



Razi University

# Cereal Biotechnology and Biochemistry

Online ISSN: 2783-5170




Cereal Biotechnology and Biochemistry

Homepage: <https://cbb.razi.ac.ir>

## The role of silicon to mitigate the harmful effects of biotic and abiotic stresses in rice (*Oryza sativa* L.); A review

Sajjad Shaker Kouhi<sup>1</sup>  & Mohammad Rabiee<sup>1</sup>  

<sup>1</sup>Department of Agronomy and Plant Breeding, Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Rasht, Iran.

 Corresponding author. E-mail: [m.rabiee@areeo.ac.ir](mailto:m.rabiee@areeo.ac.ir)

### ABSTRACT

**Introduction:** Rice (*Oryza sativa* L.) is one of the most significant crops and a primary source of food for more than half of the world's population. Thus, more rice production is required to maintain food security and meet the needs of the growing world population. At present, the growth of rice has been seriously influenced by various biotic and abiotic stresses in many regions of the world. Silicon (Si) is the second most prevalent element in the soil. Despite Si not being classified as an essential element for plants, it is beneficial in mitigating the effects of biotic and abiotic stresses. Rice being a Si accumulator, Si nutrition and its management can play a vital role in reducing the negative effects of environmental stress during the growth period.

**Materials and methods:** This article is a review that utilizes PRISMA search strategy. Data for this study was collected by searching in databases, including PubMed, Google Scholar, Scopus, Web of Science, ResearchGate and ScienceDirect. In this review we discuss the significant role of silicon in improving rice yield and mitigation the effects of biotic (pests and diseases) and abiotic (lodging, drought, salt, temperature, heavy metal toxicity and nutrient imbalance) stresses and also how the genetic and environmental factors, including soil types and pH, temperature, water regimes and soil nutrients, affect the Si uptake and accumulation in rice plant.

**Results:** The results of this study indicated that the application of Si not only improves crop yield but also mitigates the harmful effects of various stresses in rice. Most of these effects are due to Si deposition on different plant parts like leaves and stems. Si imparts resistance to pests and pathogens, mainly through two main mechanisms including physical (Si deposition beneath the cuticle layer and form a cuticle-Si double layer) and chemical (enhanced production and activity of antioxidant enzymes and plant volatile compounds) defenses. Si application during drought stress prevents compression of xylem vessels and thereby resulting in a reduction of transpiration rate. On the other hand, Si can improve the root traits, enhance absorption of water and thereby impart drought tolerance to rice plants. Si also reduces the effects of salt stress by decreasing Na uptake and its root-to-shoot translocation. Further, the application of Si to increase the culm strength and stability of vascular bundle thus, preventing plant lodging. Si can alleviate heavy metals toxicity in rice by chelation of metal ions, regulates metal transporters, stimulation of enzymatic and non-enzymatic antioxidants and optimization of plant development.

**Conclusion:** The results of the current review reveal the importance of Si in imparting biotic and abiotic stress tolerance in rice; thus, it can be concluded that Si may be a boon for sustainable rice production, particularly under stress conditions.

**Keywords:** Drought stress, Heat stress, Heavy metals, Resistance, Salinity Stress.

**Article Type:** Review Article

**Article history:** Received: 14 May 2025, Revised: 23 Jul 2025, Accepted: 13 Sep 2025, Published online: 23 Sep 2025

**Cite this article:** Shaker Kouhi, S. & Rabiee, M. (2025). The role of silicon to mitigate the harmful effects of biotic and abiotic stresses in rice (*Oryza sativa* L.); A review. *Cereal Biotechnology and Biochemistry*, 4(3), 418-443. DOI: [10.22126/cbb.2025.12185.1106](https://doi.org/10.22126/cbb.2025.12185.1106)



© The Author(s).

[10.22126/cbb.2025.12185.1106](https://doi.org/10.22126/cbb.2025.12185.1106)

**Publisher:** Razi University



## نقش کاربرد سیلیکون در کاهش اثرات مضر تنش‌های زیستی و غیرزیستی در برنج (*Oryza sativa* L.)؛ مطالعه مروری

سجاد شاکرکوهی<sup>۱</sup> و محمد ربیعی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> بخش تحقیقات اصلاح و تهیه بذر، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران.  
نویسنده مسئول. رایانامه: [m.rabiee@areeo.ac.ir](mailto:m.rabiee@areeo.ac.ir)

### چکیده

**مقدمه:** برنج (*Oryza sativa* L.) از مهم‌ترین محصولات زراعی و منبع اصلی غذا برای بیش از نیمی از جمعیت جهان می‌باشد. از این‌رو، افزایش تولید آن به‌منظور حفظ امنیت غذایی و تأمین نیازهای جمعیت رو به رشد جهان، امری ضروری است. در حال حاضر، کشت برنج در بسیاری از مناطق جهان به طور جدی تحت تأثیر تنش‌های مختلف زنده و غیرزنده قرار می‌گیرد. سیلیکون (Si) دومین عنصر فراوان در خاک است. با وجود این‌که Si به عنوان یک عنصر ضروری برای گیاهان طبقه‌بندی نمی‌شود، اما در کاهش اثر تنش‌های زنده و غیرزنده مفید می‌باشد. از آنجایی که برنج یک گیاه تجمع‌دهنده Si است، تغذیه و مدیریت آن می‌تواند نقش حیاتی در کاهش اثرهای منفی تنش‌های محیطی در طول دوره رشد این محصول ایفا نماید.

**مواد و روش‌ها:** مقاله حاضر به عنوان یک مقاله مروری، با استفاده از استراتژی جستجوی PRISMA انجام شد. جمع‌آوری داده‌های این مطالعه از طریق جستجو در پایگاه‌های اطلاعاتی شامل PubMed، Google Scholar، Scopus، Web of Science، ResearchGate و ScienceDirect صورت گرفت. در این بررسی، نقش مهم Si در بهبود عملکرد برنج و کاهش اثر تنش‌های زنده (آفات و بیماری‌ها) و غیرزنده (خوابیدگی، خشکی، شوری، دمای، سمیت فلزات سنگین و عدم تعادل مواد مغذی) و همچنین، چگونگی تأثیر عوامل ژنتیکی و محیطی مانند نوع و pH خاک، دما، رژیم‌های آبیاری و مواد مغذی خاک، بر جذب و تجمع Si در گیاه برنج مورد بحث قرار گرفت.

**یافته‌ها:** نتایج این مطالعه نشان داد که کاربرد Si، نه تنها عملکرد محصول را بهبود می‌بخشد، بلکه موجب کاهش اثرات مضر انواع تنش‌ها در برنج می‌شود. بیش‌تر این اثرات به دلیل رسوب Si در قسمت‌های مختلف گیاه از جمله برگ‌ها و ساقه‌ها است. Si مقاومت در برابر آفات و عوامل بیماری‌زا را به طور عمده از طریق دو سازوکار اصلی شامل مقاومت فیزیکی (رسوب Si در زیر لایه کوتیکول و تشکیل لایه دوگانه کوتیکول-Si) و مقاومت شیمیایی (افزایش تولید و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و ترکیبات فرار گیاهی)، ایجاد می‌کند. کاربرد Si در طول تنش خشکی از فشرده‌شدن آوندهای چوبی جلوگیری کرده و در نتیجه منجر به کاهش سرعت تعرق می‌شود. از طرف دیگر، Si با بهبود ویژگی‌های ریشه می‌تواند جذب آب را افزایش داده و موجب القاء تحمل به خشکی در برنج شود. Si همچنین با کاهش جذب سدیم و انتقال آن از ریشه به ساقه، اثرات تنش شوری را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، Si استحکام ساقه و پایداری دسته‌های آوندی را افزایش داده و در نتیجه از خوابیدگی بوته جلوگیری می‌کند. همچنین Si می‌تواند با کلات کردن یون‌های فلزی، تنظیم انتقال‌دهنده‌های فلزی، تحریک آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی و بهینه‌سازی رشد گیاه، موجب کاهش سمیت فلزات سنگین در برنج شود.

**نتیجه‌گیری:** نتایج بررسی حاضر اهمیت Si در ایجاد تحمل به تنش‌های زنده و غیرزنده در گیاه برنج را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از Si یک مزیت برای تولید پایدار برنج، به‌ویژه در شرایط تنش‌زا محسوب می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** تنش خشکی، تنش شوری، تنش گرما، فلزات سنگین، مقاومت.

نوع مقاله: مقاله مروری

نوع مقاله: دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

استناد: شاکرکوهی، س. و ربیعی، م. (۱۴۰۴). نقش کاربرد سیلیکون در کاهش اثرات مضر تنش‌های زیستی و غیرزیستی در برنج (*Oryza sativa* L.)؛ مطالعه مروری.

DOI: [10.22126/cbb.2025.12185.1106](https://doi.org/10.22126/cbb.2025.12185.1106) ۴۴۳-۴۱۸، (۳)۴، بیوتکنولوژی و بیوشیمی غلات.



## مقدمه

غذایی و در نتیجه افزایش حاصلخیزی خاک می‌شود

(Rao & Susmitha, 2017).

برنج (*Oryza sativa* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی در جهان است که به عنوان رژیم غذایی اصلی بیش از نیمی از جمعیت کره‌زمین، نقش کلیدی در امنیت غذایی ایفا می‌کند (Dass *et al.*, 2017). با این حال، تنش‌های مختلف زیستی و غیرزیستی از محدودیت‌های اصلی برای تولید این محصول راهبردی به شمار می‌روند (Dorjee & Wangmu, 2023). برنج با توانایی جذب ۲۰۰ تا ۴۷۰ کیلوگرم Si در هکتار، به عنوان یک گیاه بیش‌انباشته‌کننده Si شناخته می‌شود (Jinger *et al.*, 2020). جذب و انباشت بیش‌تر Si در برنج نسبت به سایر غلات، به توانایی بالای ریشه این گیاه در جذب و انتقال Si نسبت داده شده است (Ashokan *et al.*, 2023). در شرایط کمبود Si، ممکن است برخی از بیماری‌های برنج مانند بلاست، لکه قهوه‌ای و سوختگی غلاف تشدید شوند (Verma *et al.*, 2024). Si انباشته شده در بافت‌های برنج می‌تواند باعث افزایش مقاومت در برابر حشرات، آفات و بیماری‌ها، افزایش سطح برگ، کاهش تعرق، بهبود مصرف آب، افزایش فتوسنتز و کاهش سمیت فلزات سنگین شود (Ashtiani *et al.*, 2012).

