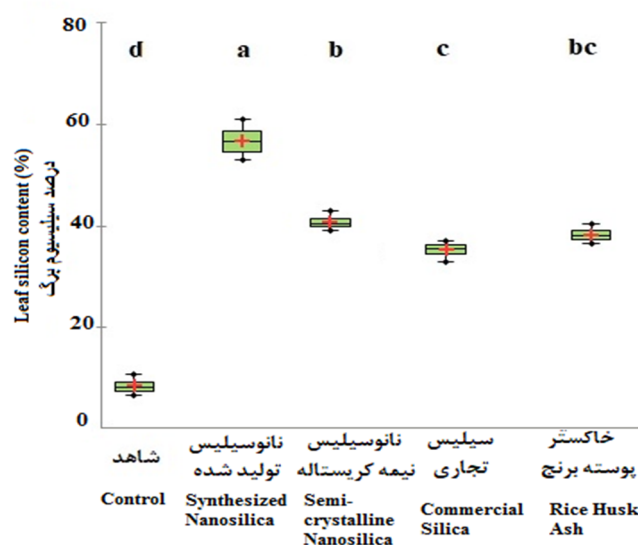
شکل 13- مقایسه تعداد برگ در تیمارهای مختلف و شاهد.

Figure 13. Comparison of number of leaves in different treatments.

برگ برای تیمار 1، بیشترین (56/75 درصد) و برای نمونه شاهد، کمترین (7/75 درصد) را نشان داد. مقدار سیلیسیم در تیمار 1 به ترتیب 1/39، 1/50،

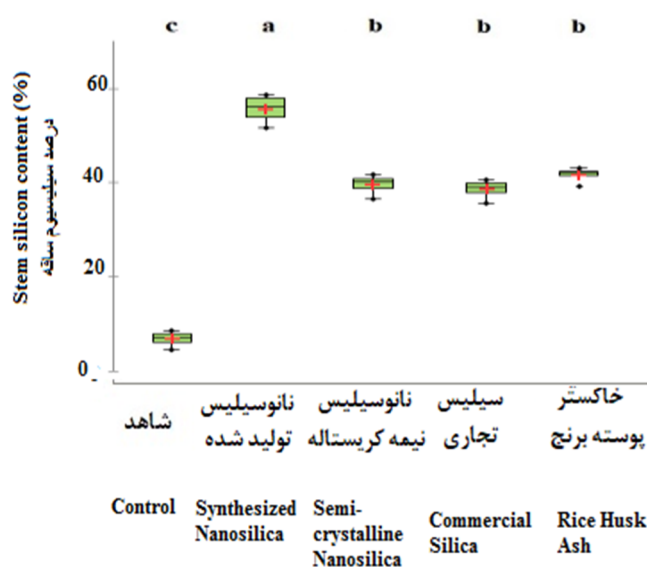
مقدار سیلیسیم در برگ و ساقه: مقدار سیلیسیم در ماده خشک برگ و ساقه به طور معنی دار بین تیمارها و شاهد متفاوت (شکل های 14 و 15) به طوری که در

سیلیسیم در تیمار نانوسیلیس بی شکل تولید شده به ترتیب 1/31، 1/40، 1/43 و 7/72 برابر این صفت در تیمارهای خاکستر پوسته برنج، نانوسیلیس نیمه بلوری، نانوسیلیس تجاری وارداتی آمریکایی و نمونه شاهد بود. 1/61 و 7/32 برابر این مقدار در تیمارهای 2، تیمار 4، تیمار 3 و نمونه شاهد بود. هم چنین در ساقه، مقدار سیلیسیم در ماده خشک برای تیمار نانوسیلیس بی شکل بیشترین (56 درصد) و برای نمونه شاهد، کمترین (7/25 درصد) را نشان داد به طوری که مقدار



شکل 14- مقدار سیلیسیم در ماده خشک برگ در تیمارهای مختلف و شاهد.

Figure 14. Leaf silica dry matter basis in different treatments and control.