اثرات مثبت Si بر رشد و عملکرد برنج به‌ویژه در شرایط تنش، با تجمع این عنصر در بافت‌های اپیدرمی مرتبط است. به عنوان مثال گزارش شده که در شرایط تنش شوری، کاربرد Si منجر به افزایش رسوب آن در برگ‌های برنج و در نتیجه افزایش سرعت فتوسنتز و عملکرد دانه

سیلیکون (Si) دومین عنصر فراوان در پوسته زمین و خاک است. میانگین غلظت این عنصر در لیتوسفر حدود ۲۸ درصد و در خاک بین ۲۳ تا ۳۵ درصد می‌باشد (Coskun *et al.*, 2019). Si در محلول خاک به طور عمده به‌صورت اسید مونوسیلیسیک در غلظت‌های بین ۰/۱ تا ۰/۶ میلی‌مولار وجود دارد که توسط گیاهان قابل جذب است (Ashokan *et al.*, 2023). مقدار جذب Si توسط گیاهان متفاوت است و بین ۰/۱ تا ۱۰ درصد وزن خشک آن‌ها را شامل می‌شود (Verma *et al.*, 2023). علی‌رغم این‌که Si در گیاهان به‌صورت غیرمتحرک بوده و به عنوان یک عنصر ضروری به‌شمار نمی‌رود، اما برای رشد بیش‌تر آن‌ها به‌ویژه در شرایط تنش، مفید می‌باشد (Verma *et al.*, 2021; Ahire *et al.*, 2021). نقش Si در کاهش اثرات مضر تنش‌های زیستی و غیرزیستی از جمله خشکی، شوری، گرما، سرما، کمبود مواد مغذی، بیماری‌ها و سمیت فلزات سنگین در گیاهان مختلف گزارش شده است (Etesami & Jeong, 2018; Dhiman *et al.*, 2021; Biswas *et al.*, 2023; Verma *et al.*, 2024). Si علاوه بر افزایش تحمل و سازگاری گیاهان به شرایط تنش، نقش حیاتی در تحریک جوانه‌زنی بذر، تنظیم فعالیت‌های آنزیمی، بیان ژن و تحریک سایر واکنش‌های فیزیولوژیک ایفا می‌کند (Ranjan *et al.*, 2021). از طرف دیگر، این عنصر موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، بهبود وضعیت آب در خاک، افزایش قابلیت فراهمی عناصر

(Yamaji *et al.*, 2015). سازوکار جذب، انتقال و تجمع Si در گیاه برنج، در شکل ۱ نشان داده شده است. رسوب Si در برگ‌های برنج در زیر لایه کوتیکول صورت می‌گیرد که منجر به تشکیل یک لایه ضخیم ۲/۵ میکرومتری شده و به عنوان سپر دفاعی در برابر تنش‌های مختلف زیستی و غیرزیستی عمل می‌کند (Ashokan *et al.*, 2023). جذب و تجمع Si در گیاه برنج تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله ژنتیک، نوع و pH خاک، دما، آب و میزان مواد مغذی خاک قرار می‌گیرد (Chaiwong & Prom-u-thai, 2022).

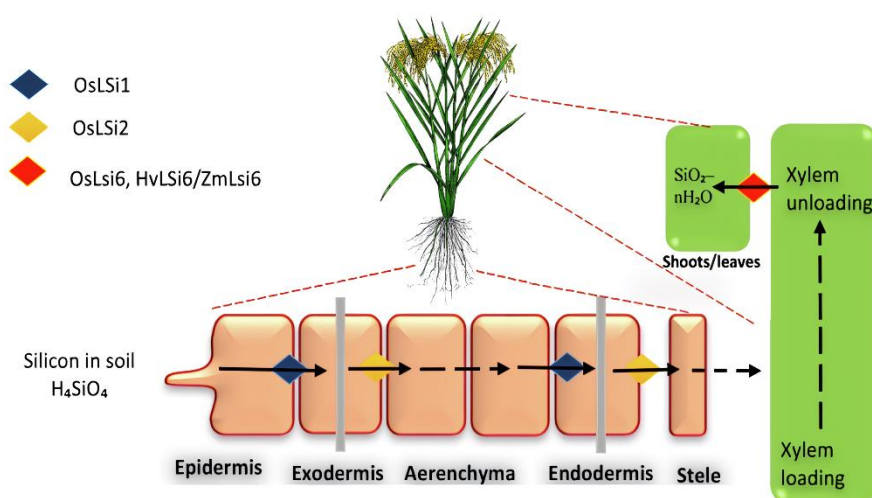
شد (Gong *et al.*, 2006). Si با ایجاد کمپلکس لیگنین-کربوهیدرات در دیواره سلول‌های اپیدرم، باعث افزایش جذب عناصر ضروری از جمله آهن در برنج می‌شود (Crooks & Prentice, 2017). استفاده از Si می‌تواند موجب افزایش محتوای نیتروژن، فسفر و پتاسیم در دانه و کاه، افزایش وزن خشک و عملکرد بیش‌تر در برنج شود (Malav *et al.*, 2016). همچنین، این عنصر سبب افزایش انعطاف‌پذیری دیواره سلولی در نواحی رشد شده و از طریق سنتز پلی‌مرهای پلی‌ساکارید و لیگنینی کردن دیواره سلولی، موجب استحکام ساقه‌های برنج می‌شود (Kim *et al.*, 2011). این بررسی به طور سیستماتیک عوامل مؤثر بر جذب، تجمع و انتقال Si و همچنین نقش این عنصر در کاهش تنش‌های زیستی و غیرزیستی در گیاه برنج را مورد بحث قرار می‌دهد.

#### عوامل مؤثر بر جذب، تجمع و انتقال Si در برنج

Si به شکل اسید سیلیسیک از طریق اپیدرم ریشه، جذب ریشه برنج می‌شود و سپس توسط ناقل‌های  $Lsi1^1$  و  $Lsi2^2$  به سلول‌های آگزودرمی منتقل می‌شود. در آثرانشیم (پارانشیم هوایی) ریشه، Si از طریق مسیر آپوپلاستی (فضای بین سلولی و دیواره سلولی) به اندودرم می‌رسد، سپس وارد آوند چوبی شده و به سمت بالا حرکت می‌کند. در مرحله بعد Si توسط ناقل‌های  $Lsi6$  تخلیه شده و به شکل سیلیس آمورف ( $SiO_2 \cdot nH_2O$ ) در دیواره‌های سلولی برگ‌ها و ساقه‌ها رسوب می‌کند

<sup>1</sup> Lower silicon transporter 1

<sup>2</sup> Lower silicon transporter 2



شکل ۱- سازوکار جذب، انتقال و تجمع سیلیکون در گیاه برنج (Dhiman et al., 2021). OsLsi1، ناقل ورود Si؛ OsLsi2، ناقل خروج Si؛ OsLsi6، مسئول تخلیه Si از آوند چوبی به سلول‌های پارانشیمی.

**Figure 1- The mechanism of silicon (Si) uptake, transport, and accumulation in rice plant (Dhiman et al., 2021).** OsLsi1, Si influx transporter; OsLsi2, Si efflux transporter; OsLsi6, Responsible for the unloading of Si from the xylem into parenchyma cells.

محققان تفاوت در میزان جذب Si توسط ریشه در

ژنوتیپ‌های مختلف برنج را ناشی از تفاوت در سطوح بیان ژن‌های مسئول جذب و انتقال Si (Lsi1 و Lsi2) نسبت داده‌اند (Devanna et al., 2021). در آزمایشی گزارش شد که رقم ژاپونیکا ریشه‌های متراکم‌تر و عمیق‌تری نسبت به رقم ایندیکا دارد که این امر منجر به جذب بیشتر و در نتیجه، افزایش غلظت Si در این رقم شد (Wu et al., 2006). نتایج پژوهش‌های دیگر نیز بیانگر تنوع زیاد در تجمع Si از ۳/۸ تا ۴ درصد در بین ۲۹ ژنوتیپ برنج تایلندی (Chaiwong et al., 2018) و از ۱/۶۵ تا ۴۲/۴ درصد در بین ۵۰ ژنوتیپ مختلف برنج است (Talukdar et al., 2019).

## ۲- عوامل محیطی

### ۲-۱- نوع خاک

## ۱- عوامل ژنتیکی

برنج از لحاظ تجمع Si در بافت‌های خود دارای تنوع ژنوتیپی گسترده‌ای می‌باشد. نتایج بررسی‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین غلظت Si در اندام‌های هوایی ارقام برنج ایندیکا و ژاپونیکا است (Gaur et al., 2020; Chaiwong & Prom-u-thai, 2022). محققان گزارش کردند که رقم ژاپونیکا نسبت به رقم ایندیکا از پتانسیل بیشتری برای تجمع Si در اندام‌های خود برخوردار است (Ma et al., 2007; Boorboori et al., 2023). تفاوت در غلظت Si در ژنوتیپ‌های برنج می‌تواند با فرآیندهای مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه مانند رشد ریشه و انتقال آب و مواد مغذی در ارتباط باشد. گیاهانی که رشد ریشه‌ای بیشتری دارند، می‌توانند Si بیشتری از خاک استخراج کنند (Chaiwong & Prom-u-thai, 2022).

شکل برای گیاه قابل جذب نیست، در نتیجه، غلظت Si در گیاه کاهش می‌یابد (Sandhya & Prakash, 2019). گزارش شده که غلظت Si در بافت‌های برنج با کاهش pH خاک، افزایش یافت؛ به طوری که کشت در خاک اسیدی در مقایسه با خاک قلیایی منجر به افزایش ۳۱ درصدی تجمع Si در اندام‌های برنج شد (Tavakkoli et al., 2011). نتایج پژوهشی دیگر نیز، بیانگر افزایش قابلیت دسترسی Si برای گیاه در شرایط pH اسیدی خاک می‌باشد (Sirisuntornlak et al., 2021).

### ۲-۳-۳-۲ دما

دمای خاک در فصول مختلف رشد بر حلالیت Si تأثیر می‌گذارد، به طوری که دمای بالای خاک منجر به افزایش حلالیت Si می‌شود (Mihara et al., 2017). نتایج بررسی اثر دما بر تجمع Si در گیاه برنج نشان داد که دمای بالا (۴۳ درجه سانتی‌گراد) در طول فصل خشک می‌تواند غلظت Si در خاک و برگ‌های برنج را نسبت به دمای پایین‌تر، به طور قابل توجهی افزایش دهد. دلیل این امر این گونه بیان شد که تعرق بیشتر در فصل خشک باعث جذب بیشتر Si توسط ریشه و انتقال آن به اندام‌های هوایی می‌شود (Hu et al., 2020). تعرق مهم‌ترین عامل در میزان تجمع Si در گیاهان است. نتایج پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که محتوای Si در برگ‌های گیاه با میزان تعرق همبستگی مثبت دارد (Faisal et al., 2012; Chaiwong & Prom-u-thai, 2022). افزایش تجمع Si در گیاه در دمای بالا، به افزایش

نوع خاک بر میزان جذب و تجمع Si در گیاه مؤثر است. خاک‌های شدیداً هوازده مانند اکسی‌سول<sup>۳</sup> و آلتی‌سول<sup>۴</sup> از Si قابل دسترس محدودی برای گیاهان برخوردار هستند (Camargo & Keeping, 2021). همچنین، هیستوسول‌ها<sup>۵</sup> به دلیل دارا بودن مقادیر زیاد ماده آلی، Si قابل دسترس کمی دارند. خاک‌های شنی نیز علی‌رغم این که از کوارتز سیلیکا (SiO<sub>2</sub>) تشکیل شده‌اند، اما از نظر میزان Si محلول قابل جذب برای گیاهان، بسیار محدود هستند (Gaur et al., 2020). مقایسه بین خاک‌های مناطق پست و مرتفع نشان داد که خاک‌های مرتفع نسبت به خاک‌های پست، Si قابل دسترس کم‌تری دارند (Pati et al., 2016). خاک‌های زراعی به دلیل کشت متراکم و متوالی و حذف Si از طریق برداشت گیاهان زراعی در هر فصل، نسبت به خاک‌های غیرزراعی از میزان Si کم‌تری برخوردار هستند (Katz et al., 2021). نگهداری بقایای برنج در اراضی شالیزاری یا استفاده از کودهای شیمیایی، روشی مؤثر برای افزایش در دسترس بودن Si برای برنج و در نتیجه بهبود عملکرد آن است (Limmer et al., 2023).