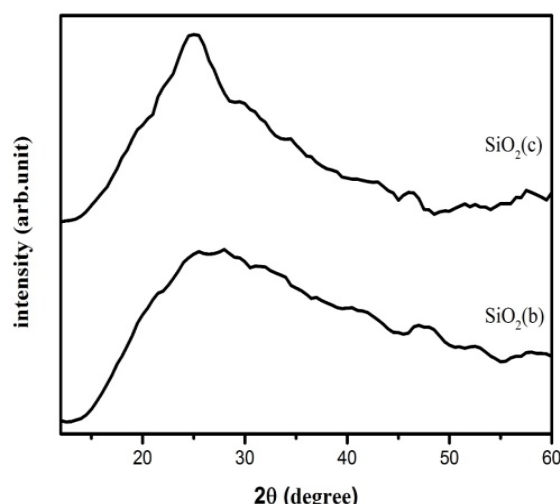


شکل 15- مقایسه مقدار سیلیسیم در ماده خشک ساقه در تیمارهای مختلف و شاهد.

Figure 15. Silicon content in stem dry weight basis in different treatments and control.

$\text{SiO}_2$  (c) بلورینگی نسبت به  $\text{SiO}_2$  (b) قابل تأیید است که نشان می‌دهد پیرولیز نانوذرات سیلیس بی‌شکل برهمکنش داده شده با محلول  $\text{KNO}_3$  در دمای 800 درجه سلسیوس منجر به افزایش بلورینگی و تولید نانو ذرات سیلیس شبه بلوری (استفاده شده در تیمار 2) شده است (24).

مشخصات نانوسیلیس آمورف و شبه‌بلوری: الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) در نانوسیلیس بی‌شکل (b) و نانوسیلیس شبه بلوری (c) یک پیک پهن در الگوی XRD نمونه b (استفاده شده در تیمار 1) در  $2\theta=25^\circ$  نشان داد که یک فرم معمول برای نانوذرات سیلیس آمورف است (شکل 16).

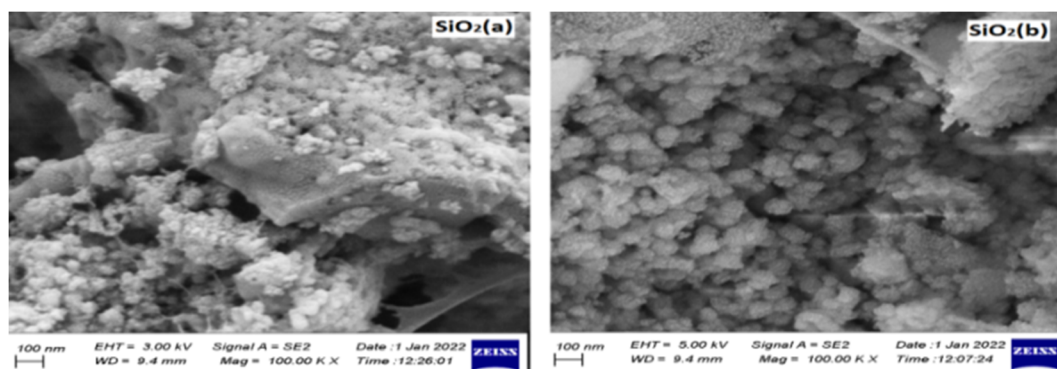


شکل 16- پراش پرتو ایکس تهیه شده از نانوسیلیس آمورف (b) و شبه بلوری (c).

Figure 16. X-ray diffraction patterns of amorph (b) and semi-crystal (c) nanosilica samples.

شده‌اند با این تفاوت که در نمونه b قبل از فرایند پیرولیز، پوسته شلتوک با اسیدرقیق، شستشو داده شده است، بنابراین می‌توان گفت که شستشوی پوسته شلتوک با اسیدکلریدریک رقیق با حذف ناخالصی‌ها، باعث تشکیل نانوذرات با پراکندگی یکنواخت‌تر شد (25).

تأثیر شستشوی اولیه پوسته شلتوک با اسید بر پراکندگی نانوذرات در فرایند تولید نانوسیلیس: به استناد تصاویر آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی، پراکندگی نانوذرات در نمونه b بهتر از a است (شکل 17). این نمونه‌ها در شرایط مشابه سنتز



شکل 17- تصاویر FESEM از نانوسیلیس تولید شده با شستشوی اسیدی (b) و بدون آن (a).