### ۲-۲-۲-۲ اسیدیته (pH) خاک

اسیدیته (pH) خاک از مهم‌ترین عوامل محیطی تأثیرگذار بر قابلیت دسترسی و تجمع Si در گیاه است. pH بالای خاک (بیش‌تر از ۸/۹) موجب افزایش محتوای یون‌های سیلیکات (H<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub>) در خاک می‌شود. اما Si در این

<sup>3</sup> Oxisols

<sup>4</sup> Ultisols

<sup>5</sup> Histosols

همسو با این نتایج، Marxen و همکاران (Marxen *et al.*, 2016) گزارش کردند که با کاربرد کود سیلیکا، غلظت Si در اندام‌های هوایی برنج ۲۸ تا ۱۲۰ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافت که این امر به افزایش محتوای Si در محلول خاک و در نتیجه جذب Si توسط ریشه و انتقال آن به اندام‌های هوایی از طریق افزایش بیان ژن‌های Lsi1 و Lsi2 نسبت داده شد. نتایج پژوهشی دیگر نیز بیانگر افزایش غلظت Si در کاه برنج با محلول‌پاشی کود Si می‌باشد (Chen *et al.*, 2018).

میزان در دسترس بودن سایر عناصر مغذی نیز بر تجمع Si در گیاه برنج تأثیرگذار است. محققان گزارش کردند که کاربرد سطوح بالای نیتروژن در خاک، باعث کاهش بیش از ۱۶ درصدی غلظت Si در برنج در مقایسه با مقدار نیتروژن بهینه شد (Szulc *et al.*, 2019). نتایج آزمایش دیگر نیز بیانگر کاهش غلظت Si در برنج با کاربرد سطوح بالای نیتروژن است که دلیل این امر به کاهش بیان ژن‌های ناقل Si (OsLsi1 و OsLsi2) نسبت داده شد (Wu *et al.*, 2017). علاوه بر این، کودهای فسفر و پتاسیم نیز بر جذب و انتقال Si در برنج مؤثر هستند. افزایش کاربرد فسفر از طریق افزایش Si قابل دسترس در خاک، موجب افزایش غلظت Si در برنج می‌شود (Phonde *et al.*, 2014). محققان گزارش کردند که فسفات‌ها به شدت سیلیکات‌ها را از فاز جامد به فاز محلول خاک منتقل کرده و در نتیجه سبب افزایش محتوای Si در خاک می‌شوند (Lee & Kim, 2007). نتایج یک بررسی نشان داد که در شرایط محدودیت

بیان ژن‌های مسئول جذب و انتقال Si (Lsi1 و Lsi2) نسبت داده شده است (Khan *et al.*, 2020).

## ۲-۴- رژیم آبیاری

رژیم آبیاری در طول فصل رشد، نقش مهمی در میزان غلظت Si در خاک و گیاه برنج دارد. نتایج مطالعات نشان‌دهنده تجمع بیش‌تر Si در اندام‌های هوایی ارقام برنج کشت شده در شرایط غرقابی نسبت به ارقام کشت شده در نواحی مرتفع و عدم شرایط غرقابی است (Sahrawat, 2012; Pati *et al.*, 2016). محققان گزارش کردند که افزایش غلظت Si در برنج کشت شده در شرایط غرقابی در مقایسه با شرایط هوایی، ناشی از افزایش Si قابل دسترس در خاک و در نتیجه، جذب آن توسط ریشه‌ها می‌باشد (Katz, 2018). افزایش Si قابل دسترس در خاک تحت شرایط غرقابی، به کاهش پتانسیل اکسیداسیون و احیا و آزاد شدن Si از اکسیدهای آهن سه ظرفیتی نسبت داده شده است (Pati *et al.*, 2016; Chaiwong & Prom-u-thai, 2022).

## ۲-۵- مواد مغذی خاک

علاوه بر عوامل محیطی فوق که بر انباشت و انتقال Si در برنج تأثیرگذار می‌باشند، کودها نیز یکی دیگر از عوامل مؤثر در این خصوص به شمار می‌روند. استفاده از کودهای Si می‌تواند باعث افزایش غلظت Si در برنج شود. در آزمایشی گزارش شد که کاربرد کود Si در مقایسه با عدم استفاده از کود به ترتیب موجب افزایش ۳۴ و ۵۶ درصدی غلظت Si در دانه و کاه برنج شد (Pati *et al.*, 2016).

شده و به عنوان یک مانع فیزیکی برای تغذیه حشرات عمل کرده و قابلیت هضم را کاهش می‌دهد. همچنین در مقاومت بیوشیمیایی، Si با افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و ترکیبات فرار گیاه، حمله حشرات گیاه‌خوار را خنثی می‌کند (Reynolds *et al.*, 2016). Si با القاء پاسخ‌های دفاعی بیوشیمیایی و مولکولی از طریق افزایش بیان آنزیم‌های مرتبط با مقاومت مانند فنیل‌آلانین‌آمونیا‌لیاز<sup>۶</sup>، کیتیناز<sup>۷</sup>، پراکسیداز<sup>۸</sup>، بتا-۱، ۳-گلوکاناز<sup>۹</sup> و پلی‌فنل اکسیداز<sup>۱۰</sup>، مقاومت گیاه را در برابر حشرات و بیماری‌ها افزایش می‌دهد (Jiang & Zhang, 2021). گزارش شده که کاربرد کود Si به شکل گرانول به میزان ۳۷/۵ کیلوگرم در هکتار باعث کاهش خسارت کرم ساقه‌خوار برنج شد (Jawahar *et al.*, 2015). محققان گزارش کردند که رسوب Si در ساقه برنج مقاومت این گیاه را نسبت به کرم ساقه‌خوار به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. نتایج آن‌ها نشان داد که لاروهای که میزان زیادی Si از بافت‌های برنج تغذیه می‌کنند، برجستگی آرواره‌های بالا در آن‌ها سائیده شده و به این ترتیب تعداد زیادی از این لاروها در اثر گرسنگی تلف می‌شوند (Leroy *et al.*, 2019). در آزمایشی، همبستگی مثبت بین محتوای Si در برنج و مقاومت آن در برابر زنجبرک سبز برنج گزارش شد (Debona *et al.*, 2017). بر اساس این نتایج، کاربرد Si موجب افزایش محتوای Si در بافت‌های برنج شد و میزان باروری، بقاء و تعداد

پتاسیم، غلظت Si در برگ‌ها و ساقه‌های برنج افزایش و در ریشه‌ها کاهش یافت (Minden *et al.*, 2021). در دسترس بودن ریزمغذی‌های آهن و روی نیز بر تجمع Si در برنج مؤثر هستند. گزارش شده که رشد برنج در شرایط کمبود آهن منجر به افزایش غلظت Si و بیان ژن‌های Lsi1 در ریشه در مقایسه با مقدار کافی آهن شد. اما این کمبود، موجب افزایش غلظت Si در اندام هوایی برنج نشد (Chaiwong *et al.*, 2020). محققان گزارش کردند که تحت شرایط بیش از حد روی، بیان ژن‌های Lsi1 و Lsi2 در گیاه برنج کاهش یافت و در نتیجه موجب کاهش غلظت Si در اندام هوایی شد (Chaiwong & Prom-u-thai, 2022).

## نقش Si در کاهش اثرات منفی تنش‌های زیستی

### ۱- آفات

بیش از ۱۰۰ گونه از حشرات زیان‌آور در دنیا در مزارع برنج فعالیت می‌کنند که ۲۰ گونه از آن‌ها خطرناک بوده و می‌توانند با حمله به قسمت‌های مختلف برنج، باعث ضرر اقتصادی فراوان شوند (Ashokan *et al.*, 2023). Si به عنوان یک عنصر مؤثر در افزایش مقاومت گیاهان در برابر آفات و بیماری‌ها شناخته شده است (Alhousari & Greger 2018). Si می‌تواند مقاومت گیاه برنج را در برابر آفاتی مانند زنجبرک سبز، کرم ساقه‌خوار، کنه‌ها و کرم سبز برگ‌خوار افزایش دهد (Islam *et al.*, 2020). دو سازوکار اصلی مقاومت به آفات شامل مقاومت فیزیکی و بیوشیمیایی هستند. در مقاومت فیزیکی، رسوب Si باعث استحکام دیواره سلولی و افزایش سختی در بافت‌های برنج

<sup>6</sup> Phenylalanine amonia-lyase

<sup>7</sup> Chitinase

<sup>8</sup> Peroxidase

<sup>9</sup>  $\beta$ -1,3-glucanase

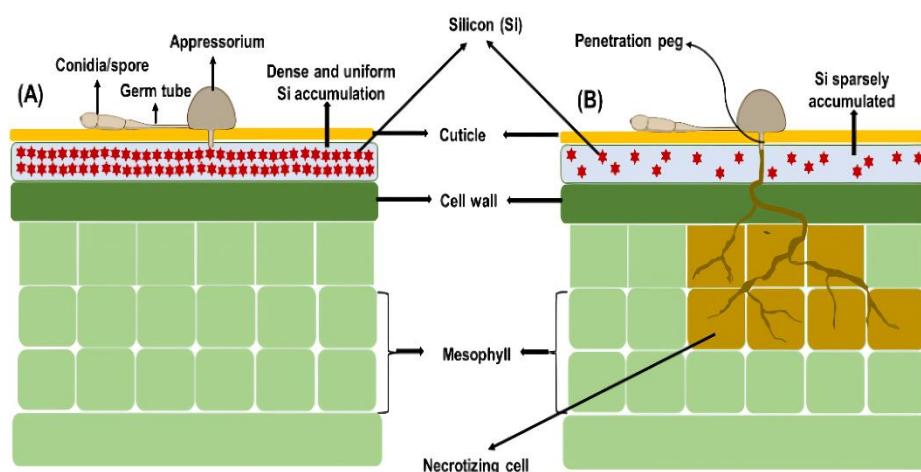
<sup>10</sup> Poly phenol oxidase

مواد بیوشیمیایی، واکنش‌های دفاعی گیاه برنج را تقویت کرده و تحمل به بیماری را افزایش می‌دهد (Wang *et al.*, 2017). گزارش شد که کاربرد Si به شکل سیلیکات کلسیم موجب کاهش ۴۰ درصدی بیماری بلاست برنج شد (Datnoff *et al.*, 2001). همچنین ترکیب آن با فنیل جیوه استات، میزان بلاست برنج را ۷۵ تا ۹۰ درصد کاهش داد. نتایج آزمایشی نشان داد که کاربرد Si به دلیل تولید فلاونوئیدها و افزایش فعالیت آنزیم‌های فنیل‌آلانین‌آمونیا لیاز و پلی‌فنل اکسیداز در برگ‌ها، سبب افزایش تحمل به بیماری سوختگی غلاف برنج شد (Song *et al.*, 2021). محققان گزارش کردند که کاربرد Si مقاومت برنج در برابر بیماری لکه قهوه‌ای را افزایش داد (Van Bockhaven *et al.*, 2015). در پژوهشی دیگر گزارش شد که کاربرد Si باعث کاهش سوختگی باکتریایی برگ برنج شد (Song *et al.*, 2016).