Figure 17. FESEM images of  $\text{SiO}_2$  samples with (b) and without (a) acid wash.

آنالیز مؤلفه اصلی: در این آنالیز چهار مؤلفه اصلی محدود 52/38 درصد واریانس کل ویژگی‌های گیاه مورد مطالعه را توضیح دادند. در جزئیات بیشتر، مؤلفه اول 33/94 و مؤلفه دوم 18/43 درصد این تغییرپذیری و درصد باقی‌مانده توسط مؤلفه‌های سوم و چهارم قابل تحلیل و تفسیر است (جدول 14).

جدول 14- اثرات صفات گیاه برنج مورد مطالعه بر مؤلفه‌های اصلی.

Table 14. Effects of rice plant traits on main components.

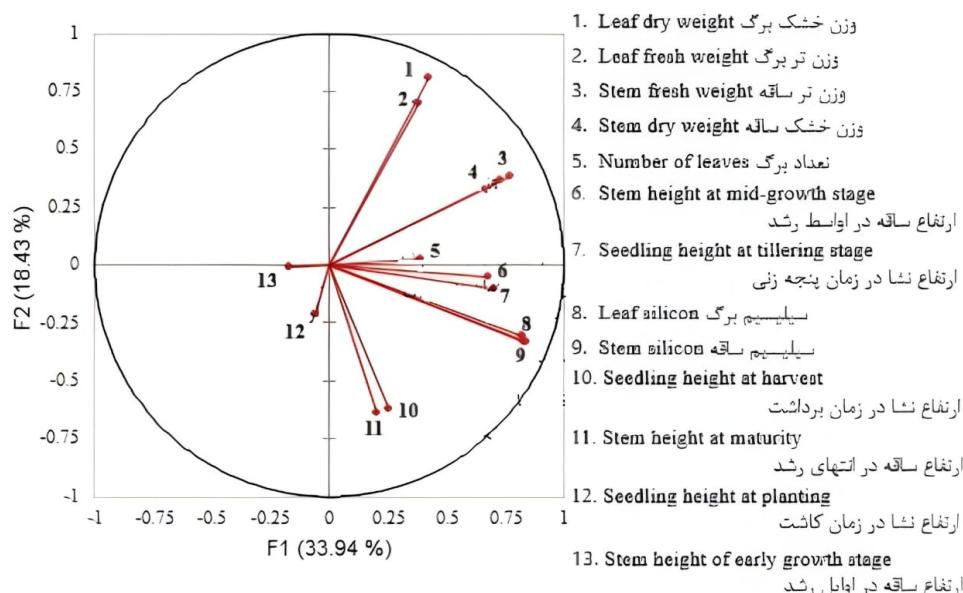
| مؤلفه اول<br>(First component) | مؤلفه دوم<br>(Second component) | مؤلفه سوم<br>(Third component) | مؤلفه چهارم<br>(Fourth component) | ویژگی‌های مورد مطالعه<br>(Studied characteristics)              |
|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 0.700                          | 0.107                           | 0.073                          | 0.050                             | سیلیسیم برگ<br>(Leaf silicon)                                   |
| 0.691                          | 0.112                           | 0.052                          | 0.035                             | سیلیسیم ساقه<br>(Stem silicon)                                  |
| 0.149                          | 0.000                           | 0.382                          | 0.004                             | تعداد برگ<br>(Number of leaves)                                 |
| 0.028                          | 0.000                           | 0.072                          | 0.677                             | ارتفاع نشا در زمان کاشت<br>(Seedling height at planting time)   |
| 0.494                          | 0.010                           | 0.024                          | 0.090                             | ارتفاع ساقه در زمان پنجه‌زنی<br>(Stem height at tillering time) |
| 0.065                          | 0.383                           | 0.335                          | 0.008                             | ارتفاع ساقه در زمان برداشت<br>(Stem height at harvest time)     |
| 0.004                          | 0.044                           | 0.240                          | 0.452                             | ارتفاع ساقه در اوایل رشد<br>(Stem height in early growth)       |
| 0.455                          | 0.003                           | 0.018                          | 0.002                             | ارتفاع ساقه در اواسط رشد<br>(Stem height in growth middle)      |
| 0.043                          | 0.410                           | 0.298                          | 0.002                             | ارتفاع ساقه در اواخر رشد<br>(Stem height in late growth)        |
| 0.530                          | 0.135                           | 0.002                          | 0.006                             | وزن خشک ساقه<br>(Stem dry weight)                               |
| 0.179                          | 0.648                           | 0.110                          | 0.000                             | وزن خشک برگ<br>(Leaf dry weight)                                |
| 0.596                          | 0.150                           | 0.007                          | 0.000                             | وزن تر ساقه<br>(Stem fresh weight)                              |
| 0.147                          | 0.485                           | 0.155                          | 0.006                             | وزن تر برگ<br>(Fresh weight of leaves)                          |
| 0.671                          | 0.093                           | 0.029                          | 0.003                             | پهنای برگ<br>(Leaf width)                                       |

نشان داد و صفات ارتفاع نشا در زمان کاشت و ارتفاع ساقه در اوایل رشد، روی مؤلفه چهارم اثر معنی‌دار داشت. در جدیدترین پژوهش‌ها مصرف نانوسیلیس تولید شده از پوسته شلتوک برنج برای گندم، باعث افزایش مقاومت به تنش خشکی شد (26). در این پژوهش رابطه مقدار سیلیسیم در برگ و ساقه با

سیلیسیم برگ و ساقه، ارتفاع گیاه در زمان پنجه‌زنی، ارتفاع ساقه در اواسط رشد، وزن تر و خشک ساقه و پهنای برگ یک اثر معنی‌دار بر مؤلفه اول و ارتفاع گیاه در زمان برداشت، ارتفاع ساقه در اواخر رشد، وزن تر و خشک برگ این اثر را روی مؤلفه دوم و تعداد برگ این اثر را روی مؤلفه سوم

دوم ( $F_2$ )، 18/43 درصد این تغییرپذیری و درصد باقی‌مانده توسط مؤلفه‌های سوم و چهارم قابل تحلیل و تفسیر است.

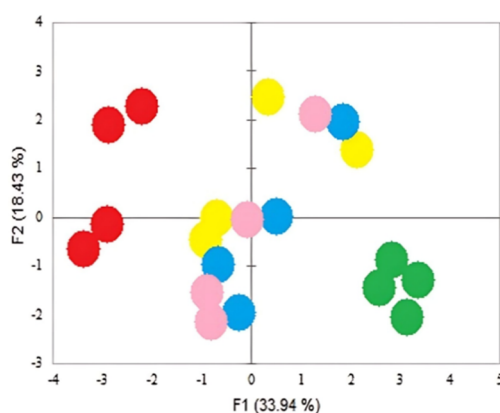
صفات مرتبط با رشد رویشی برنج، در زیر ارائه شده است (شکل 18). بر این اساس با چهار مؤلفه اصلی حدود 52 درصد واریانس کل ویژگی‌های گیاه و در جزئیات بیش‌تر، مؤلفه اول ( $F_1$ )، 33/94 و مؤلفه



شکل 18- رابطه سیلیسیم برگ و ساقه با صفات مختلف اندازه‌گیری شده در گیاه برنج.  
Figure 18. Relationship between leaf and stem silicon and rice plant traits.

از پوسته شلتوک و گروه سوم مربوط به سه تیمار نانوسیلیس نیمه‌بلوری، خاکستر پوسته برنج و نانوسیلیس آمورف تجاری با در نظر گرفتن همپوشانی نقاط مربوط به این گروه، تفکیک شدند (شکل 19).

با رسم مقادیر اثر تیمارهای مختلف بر صفات گیاه برنج در آنالیز مؤلفه اصلی، تفاوت آشکاری بین اثرات این تیمارها پدیدار شد. گروه اول برای تیمار شاهد، گروه دوم برای تیمار نانوسیلیس بی‌شکل تولید شده



دایره قرمز= شاهد، دایره سبز= نانو سیلیس آمورف  
دایره زرد= نانو سیلیس شبه کریستالی  
دایره صورتی= نانوسیلیس آمریکایی  
دایره آبی= خاکستر پوسته شلتوک

Red circle = Control  
Green circle = Amorphous nanosilica  
Yellow circle = Semi-crystalline nanosilica  
Pink circle = American nanosilica  
Blue circle = Rice husk ash

شکل 19- همپوشانی تیمارهای مختلف روی مؤلفه‌های اصلی.