زنجبرک سبز را کاهش داد. نتایج پژوهشی نشان داد که برهمکنش مثبت بین Si و اسید جاسمونیک باعث کاهش خسارت کرم سبز برگ‌خوار برنج شد (Ye *et al.*, 2013).

## ۲- بیماری‌ها

برنج تحت تأثیر طیف وسیعی از عوامل بیماری‌زا قرار می‌گیرد. Si می‌تواند میزان و شدت بیماری‌های برنج مانند بلاست، سوختگی غلاف و لکه قهوه‌ای را کاهش دهد (Ashokan *et al.*, 2023). رسوب Si در زیر لایه کوتیکول موجب تشکیل یک لایه دوگانه کوتیکول-Si می‌شود که به عنوان یک مانع فیزیکی از ورود عوامل بیماری‌زا مانند قارچ‌ها جوگیری می‌کند (شکل ۲). از طرف دیگر، Si مجموعه‌ای از پاسخ‌های بیوشیمیایی را فعال می‌کند که منجر به تولید فنول‌ها و فیتوالکسین‌ها در پاسخ به عوامل بیماری‌زا می‌شود. افزایش سطح این



شکل ۲- رسوب سیلیکون باعث مقاومت گیاه در برابر پاتوژن می‌شود (A)، در حالی که محتوای کم سیلیکون منجر به بیماری می‌شود (B) (Dorjee & Wangmu, 2023).

Figure 2- Silicon (Si) deposition confers resistance to plant against the pathogen (A), whereas low Si content leads to disease (B) (Dorjee & Wangmu, 2023).

ضروری گیاه مانند سوپراکسید دیسموتاز<sup>۱۲</sup>، پراکسیداز، کاتالاز<sup>۱۳</sup> و آسکوربات پراکسیداز<sup>۱۴</sup>، موجب کاهش تولید ROS و کاهش تنش اکسیداتیو در گیاهان می‌شود (Thorne *et al.*, 2020; Sattar *et al.*, 2020).

Si از طریق رسوب در دیواره‌های سلولی ساقه، ریشه و برگ به عنوان یک ماده ضد تعرق عمل می‌کند. افزایش رسوب Si با جلوگیری از فشردگی آوندهای چوبی و همچنین کاهش قطر منافذ روزنه‌ها، موجب کاهش تعرق برگ می‌شود. در حالی‌که، دیواره‌های سلولی اپیدرمی حاوی سیلیکای کمتر، به آب اجازه می‌دهد تا با سرعت بیشتری در طول گرما و تنش خشکی از دست برود (Pan *et al.*, 2021). تحت تنش خشکی، تجمع غالب Si در ریشه صورت می‌گیرد که منجر به افزایش طول، سطح و فعالیت ریشه می‌شود. بنابراین، افزایش سطوح Si می‌تواند باعث بهبود ویژگی‌های ریشه، افزایش جذب آب و در نتیجه افزایش تحمل به تنش خشکی در برنج شود (Ashokan *et al.*, 2023). محققان گزارش کردند کاربرد Si و افزایش سطوح آن در برگ‌های برنج، سبب کاهش نشت الکترولیت برگ در طول تنش خشکی شد، زیرا غلظت Si در برگ‌ها با سطح پلی‌ساکاریدها در دیواره سلولی مرتبط است. این نتایج نشان می‌دهد که Si در برگ‌های برنج نقش حیاتی در روابط آبی سلول‌ها مانند خواص مکانیکی و نفوذپذیری آب، ایفا می‌کند (Jinger *et al.*, 2020; Malik *et al.*, 2021).

## نقش Si در کاهش اثرات منفی تنش‌های غیرزیستی

### ۱- تنش خشکی

تنش کمبود آب یکی از مخرب‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که بر بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیک در گیاهان تأثیر منفی می‌گذارد و عملکرد محصول را به شدت کاهش می‌دهد. برنج به عنوان یک محصول نیمه‌آبزی به آب فراوان نیاز دارد و نسبت به سایر محصولات زراعی به شرایط کمبود آب حساس‌تر است (El-Okkiah *et al.*, 2022). تنش خشکی باعث کاهش تقسیم سلولی، اختلال در سیستم ریشه، کاهش طول میانگره‌ها و ارتفاع ساقه برنج می‌شود (Kim *et al.*, 2020). علاوه بر این، تنش خشکی بر بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیک و متابولیک از جمله فتوسنتز، تنفس، تبادل گازی، انتقال الکترون و جذب مواد مغذی، تأثیر منفی دارد (Vanlerberghe *et al.*, 2016; El-Okkiah *et al.*, 2022). نتایج پژوهش‌های مختلف نشان‌دهنده نقش مثبت Si در کاهش اثرات نامطلوب تنش خشکی بر گیاهان زراعی است (Alamri *et al.*, 2020; Ahmad *et al.*, 2021; Malik *et al.*, 2021). یکی از واکنش‌های سریعی که گیاهان در پاسخ به تنش خشکی نشان می‌دهند، سنتز بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن (ROS<sup>11</sup>) است که منجر به پراکسیداسیون لیپیدها، کاهش پایداری غشاء و افزایش نشت الکترولیت می‌شود (Thorne *et al.*, 2020). Si با بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان

<sup>12</sup> Superoxide dismutase

<sup>13</sup> Catalase

<sup>14</sup> Ascorbate peroxidase

<sup>11</sup> Reactive oxygen species

استفاده از Si از طریق افزایش محتوای کلروفیل‌های a و b، افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز، عمودی‌تر شدن برگ‌ها و گسترش سطح ریشه، موجب مقاومت به تنش کمبود آب در برنج می‌شود (Cassol *et al.*, 2021). نتایج پژوهشی نشان داد که کاربرد Si به میزان ۱/۵ میلی‌مولار در شرایط کمبود آب، باعث افزایش راندمان مصرف آب، بهبود هدایت روزه‌ای، تنظیم سطح مواد مغذی معدنی، افزایش سرعت فتوسنتز و افزایش ماده خشک برنج شد (Chen *et al.*, 2011).

## ۲- تنش شوری

تنش شوری با ایجاد اثر اسمزی و سمیت یونی، ضمن تأثیر منفی بر عملکرد و اجزای عملکرد، بسیاری از فرآیندهای دخیل در رشد و نمو گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Han *et al.*, 2021). تجمع یون‌های سدیم و کلر تا سطوح سمی در اثر تنش شوری، تولید گونه‌های ROS را تحریک کرده و در نتیجه موجب آسیب جدی به

اندامک‌های سلولی مانند کلروپلاست، غشای سلولی، میتوکندری و پراکسی‌زوم‌ها و اختلال در فرآیندهای متابولیکی گیاه می‌شود (Munns & Gilliam, 2015). نتایج پژوهش‌های مختلف نشان‌دهنده کاهش اثرات تنش شوری با کاربرد Si در گیاهان زراعی مختلف از جمله برنج می‌باشد (جدول ۱). سازوکارهایی که Si از طریق آن‌ها باعث بهبود فتوسنتز تحت تنش شوری می‌شود، عبارتند از: (۱) کاربرد Si، سمیت یونی و تجمع گونه‌های ROS را کاهش می‌دهد و موجب حفظ ساختار و عملکرد اندامک‌های مسئول فتوسنتز می‌شود. (۲) Si از طریق بهبود هدایت روزه‌ای، حفظ محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و افزایش سرعت جذب دی‌اکسیدکربن، فتوسنتز را بهبود می‌بخشد. (۳) Si از تجمع بیش از حد محصولات فتوسنتزی مانند ساکارز و نشاسته که باعث مهار فتوسنتز و کاهش رشد گیاه می‌شوند، جلوگیری می‌کند (Zhu *et al.*, 2019).

## جدول ۱- اثر سیلیکون بر کاهش تنش شوری در گیاهان مختلف.

Table 1- Effect of silicon (Si) on alleviating salinity stress in different plants.

گونه گیاهی Plant species	شرایط تنش Stress condition	دوز Si Si dose	اثرات Effects	منبع Reference
برنج <i>Oryza sativa</i>	۲۰۰ میلی مولار سدیم کلرید 200 mM NaCl	۲ میلی مولار سیلیکات پتاسیم 2 mM K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	بهبود پاسخ آنتی‌اکسیدانی، کاهش تجمع یون سدیم، نشت الکترولیت و پراکسیداسیون لیپید Improve antioxidant response, reduce Na <sup>+</sup> accumulation, electrolyte leakage and lipid peroxidation	Gupta <i>et al.</i> , (2021)
گندم <i>Triticum aestivum</i>	۰/۶ درصد سدیم کلرید 0.6% NaCl	۲۰ پی‌پی‌ام 20 ppm	کاهش محتوای یون سدیم در برگ‌ها و ریشه‌ها، افزایش فعالیت ریشه و جذب بیش‌تر مواد مغذی Reduce Na <sup>+</sup> content in leaves and roots, enhance root activity and more nutrient uptake	Dhiman <i>et al.</i> , (2021)
جو <i>Hordeum vulgare</i>	۱۲۰ میلی مولار سدیم کلرید 120 mM NaCl	۱ میلی مولار 1 mM	افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی Increase in antioxidant enzymes activity and decrease in lipid peroxidation	Liang <i>et al.</i> , (2003)
ذرت <i>Zea mays</i>	۱۶۰ میلی مولار سدیم کلرید 160 mM NaCl	۱ میلی مولار متاسیلیکات سدیم 1 mM Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	کاربرد Si با افزایش میزان RWC و MSI و افزایش فعالیت آنزیم‌های CAT, SOD, APX و POD سمیت نمک را کاهش داد. Si application alleviated the salt toxicity by increasing RWC and MSI and increasing the activity of CAT, SOD, APX, and POD enzymes	Ali <i>et al.</i> , (2021)
یونجه <i>Medicago sativa</i>	۱۲۰ میلی مولار سدیم کلرید 120 mM NaCl	۱ میلی مولار 1 mM	کاربرد Si آسیب اکسیداتیو را کاهش داد و محتوای فلاونوئیدها، پلی‌فنول‌ها و کاروتنوئیدها را بهبود بخشید. Si application lowered the oxidative damage and improved flavonoids, total polyphenols, and carotenoids contents	El Moukhtari <i>et al.</i> , (2021)

RWC، محتوای نسبی آب؛ MSI، شاخص پایداری غشا سلول؛ CAT، کاتالاز؛ SOD، سوپراکسید دیسموتاز؛ APX، آسکوربات پراکسیداز؛ POD، پراکسیداز.

RWC, relative water contents; MSI, membrane stability index; CAT, catalase; SOD, superoxide dismutase; APX, ascorbate peroxidase; POD, peroxidase.

Si است، که این امر به افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نسبت داده شد (Das *et al.*, 2018). محققان گزارش کردند که Si از طریق افزایش راندمان مصرف آب، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز و کاهش تجمع پراکسید هیدروژن و سدیم در بافت‌های گیاهی، می‌تواند موجب بهبود تحمل به شوری در برنج شود (Lekklar *et al.*, 2019). گزارش شده که رسوب Si در برگ‌ها، موجب

Si می‌تواند از طریق تغییر در مورفولوژی ریشه و تنظیم پتانسیل اسمزی، موجب کاهش تنش اسمزی ناشی از شوری در برنج شود (Yan *et al.*, 2020). نتایج بررسی محققان نشان داد که در شرایط تنش شوری، Si با کاهش جذب سدیم و کاهش انتقال آن از ریشه به ساقه، منجر به کاهش سمیت یونی در برنج شد (Chaiwong & Prom-u-thai, 2022). نتایج پژوهشی دیگر، بیانگر کاهش آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش شوری در برنج با کاربرد

جاسمونیک، اسید سالیسیلیک و آبسزیک اسید، چندین مسیر سیگنالینگ تحمل به سرما را در گیاه برنج فعال می‌کند (Eremina et al., 2016; Rastogi et al., 2021). گزارش شده که کاربرد Si مقاومت برنج را نسبت به تنش سرما افزایش داد، به طوری که تنها پنج درصد از بوته‌های برنج تحت تنش شدید، آسیب دیدند (Jinger et al., 2020).

#### ۴- سمیت فلزات سنگین

آلودگی خاک با فلزات سنگین یک مشکل اساسی برای تولید محصولات زراعی در سراسر جهان است. برنج به دلیل رشد در شرایط غرقابی، در مقایسه با سایر غلات از ظرفیت قابل توجهی برای تجمع فلزات سنگین نظیر آرسنیک و کادمیوم برخوردار است که می‌تواند تهدیدی جدی برای سلامت انسان باشد (Shaker Kouhi & Rabiee, 2024). بنابراین، توسعه روش‌هایی برای کاهش تجمع این فلزات در دانه برنج امری ضروری است. کاهش تجمع فلزات سنگین در برنج با کاربرد Si توسط محققان مختلف گزارش شده است (Ali et al., 2020; Jinger et al., 2023). کاهش سمیت فلزات سنگین توسط Si به سازوکارهای تحمل و اجتناب نسبت داده شده است. سازوکار اجتناب شامل افزایش pH خاک، کلات کردن فلزات سنگین از طریق تولید ترشحات ریشه‌ای و تنظیم ناقل‌های فلزی است. سازوکار تحمل نیز شامل محدود کردن انتقال یون، تحریک آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی، جداسازی فلزات

کاهش تعرق و در نتیجه کاهش تجمع نمک در گیاه برنج می‌شود (Thorne et al., 2020). همچنین نتایج Mir و همکاران (Mir et al., 2022) نشان داد که Si از طریق تشکیل لایه‌های کوتیکولی مضاعف، باعث کاهش تبخیر، تعرق و تجمع یون‌های سدیم و کلرید در گیاه برنج تحت تنش شوری شد.

#### ۳- تنش دمایی

استفاده از Si می‌تواند باعث افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش دمایی (دماهای بالا و پایین) شود (Saha et al., 2021). گیاهان برای غلبه بر نوسانات دمایی از سازوکارهای مختلفی مانند تولید پروتئین‌های شوک حرارتی<sup>۱۵</sup>، تولید فیتوهورمون‌ها و گسترش سیستم آنتی‌اکسیدانی استفاده می‌کنند. Si می‌تواند موجب بهبود این سازوکارها شود (Haider et al., 2021). افزایش تحمل به تنش گرما در گیاهان با کاربرد Si به افزایش محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئیدها نسبت داده شده است (Chalanika De Silva & Asaeda, 2017). نتایج پژوهشی نشان داد که کاربرد Si موجب افزایش مقاومت به تنش گرما و همچنین افزایش زیست‌توده برنج شد (Sivanesan et al., 2014). محققان گزارش کردند که محلول پاشی برگی Si باعث کاهش از دست دادن آب ناشی از دمای بالا (بیش از ۴۲/۵ درجه سانتی‌گراد) در برنج شد که نشان‌دهنده نقش Si در حفظ پایداری غشاء سلولی است (Jinger et al., 2020). نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که کاربرد Si از طریق تنظیم سطوح اسید

<sup>15</sup> Heat shock protein

## ۵- خوابیدگی بوته

خوابیدگی بوته که معمولاً در مرحله خوشه‌دهی یا پس از آن اتفاق می‌افتد یک ویژگی نامطلوب در گیاه برنج محسوب می‌شود، به طوری که تأثیر قابل توجهی بر کاهش عملکرد کمی و کیفی دانه دارد. این کاهش عملکرد، ناشی از اختلال در انتقال آب و مواد مغذی، کاهش دریافت نور و کاهش فعالیت فتوسنتزی برگ‌ها است (Ashokan *et al.*, 2023). خوابیدگی بوته را می‌توان از طریق افزایش مقاومت فیزیکی یا مکانیکی ساقه، کاهش داد. نتایج پژوهش‌های مختلف بیانگر بهبود مقاومت به خوابیدگی بوته در برنج با کاربرد Si است (Ashokan *et al.*, 2023; Dong *et al.*, 2024; Jiang *et al.*, 2025). دلایل اصلی این امر می‌تواند به افزایش دیواره‌های سلولی، افزایش ضخامت ساقه و افزایش مقاومت مکانیکی گیاه اشاره نمود (Zhao *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2024). در آزمایشی گزارش شد که افزایش سطوح Si تا ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، موجب افزایش ضخامت ساقه، افزایش مقاومت به شکستگی میانگره‌ها و کاهش شاخص خوابیدگی در گیاه برنج شد (Fallah, 2012).

نتایج آزمایشی نشان داد که کاربرد Si موجب کاهش شاخص خوابیدگی و افزایش ۱۵ درصدی عملکرد دانه برنج در مقایسه با عدم استفاده از آن شد (Kim *et al.*, 2012). محققان گزارش کردند کاربرد Si منجر به رسوب آن و تشکیل لایه دوگانه کوتیکول-Si در سلول‌های

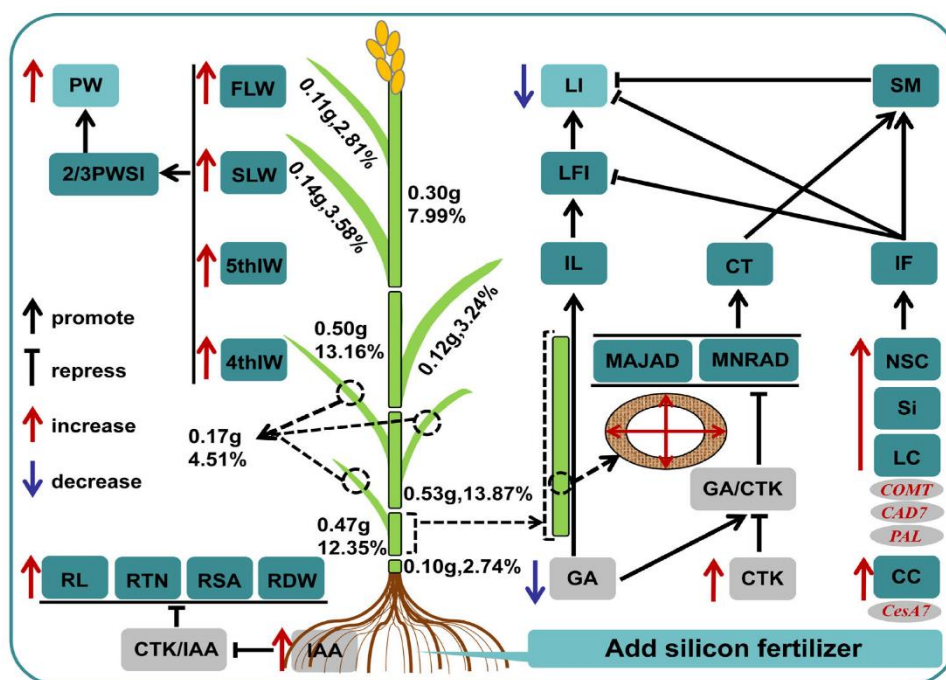
سنگین و ایجاد تغییرات ساختاری در گیاهان می‌باشد (Jia-Wen *et al.*, 2013).

محققان گزارش کردند که Si با کاهش تجمع آرسنیک و بهبود سیستم آنتی‌اکسیدانی، موجب کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از سمیت آرسنیک در برنج شد (Tripathi *et al.*, 2013). در آزمایشی کاهش ۲۲ درصدی غلظت آرسنیک در دانه برنج با کاربرد کود Si گزارش شد. دلیل این امر این‌طور بیان شد که تجمع Si در ریشه، موجب کاهش جذب آرسنیک در ریشه و انتقال آن به اندام‌های هوایی برنج می‌شود (Meher & Mehar, 2015). در آزمایشی دیگر گزارش شد که Si و آرسنیک از مسیر انتقال یکسانی استفاده می‌کنند و در نتیجه، Si تجمع آرسنیک را در برنج کاهش می‌دهد (Guo *et al.*, 2009). همچنین، همبستگی منفی بین تجمع آرسنیک و تلفات اکسیژن شعاعی ( $ROL^{16}$ ) در برنج گزارش شده است. به طوری که گیاهان با تلفات اکسیژن شعاعی بالا، آرسنیک کم‌تری انباشته می‌کنند (Wu *et al.*, 2015). نتایج پژوهشی نشان داد که کاربرد Si علاوه بر بهبود راندمان فتوسنتزی و افزایش عملکرد، باعث کاهش غلظت کادمیوم در ریشه و ساقه برنج گردید (Li *et al.*, 2017). محققان گزارش کردند که Si از طرق کاهش بیان ژن‌های انتقال دهنده کادمیوم، تشکیل فیتوکلاتین‌ها، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و بهبود رشد گیاه، موجب کاهش سمیت کادمیوم در برنج شد (Biswas *et al.*, 2023).

<sup>16</sup> Radial oxygen loss

میانگرم دوم از طریق کاهش هورمون‌های جیبرلین و ایندول استیک اسید، افزایش ضخامت ساقه، افزایش تجمع کربوهیدراتی غیرساختمانی و کاهش شاخص خوابیدگی نسبت داده شد (شکل ۳).

اپیدرمی و در نتیجه، افزایش ضخامت ساقه و کاهش شاخص خوابیدگی در برنج می‌شود (Dorairaj *et al.*, 2017). Jiang و همکاران (Jiang *et al.*, 2025) گزارش کردند که افزودن کود Si به میزان ۴۵ کیلوگرم در هکتار موجب بهبود در مقاومت به خوابیدگی بوته در برنج شد که دلیل این امر به افزایش رشد ریشه، کاهش طول



شکل ۳- مدل توصیفی برای افزایش مقاومت به خوابیدگی در برنج با افزودن کود سیلیکون (Jiang *et al.*, 2025).