Figure 19. Overlap degree of different treatments on the main components.

### نتیجه گیری کلی

نتایج دلالت بر بهبود ویژگی های گیاه برنج در تمام تیمارها در مقایسه با شاهد دارد. به نظر می رسد دلیل اصلی این تغییرات به دلیل تفاوت در مقدار سیلیسیم جذب شده در اندام های گیاه برنج است. تمام صفات مورد مطالعه در این پژوهش صرف نظر از معنی دار بودن، در گیاه تیمار شده با نانوسیلیس آمورف تولید شده از پوسته شلتوک (تیمار 1)، نتایج مشابه یا بهتر در مقایسه با نانو سیلیس آمورف آمریکایی داشت. نتایج نشان داد که می توان از نانوسیلیس آمورف قابل تولید از پوسته بیرونی شلتوک به عنوان یک منبع ارگانیک سیلیسیم و دوست دار

طبیعت در راستای کشاورزی پایدار برای رشد رویشی برنج استفاده کرد چون علاوه بر نتایج بهتر، تولید آن هزینه کمتری در مقایسه با تولید نانوسیلیس شبه کریستال و نیز واردات نانوسیلیس آمریکایی دارد.

### سپاسگزاری

از پارک علم و فناوری گیلان، مرکز رشد کشاورزی و منابع طبیعی گیلان، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گیلان و شرکت شهرک های صنعتی گیلان، به دلیل حمایت مادی و معنوی از این پژوهش کاربردی و تقاضا محور، سپاسگزاریم.

### منابع

1. Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2001). *Principles of plant nutrition* (No. Ed. 4, p. 687pp).
2. Dobermann, A. (2000). Rice: Nutrient disorders & nutrient management. *Int. Rice Res. Inst.* 203 p.
3. Datnoff, Elmer, Huber. (2007). "Mineral nutrition and plant disease." Chapter 17 (silicon and plant diseases). 300 p. *The American phytopathological society*.
4. Chaiwong, N., Pusadee, T., Jamjod, S., & Prom-U-Thai, C. (2022). Silicon application promotes productivity, silicon accumulation and upregulates silicon transporter gene expression in rice. *Plants*, 11(7), 989. doi.org/10.3390/plants11070989.
5. Kiany, T., Pishkar, L., Sartipnia, N., Iranbakhsh, A., & Barzin, G. (2022). Silicon nanoparticles alleviate arsenic toxicity in rice. *Journal of Plant Physiology Breeding*, 12(1), 93-107. doi. 10.22034/JPPB.2022.47857.1239.
6. Mahmoud Soltani, S., Karbalai Agha Molki, M. T., Allahgholipour, M., Kavosi, M., & Shahdi Komuleh, A. (2022). The effects of foliar application of zinc and phosphorous on the morphology and yield of the dominant Iranian rice variety (Hashemi). *Journal of Plant Nutrition*, 45(20), 3145-3158.
7. Ma, J. F., & Takahashi, E. (2002). *Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan*. Elsevier.
8. Weaver, R. M., Syers, J. K., & Jackson, M. L. (1968). Determination of silica in citrate-bicarbonate-dithionite extracts of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 32(4), 497-501. doi: 10.2136/sssaj1968.03615995003200040023x.
9. Olsen, S. R., Sommers, L. E., & Page, A. L. (1990). "Methods of soil analysis. Part 2." *Chemical and microbiological properties of Phosphorus*. ASA Monograph. 9, 403-430. doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c24.
10. Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (Eds.). (1982). *Methods of soil analysis* (Part 2: Chemical and microbiological properties). Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
11. Jones, J. B. (2001). *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. CRC press. doi.org/10.1002/jpln.19851480319.
12. Paye, W., Tubana, B., Harrell, D., Babu, T., Kanke, Y., & Datnoff, L. (2018). Determination of critical soil