فونت قرمز نشان‌دهنده فعال‌سازی و فونت آبی نشان‌دهنده بازدارندگی است. اعداد و درصدها نشان‌دهنده وزن و نسبت مساحت هستند. (2025). فونت قرمز نشان‌دهنده فعال‌سازی و فونت آبی نشان‌دهنده بازدارندگی است. اعداد و درصدها نشان‌دهنده وزن و نسبت مساحت هستند. MAJAD، قطر محور اصلی؛ MNRAD، قطر محور فرعی؛ CT، ضخامت ساقه؛ SM، مدول سطح مقطع؛ IL، طول میانگرم؛ LFI، شاخص پر بودن طول میانگرم دوم؛ LI، شاخص خوابیدگی؛ IF، پر بودن میانگرم؛ NSC، کربوهیدرات‌های غیرساختاری؛ LC، محتوای لیگنین؛ CC، محتوای سلولز؛ 5<sup>th</sup>IW، وزن میانگرم پنجم؛ 4<sup>th</sup>IW، وزن میانگرم چهارم؛ FLW، وزن برگ پرچم؛ SLW، وزن برگ دوم؛ PW، وزن خوشه؛ RTN، تعداد رأس ریشه؛ RL، طول ریشه؛ RSA، مساحت سطح ریشه؛ RDW، وزن خشک ریشه.

**Figure 3- Descriptive model for enhancing the lodging resistance of rice by adding silicon (Si) fertilizer (Jiang *et al.*, 2025).** The red font indicates activation, and the blue font indicates inhibition. Numbers and percentages represent the weight and proportion of the area. MAJAD, major axis diameter; MNRAD, minor axis diameter; CT, culm thickness; SM, cross-section modulus; IL, internode length; LFI, second internode length fullness index; LI, lodging index; IF, internode fullness; NSC, non-structural carbohydrates; LC, lignin content; CC, cellulose content; 5<sup>th</sup>IW, 5<sup>th</sup> internode weight; 4<sup>th</sup>IW, 4<sup>th</sup> internode weight; FLW, flag Leaf weight; SLW, second leaf weight; PW, panicle weight; RTN, root tip number; RL, root length; RSA, root surface area; RDW, root dry weight.

کمبود محتوای نیتروژن یکی از مهم‌ترین عوامل محدود

کننده رشد برنج است. گزارش شده که در شرایط کمبود

۶- عدم تعادل مواد مغذی

در اندام‌های هوایی برنج مرتبط بود (Mehrabanjoubani *et al.*, 2015). محققان گزارش کردند که استفاده از Si به دلیل افزایش محتوای کلروفیل و برخی از پارامترهای فتوسنتزی، موجب کاهش سمیت روی در برنج شد (Huang & Ma, 2020). کمبود و سمیت آهن یکی دیگر از عوامل محدودکننده رشد برنج است. نتایج پژوهشی نشان داد که کاربرد Si از طریق افزایش رسوب آهن در سطح ریشه و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، سبب کاهش سمیت آهن در برنج می‌شود (Fu *et al.*, 2012). گزارش شده که کاربرد Si علائم کمبود آهن در برنج را به طور قابل توجهی کاهش داد و موجب بهبود انتقال آهن از ریشه به اندام هوایی، افزایش محتوای آهن در برگ‌های جوان و حفظ تعادل سایر ریزمغذی‌ها شد (Chaiwong & Prom-u-thai, 2022).

#### نتیجه‌گیری

تنش‌های زیستی و غیرزیستی می‌توانند بر فرآیندهای فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و مولکولی گیاه برنج از مرحله جوانه‌زنی بذر تا گل‌دهی تأثیر گذاشته و در نتیجه منجر به خسارات قابل توجهی بر عملکرد محصول شوند. در سال‌های اخیر، سیلیکون به عنوان یکی از مفیدترین عناصر معدنی جهت افزایش تحمل به تنش‌های مختلف در گیاهان زراعی از جمله برنج شناخته شده است. برنج نسبت به سایر غلات از توانایی بیشتری برای جذب و انباشت سیلیکون برخوردار است. جذب و تجمع سیلیکون در برنج تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله ژنتیک، نوع و

نیترژن، استفاده از Si می‌تواند موجب افزایش جذب نیترژن توسط برنج و در نتیجه بهبود رشد و عملکرد گیاه شود (Ali *et al.*, 2020). نتایج پژوهشی نشان داد که محلول‌پاشی Si در شرایط کمبود نیترژن، عملکرد دانه برنج را به میزان ۱۹ درصد افزایش داد (Chaiwong & Prom-u-thai, 2022). Si همچنین بر میزان فراهمی فسفر در خاک تأثیرگذار است. کاربرد Si می‌تواند با کاهش فراهمی آهن و منگنز و افزایش غلظت فسفر محلول، باعث افزایش فراهمی فسفر در خاک و در نتیجه افزایش جذب آن توسط گیاه برنج شود (Hu *et al.*, 2020). در شرایط کمبود پتاسیم، میزان تحمل گیاه به تنش آبی و مقاومت در برابر عوامل بیماری‌زا و حشرات کاهش می‌یابد. کاربرد Si می‌تواند رشد و عملکرد گیاه را در شرایط کمبود پتاسیم افزایش دهد (Hasanuzzaman *et al.*, 2018). گزارش شده که استفاده از کود Si باعث افزایش پتاسیم قابل دسترس در خاک و در نتیجه افزایش جذب آن توسط برنج شد (Pati *et al.*, 2016). همچنین، Si از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی غشاء می‌تواند موجب بهبود وضعیت پتاسیم در گیاه شود (Miao *et al.*, 2010).

اثرات مفید Si تحت شرایط کمبود و غلظت بیش از حد روی در برنج مشاهده شده است (Anwaar *et al.*, 2015). گزارش شد که کاربرد Si به میزان ۵۰ میکروگرم بر لیتر، وزن خشک کاه و عملکرد دانه برنج را در شرایط کمبود روی افزایش داد که این امر با افزایش غلظت روی

این، استفاده از سیلیکون می‌تواند باعث افزایش مقاومت برنج در برابر تنش دماهای بالا و پایین شود. نتایج همچنین بیانگر بهبود مقاومت به خوابیدگی در برنج با کاربرد سیلیکون می‌باشد که دلیل این امر به افزایش استحکام دیواره‌های سلولی، تشکیل لایه دوگانه کوتیکول در سلول‌های اپیدرمی و در نتیجه افزایش ضخامت ساقه نسبت داده شده است. سیلیکون بر تعادل مواد مغذی و میزان نیتروژن، فسفر و پتاسیم قابل دسترس برای برنج مؤثر می‌باشد. اثرات مثبت سیلیکون بر کمبود و سمیت آهن و روی نیز در برنج مشاهده شده است. در مجموع، نتایج این بررسی نشان‌دهنده اهمیت سیلیکون در ایجاد تحمل به تنش‌های زیستی و غیرزیستی در برنج و لزوم کاربرد آن برای تولید پایدار این محصول استراتژیک می‌باشد. با این حال، درک بهتر سازوکارهای مولکولی و سلولی تحمل به تنش ناشی از کاربرد سیلیکون و ارتباط متقابل آن با سایر مسیرهای تحمل به تنش در گیاه برنج، می‌تواند موجب بهبود عملکرد محصول در طیف وسیعی از تنش‌های زیستی و غیرزیستی شود.

pH خاک، دما، آب و میزان مواد مغذی قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد که کاربرد سیلیکون باعث افزایش مقاومت برنج در برابر آفاتمانند زنجبرک سبز، کرم ساقه‌خوار، کرم سبز برگ‌خوار و بیماری‌هایی مانند بلاست، سوختگی غلاف و لکه قهوه‌ای می‌شود. رسوب سیلیکون در زیر لایه کوتیکول به عنوان یک مانع فیزیکی برای تغذیه حشرات و ورود عوامل بیماری‌زا، عمل می‌کند. همچنین، سیلیکون با افزایش تولید و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و افزایش تولید فنول‌ها و فیتوالکسین‌ها، در برابر آفات و عوامل بیماری‌زا مقاومت بیوشیمیایی ایجاد می‌کند.

استفاده از سیلیکون می‌تواند موجب بهبود ویژگی‌های ریشه، افزایش جذب آب و در نتیجه افزایش تحمل به تنش خشکی در برنج شود. سیلیکون با تنظیم پتانسیل اسمزی، کاهش جذب سدیم، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز و کاهش تجمع پراکسید هیدروژن و سدیم، موجب بهبود تحمل به شوری در برنج می‌شود. سیلیکون از طریق سازوکارهای تحمل و اجتناب، سمیت فلزات سنگین مانند کادمیوم و آرسنیک را در برنج کاهش می‌دهد. علاوه بر

## References

- Ahire, M.L., Mundada P.S., Nikam T.D., Bapat V.A., & Penna S. 2021. Multifaceted roles of silicon in mitigating environmental stresses in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 169, 291-310. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.11.010>
- Ahmad, A., Aslam, Z., Naz, M., Hussain, S., Javed, T., Aslam, S., Raza, A., Ali, H.M., Siddiqui, M.H., Salem, M.Z.M., Hano, C., Shabbir, R., Ahmar, S., Saeed, T., & Jamal, M.A. 2021. Exogenous salicylic acid-induced drought stress tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown under hydroponic culture. *PLoS One*, 16(12), e0260556. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260556>

- Alamri, S., Hu, Y., Mukherjee, S., Aftab, T., Fahad, S., Raza, A., Ahmad, M., & Siddiqui, M.H. 2020. Silicon- induced postponement of leaf senescence is accompanied by modulation of antioxidative defense and ion homeostasis in mustard (*Brassica juncea*) seedlings exposed to salinity and drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 157, 47-59. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.09.038>
- Alhousari, F., & Greger, M. 2018. Silicon and mechanisms of plant resistance to insect pests. *Plants*, 7(2), 33. <https://doi.org/10.3390/plants7020033>
- Ali, N., Rethore, E., Yvin, J.C., & Hosseini, S.A. 2020. The regulatory role of silicon in mitigating plant nutritional stresses. *Plants*, 9(12), 1779. <https://doi.org/10.3390/plants9121779>
- Ali, M., Afzal, S., Parveen, A., Kamran, M., Javed, M.R., Abbasi, G.H., Malik, Z., Riaz, M., Ahmad, S., Chattha, M.S., Ali, M., Ali, Q., Uddin, M.Z., Rizwan, M., & Ali, S. 2021. Silicon mediated improvement in the growth and ion homeostasis by decreasing Na<sup>+</sup> uptake in maize (*Zea mays* L.) cultivars exposed to salinity stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158, 208-218. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.10.040>
- Anwaar, S.A., Ali, S., Ali, S., Ishaque, W., Farid, M., Farooq, M.A., Najeeb, U., Abbas, F., & Sharif, M. 2015. Silicon (Si) alleviates cotton (*Gossypium hirsutum* L.) from zinc (Zn) toxicity stress by limiting Zn uptake and oxidative damage. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(5), 3441-3450. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3938-9>
- Ashokan, A., Anand, S., Aparna, B., & Mini, V. 2023. Silicon uptake mechanism and its multidimensional influences on stress mitigation in rice (*Oryza Sativa* L.). *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(4), 16-24. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i42793>
- Ashtiani, F.A., Kadir, J.B., Nasehi, A., Rahaghi, S.R., & Sajili, M.H. 2012. Effect of silicon on rice blast disease. *Pertanika journal of tropical agricultural science*, 35, 1-12.
- Biswas, A., Pal, S., & Paul, S. 2023. Silicon as a powerful element for mitigation of cadmium stress in rice: A review for global food safety. *Plant Stress*, 10, 100237. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100237>
- Boorboori, M.R., Lin, W., & Fang, C. 2023. Comparison of Japonica and Indica rice (Wild type and Lsi1 transgenic) in the use of silicon in reducing arsenic toxicity. *Silicon*, 15, 6199-6214. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02485-5>
- Cassol, J.C., Sponchiado, D., Dornelles, S.H.B., Tabaldi, L.A., Barreto, E.P.M., Pivetta, M., & Lopes, S.J. 2021. Silicon as an attenuator of drought stress in plants of *Oryza sativa* L. treated with dietho- late. *Brazilian Journal of Biology*, 81, 1061-1072. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.235052>
- Camargo, M.S., & Keeping, M.G. 2021. Silicon in sugarcane: availability in soil, fertilization, and uptake. *Silicon*, 13(6), 3691-3701. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00935-y>
- Chaiwong, N., Prom-u-thai, C., Bouain, N., Lacombe, B., & Rouached, H. 2018. Individual versus combinatorial effects of silicon, phosphate, and iron deficiency on the growth of lowland and upland rice varieties. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(3), 899. <https://doi.org/10.3390/ijms19030899>
- Chaiwong, N., Bouain, N., Prom -u-thai, C., & Rouached, H. 2020. Interplay between silicon and iron signaling pathways to regulate silicon transporter Lsi1 expression in rice. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1065. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01065>
- Chaiwong, N., & Prom-u-thai, C. 2022. Significant Roles of Silicon for Improving Crop Productivity and Factors Affecting Silicon Uptake and Accumulation in Rice: a Review.

- Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 22, 1970-1982. <http://dx.doi.org/10.1007/s42729-022-00787-y>
- Chalanika De Silva, H.C., & Asaeda, T. 2017. Effects of heat stress on growth, photosynthetic pigments, oxidative damage and competitive capacity of three submerged macrophytes. *Journal of Plant Interactions*, 12(1), 228-236. <https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1322153>
- Chen, R., Zhang, C., Zhao, Y., Huang, Y., & Liu, Z. 2018. Foliar application with nano-silicon reduced cadmium accumulation in grains by inhibiting cadmium translocation in rice plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 2361-2368. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0681-z>
- 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 absorption. *Biological Trace Element Research*, 142(1), 67-76. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8742-x>
- Coskun, D., Deshmukh, R., Sonah, H., Menzies, J.G., Reynolds, O., Ma, J.F., Kronzucker, H.J., & Belanger, R.R. 2019. In defence of the selective transport and role of silicon in plants. *New Phytologist*, 223(2), 514-516. <https://doi.org/10.1111/nph.15764>
- Crooks, R., & Prentice, P. 2017. Extensive investigation into field-based responses to a silica fertilizer. *Silicon*, 9, 301-304. <http://dx.doi.org/10.1007/s12633-015-9379-3>
- Dass, A., Shekhawat, K., Choudhary, A.K., Sepat, S., Rathore, S.S., Mahajan, G., & Chouhan, B.S. 2017. Weed management in rice using crop competitions-a review. *Crop Protection*, 95, 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.08.005>
- Das, P., Manna, I., Biswas, A.K., & Bandyopadhyay, M. 2018. Exogenous silicon alters ascorbate-glutathione cycle in two salt-stressed indica rice cultivars (MTU 1010 and Nonabokra). *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 26625-26642. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2659-x>
- Datnoff, L.E., Seebold, K.W., & Correa, F.J. 2001. The use of silicon for integrated disease management: reducing fungicide applications and enhancing host plant resistance. *Studies in Plant Science*, 8, 171-184. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80014-8](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80014-8)
- Debona, D., Rodrigues, F.A., & Datnoff, L.E. 2017. Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. *Annual Review of Phytopathology*, 55, 85-107. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035312>
- Devanna, B.N., Mandlik, R., Raturi, G., Sudhakaran, S.S., Sharma, Y., Sharma, S., Rana, N., Bansal, R., Barvkar, V., Tripathi, D.K., Shivaraj, S.M., & Deshmukh, R. 2021. Versatile role of silicon in cereals: health benefits, uptake mechanism, and evolution. *Plant Physiology and Biochemistry*, 165, 173-186. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.060>
- Dhiman, P., Rajora, N., Bhardwaj, S., Sudhakaran, S.S., Kumar, A., Raturi, G., Chakraborty, K., Gupta, O.P., Devanna, B.N., Tripathi, D.K., & Deshmukh, R. 2021. Fascinating role of silicon to combat salinity stress in plants: An updated overview. *Plant Physiology and Biochemistry*, 162, 110-123. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.023>
- Dorairaj, D., Ismail, M.R., Sinniah, U.R., & Kar Ban, T. 2017. Influence of silicon on growth, yield, and lodging resistance of MR219, a lowland rice of Malaysia. *Journal of Plant Nutrition*, 40, 1111-1124. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1264420>
- Dorjee, L., & Wangmu, T. 2023. Role of silicon in inducing fungal disease resistance in rice. *The Science World*, 3(11), 2817-2824. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10072950>
- 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(3), 464. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030464>

- El Moukhtari, A., Carol, P., Mouradi, M., Savoure, A., & Farissi, M. 2021. Silicon improves physiological, biochemical, and morphological adaptations of alfalfa (*Medicago sativa* L.) during salinity stress. *Symbiosis*, 85, 305-324. <https://dx.doi.org/10.1007/s13199-021-00814-z>
- El-Okkiah, S.A.F., El-Afry, M.M., Shehab Eldeen, S.A., El-Tahan, A.M., Ibrahim, O.M., Negm, M.M., Alnafissa, M., El-Saadony, M.T., Almazrouei, H.M.R.S., AbuQamar, S.F., El-Tarabily, K.A., & Selim, D.A. 2022. Foliar spray of silica improved water stress tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Frontiers in Plant Science*, 13, 935090. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.935090>
- Eremina, M., Rozhon, W., & Poppenberger, B. 2016. Hormonal control of cold stress responses in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 73(4), 797-810. <https://doi.org/10.1007/s00018-015-2089-6>
- Etesami, H., & Jeong, B.R. 2018. Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147, 881-896. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.063>
- Faisal, S., Callis, K.L., Slot, M., & Kitajima, K. 2012. Transpiration-dependent passive silica accumulation in cucumber (*Cucumis sativus*) under varying soil silicon availability. *Botany*, 90(10), 1058-1064. <https://doi.org/10.1139/b2012-072>
- Fallah, A. 2012. Silicon effect on lodging parameters of rice plants under hydroponic culture. *International Journal of AgriScience*, 2(7), 630- 634.
- Fu, Y.Q., Shen, H., Wu, D.M., & Cai, K.Z. 2012. Silicon-mediated amelioration of Fe<sup>2+</sup> toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) roots. *Pedosphere*, 22(6), 795-802. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60065-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60065-4)
- Gaur, S., Kumar, J., Kumar, D., Chauhan, D.K., Prasad, S.M., & Srivastava, P.K. 2020. Fascinating impact of silicon and silicon transporters in plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 202, 110885. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110885>
- Gong, H.J., Randall, D.P., & Flowers, T.J. 2006. Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by reducing bypass flow. *Plant, Cell & Environment*, 29, 1970-1979. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01572.x>
- Guo, W., Zhang, J., Teng, M., & Wang, L.H. 2009. Arsenic uptake is suppressed in a rice mutant defective in silicon uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 172, 867-874. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900060>
- Gupta, B.K., Sahoo, K.K., Anwar, K., Nongpiur, R.C., Deshmukh, R., Pareek, A., Singla-Pareek, S.L. 2021. Silicon nutrition stimulates Salt-Overly Sensitive (SOS) pathway to enhance salinity stress tolerance and yield in rice. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 593-604. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.010>
- Haider, S., Iqbal, J., Naseer, S., Yaseen, T., Shaukat, M., Bibi, H., Ahmad, Y., Daud, H., Abbasi, N.L., & Mahmood, T. 2021. Molecular mechanisms of plant tolerance to heat stress: current landscape and future perspectives. *Plant Cell Reports*, 40(12), 2247-2271. <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02696-3>
- Han, W., Jia, J., Hu, Y., Liu, J., Guo, J., Shi, Y., Huo, H., & Gong, H. 2021. Maintenance of root water uptake contributes to salt-tolerance of a wild tomato species under salt stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(2), 205-217. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1720911>
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M.H.M.B., Nahar, K., Hossain, M.S., Mahmud, J.A., Hossen, M.S., Masud, A.A.C., & Moumita, F.M. 2018. Potassium: a vital regulator of plant

- responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy*, 8(3), 31. <https://doi.org/10.3390/agronomy8030031>
- Hu, J., Li, Y., & Jeong, B.R. 2020. Silicon alleviates temperature stresses in poinsettia by regulating stomata, photosynthesis, and oxidative damages. *Agronomy*, 10(9), 1419. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091419>
- Huang, S., & Ma, J.F. 2020. Silicon suppresses zinc uptake through down-regulating zinc transporter gene in rice. *Physiologia Plantarum*, 170(4), 580-591. <https://doi.org/10.1111/ppl.13196>
- Islam, W., Tayyab, M., Khalil, F., Hua, Z., Huang, Z., & Chen, H.Y.H. 2020. Silicon-mediated plant defense against pathogens and insect pests. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 168, 104641. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104641>
- Jawahar, S., Jain, N., Suseendran, K., Kalaiyarasan, C., & Kanagarajan, R. 2015. Effect of silicol granules on silicon uptake stem borer and leaf folder incidence in rice. *International Journal of Current Research and Academic Review*, 3(5), 168-174.
- Jiang, H., Jiang, Z., Zhang, H., Li, Y., Li, W., Gao, K., Ma, X., Wang, G., Wei, X., & Wu, Z. 2025. Silicon nutrition improves lodging resistance of rice under dry cultivation. *Plants*, 14(3), 361. <https://doi.org/10.3390/plants14030361>
- Jiang, N.H., & Zhang, S.H. 2021. Effects of combined application of potassium silicate and salicylic acid on the defense response of hydroponically grown tomato plants to *ralstonia solanacearum* infection. *Sustainability*, 13(7), 3750. <https://doi.org/10.3390/su13073750>
- Jia-Wen, W.U., Yu, S.H.I., Yong-Xing, Z.H.U., Yi-Chao, W.A., & Hai-Jun, G.O. 2013. Mechanisms of enhanced heavy metal tolerance in plants by silicon: a review. *Pedosphere*, 23(6), 815-825. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60073-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60073-9)
- Jinger, D., Dhar, S., Dass, A., Sharma, V.K., Shukla, L., Parihar, M., Rana, K., Gupta, G., Jatav, H.S. 2020. Crop productivity, grain quality, water use efficiency, and soil enzyme activity as influenced by silicon and phosphorus application in aerobic rice (*Oryza sativa*). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51, 2147-2162. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1812629>
- Katz, O. 2018. Plant silicon and phytolith research and the earth-life super discipline. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1281. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01281>
- Katz, O., Puppe, D., Kaczorek, D., Prakash, N.B., & Schaller, J. 2021. Silicon in the Soil-Plant Continuum: Intricate Feedback Mechanisms within Ecosystems. *Plants*, 10(4), 652. <https://doi.org/10.3390/plants10040652>
- Khan, A., Khan, A.L., Imran, M., Asaf, S., Kim, Y-H., Bilal, S., Numan, M., Al-Harrasi, A., Al-Rawahi, A., & Lee, I-J. 2020. Silicon-induced thermotolerance in *Solanum lycopersicum* L. via activation of antioxidant system, heat shock proteins, and endogenous phytohormones. *BMC Plant Biology*, 20, 248. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02456-7>
- Kim, Y.H., Khan, A.L., Hamayun, M., & Kang, S.M. 2011. Influence of short-term silicon application on endogenous phytohormonal levels of *Oriza sativa* L. under wounding stress. *Biological Trace Element Research*, 144, 1175-1185. <https://doi.org/10.1007/s12011-011-9047-4>
- Kim, Y.H., Waqas, M., & Kamran, M. 2012. Silicon treatment to rice (*Oryza sativa* L. cv. 'gopumbyeo') plants during different growth periods and its effects on growth and grain yield. *Pakistan Journal of Botany*, 44, 891-897.