- silicon levels for rice production in Louisiana using different extraction procedures. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(17), 2091-2102. doi: 10.1080/00103624.2018.1495731.
13. Hauptkorn, S., Pavel, J., & Seltner, H. (2001). Determination of silicon in biological samples by ICP-OES after non-oxidative decomposition under alkaline conditions. *Fresenius' journal of analytical chemistry*, 370, 246-250.
14. Khan, F. A., & Fenton, T. E. (1996). Secondary iron and manganese distributions and aquic conditions in a mollisol catena of central Iowa. *Soil Science Society of America Journal*, 60, 546-551. doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000020029x.
15. Gardkani, H. (2016). Investigation of changes in electrochemical properties and nutrients status in saturated soils in Guilan region. *Master's thesis*, University of Guilan, Iran. [In Persian]
16. Fallah, A., Visperas, R. M., & Alejar, A. A. (2004). The interactive effect of silicon and nitrogen on growth and spikelet filling in rice (*Oryza sativa* L.). *The Philippine Agricultural Scientist*, 87, 174-176. <https://www.ukdr.uplb.edu.ph/journal-articles/3044>.
17. Gerami, M., & Rameeh, V. (2012). Study of silicon and nitrogen effects on yield components and shoot ions nutrient composition in rice. *Agriculture*, 58, 93-98. doi: 10.2478/v10207-012-0011-x.
18. Amrullah, Sopandie, D., Sugianta, & Junaedi, A. (2015). Influence of nano-silica on the growth of rice plant. *Asian Journal of Agricultural Research*, 9, 33-37. doi: 10.3923/ajar.2015.33.37.
19. Sakae, A., Hideki, U., Waichi, A., & Fumitake, K. (1998). Effects of Silicon on Transpiration and Leaf Conductance in Rice Plants (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science*, 1(2), 89-95. doi: 10.1626/pps.1.89.
20. Ali, S., Mehmood, A., & Khan, N. (2021). Uptake, translocation, and consequences of nanomaterials on plant growth and stress adaptation. *Journal of Nanomaterials*, 2, 1-7. doi.org/10.1155/2021/6677616.
21. Elshayb, O. M., Nada, A. M., Ibrahim, H. M., Amin, H. E., & Atta, A. M. (2021). Application of silica nanoparticles for improving growth, yield, and enzymatic antioxidant for the hybrid rice EHR1 growing under water regime conditions. *Materials*, 14, 11-5. doi: 10.3390/ma14051150.
22. Soumya, K., Girijesh, G. K., Veeranna, H. K., Dushyanthkumar, B. M., & Salimath, S. B. (2020). Effect of nano zinc and silicon on crop growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9, 1112-1120. doi.org/10.20546/ijcmas.2020.910.133.
23. Rastogi, A., Tripathi, D. K., Yadav, S., Chauhan, D. K., Živčák, M., Ghorbanpour, M., ... & Brestic, M. (2019). Application of silicon nanoparticles in agriculture. 3 *Biotech*, 9, 1-11. doi: 10.1007/s13205-019-1626-7.
24. Giannini, C., Ladisa, M., Altamura, D., Siliqi, D., Sibillano, T., & De Caro, L. (2016). X-ray diffraction: A powerful technique for the multiple-length-scale structural analysis of nanomaterials. *Crystals*, 6(8), 87. doi: 10.3390/cryst6080087.
25. Zheng, Y., Cosgrove, D. J., & Ning, G. (2017). High-resolution field emission scanning electron microscopy (FESEM) imaging of cellulose microfibril organization in plant primary cell walls. *Microscopy and Microanalysis*, 23(5), 1048-1054. doi: 10.1017/S143192761701251x.
26. Abdo, R. A., Hazem, M. M., El-Assar, A. E. M., Saady, H. S., & El-Sayed, S. M. (2024). Efficacy of nano-silicon extracted from rice husk to modulate the physio-biochemical constituents of wheat for ameliorating drought tolerance without causing cytotoxicity. *Beni-Suef University, Journal of Basic and Applied Sciences*, 13(1), 75. doi: 10.1186/s43088-024-00529-2.