- Kim, Y., Chung, Y.S., Lee, E., Tripathi, P., Heo, S., & Kim, K.H. 2020. Root response to drought stress in rice (*Oryza sativa* L.). *International Journal of Molecular Sciences*, 21(4), 1513. <https://doi.org/10.3390/ijms21041513>
- Lee, Y.B., & Kim, P.J. 2007. Reduction of phosphate adsorption by ion competition with silicate in soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 26, 286-293. <http://dx.doi.org/10.5338/KJEA.2007.26.4.286>
- Lekklar, C., Chadchawan, S., Boon-Long, P., Pfeiffer, W., & Chaidee, A. 2019. Salt stress in rice: multivariate analysis separates four components of beneficial silicon action. *Protoplasma*, 256(2), 331-347. <https://doi.org/10.1007/s00709-018-1293-2>
- Leroy, N., Tombeur, F., Walgraffe, Y., Cornelis, J.T., & Verheggen, F.J. 2019. Silicon and plant natural defenses against insect pests: Impact on plant volatile organic compounds and cascade effects on multitrophic interactions. *Plants*, 8(11), 444. <https://doi.org/10.3390/plants8110444>
- Liang, Y., Chen, Q., Liu, Q., Zhang, W., & Ding, R. 2003. Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Plant Physiology*, 160(10), 1157-1164. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-01065>
- Li, L., Ai, S., Li, Y., Wang, Y., & Tang, M. 2017. Exogenous silicon mediates alleviation of cadmium stress by promoting photosynthetic activity and activities of antioxidative enzymes in rice. *Journal of Plant Growth Regulation*, 37, 602-611. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01061>
- Limmer, M.A., Linam, F.A., & Seyfferth, A.L. 2023. The effect of rice residue management on rice paddy Si, Fe, As, and methane biogeochemistry. *Science of the Total Environment*, 903, 166496. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166496>
- Ma, J.F., Yamaji, N., Tamai, K., & Mitani, N. 2007. Genotypic difference in silicon uptake and expression of silicon transporter genes in rice. *Plant Physiology*, 145(3), 919-924. <https://doi.org/10.1104/pp.107.107599>
- Malik, M.A., Wani, A.H., Mir, S.H., Rehman, I.U., Tahir, I., Ahmad, P., & Rashid, I. 2021. Elucidating the role of silicon in drought stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 165, 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.021>
- Malav, U.K., Ramani, V.P., Sajid, M., & Patel, K.C. 2016. Yield and nutrient content of rice as influenced by silicon and nitrogen application. *Annals of Plant and Soil Research*, 18(4), 413-417.
- Marxen, A., Klotzbücher, T., Jahn, R., Kaiser, K., Nguyen, V.S., Schmidt, A., Schadler, M., & Vetterlein, D. 2016. Interaction between silicon cycling and straw decomposition in a silicon deficient rice production system. *Plant and Soil*, 398, 153-163. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2645-8>
- Mehrabanjoubani, P., Abdolzadeh, A., Sadeghipour, H.R., & Aghdasi, M. 2015. Impacts of silicon nutrition on growth and nutrient status of rice plants grown under varying zinc regimes. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 27(1), 19-29. <https://doi.org/10.1007/s40626-014-0028-9>
- Meharg, C., & Meharg, A.A. 2015. Silicon the silver bullet for mitigating biotic and abiotic stress and improving grain quality in rice. *Environmental and Experimental Botany*, 120, 8-17. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.07.001>
- Miao, B.H., Han, X.G., & Zhang, W.H. 2010. The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. *Annals of Botany*, 105, 967-973. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq063>

- Mihara, C., Chang, X., Sugiura, Y., Makabe-Sasaki, S., & Watanabe, A. 2017. Relationship between plant-available silicon and reducible iron in irrigated paddy soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, 63(1), 67-74. <https://doi.org/10.1080/00380768.2016.1278560>
- Minden, V., Schaller, J., & Olde Venterink, H. 2021. Plants increase silicon content as a response to nitrogen or phosphorus limitation: a case study with *Holcus lanatus*. *Plant and Soil*, 462, 95-108. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04667-1>
- Mir, R.A., Bhat, B.A., Yousuf, H., Islam, S.T., Raza, A., Rizvi, M.A., Charagh, S., Albaqami, M., Sofi, P.A., & Zargar, S.M. 2022. Multidimensional role of silicon to activate resilient plant growth and to mitigate abiotic stress. *Frontiers in Plant Science*, 13, 819658. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.819658>
- Munns, R., & Gilliam, M.J. 2015. Salinity tolerance of crops—what is the cost. *New Phytologist*, 208(3), 668-673. <https://doi.org/10.1111/nph.13519>
- Pan, T., Zhang, J., He, L., Hafeez, A., Ning, C., & Cai, K. 2021. Silicon enhances plant resistance of rice against submergence stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 10(4), 767-779. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.04.018>
- Pati, S., Pal, B., Badole, S., Hazra, G.C., & Mandal, B. 2016. Effect of silicon fertilization on growth, yield, and nutrient uptake of rice. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(3), 284-290. <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1122797>
- Phonde, D.B., Deshmukh, P.S., Banerjee, K., & Adsule, P.G. 2014. Plant available silicon in sugarcane soils and its relationship with soil properties, leaf silicon and cane yield. *Asian Journal of Crop, Soil Science and Plant Nutrition*, 9, 176-180. <http://dx.doi.org/10.15740/HAS/AJSS/9.2/176-180>
- Rao, G.B., & Susmitha, P. 2017. Silicon uptake, transportation and accumulation in Rice. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(6), 290-293.
- Ranjan, A., Sinha, R., Bala, M., Pareek, A., Singla-Pareek, S.L., & Singh, A.K. 2021. Silicon-mediated abiotic and biotic stress mitigation in plants: Underlying mechanisms and potential for stress resilient agriculture. *Plant Physiology and Biochemistry*, 163, 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.044>
- Rastogi, A., Yadav, S., Hussain, S., Kataria, S., Hajhashemi, S., Kumari, P., Yang, X., & Brestic, M. 2021. Does silicon really matter for the photosynthetic machinery in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 169, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.11.004>
- Reynolds, O.L., Padula, M.P., Zeng, R., & Gurr, G.M. 2016. Silicon: potential to promote direct and indirect effects on plant defense against arthropod pests in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 7, 744. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00744>
- Saha, G., Mostofa, M.G., Rahman, M.M., & Tran, L.S. P. 2021. Silicon-mediated heat tolerance in higher plants: a molecular outlook. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 341-347. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.05.051>
- Sahrawat, K.L. 2012. Soil fertility in flooded and non-flooded irrigated rice systems. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58(4), 423-436. <https://doi.org/10.1080/03650340.2010.522993>
- Sandhya, K., & Prakash, N.B. 2019. Bioavailability of silicon from different sources and its effect on the yield of rice in acidic, neutral, and alkaline soils of Karnataka, South India. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(3), 295-306. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1563096>
- Sattar, A., Sher, A., Ijaz, M., Ul-Allah, S., Butt, M., Irfan, M., Rizwan, M.S., Ali, H., & Cheema, M.A. 2020. Interactive effect of biochar and silicon on improving morpho-

- physiological and biochemical attributes of maize by reducing drought hazards. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(4), 1819-1826. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00253-7>
- Shaker Kouhi, S., & Rabiee, M. 2024. Effect of intercropping on the Cd accumulation in soil and rice plants: A review. *Journal of Environmental Health Engineering*, 11(3), 287-301. [In Persian].
- Sirisuntornlak, N., Ullah, H., Sonjaroon, W., Anusontpornperm, S., Arirob, W., & Datta, A. 2021. Interactive effects of silicon and soil pH on growth, yield and nutrient uptake of maize. *Silicon*, 13, 289-299. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00427-z>
- Sivanesan, I., Son, M.S., Soundararajan, P., & Jeong, B.R. 2014. Effect of silicon on growth and temperature stress tolerance of *nephrolepis exaltata* Corditas. *Horticultural Science and Technology*, 32(2), 142-148. <http://dx.doi.org/10.7235/hort.2014.13080>
- Song, A., Xue, G., Cui, P., Fan, F., Liu, H., Yin, C., Sun, W., & Liang, Y. 2016. The role of silicon in enhancing resistance to bacterial blight of hydroponic- and soil-cultured rice. *Scientific Reports*, 6(1), 24640. <http://dx.doi.org/10.1038/srep24640>
- Song, X.P., Verma, K.K., Tian, D.D., Zhang, X.Q., Liang, Y.J., Huang, X., Li, C.N., & Li, Y.R. 2021. Exploration of silicon functions to integrate with biotic stress tolerance and crop improvement. *Biological Research*, 54, 19. <http://dx.doi.org/10.1186/s40659-021-00344-4>
- Szulc, W., Rutkowska, B., Hoch, M., Ptasinski, D., & Kazberuk, W. 2019. Plant available silicon in differentiated fertilizing conditions. *Plant, Soil and Environment*, 65(5), 233-237. <http://dx.doi.org/10.17221/99/2019-PSE>
- Tavakkoli, E., Lyons, G., English, P., & Guppy, C.N. 2011. Silicon nutrition of rice is affected by soil pH, weathering and silicon fertilisation. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 174(3), 437-446. <https://doi.org/10.1002/jpln.201000023>
- Talukdar, P., Hartley, S.E., Travis, A.J., Price, A.H., & Norton, G.J. 2019. Genotypic differences in shoot silicon concentration and the impact on grain arsenic concentration in rice. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 182(2), 265-276. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800373>
- Thorne, S.J., Hartley, S.E., & Maathuis, F.J. 2020. Is silicon a panacea for alleviating drought and salt stress in crops. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1221. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01221>
- Tripathi, P., Tripathi, R.D., Pratap, S.R., Dwivedi, S., Goutam, D., Shri, M., Trivedi, P.K & Chakrabarty, D. 2013. Silicon mediates arsenic tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) through lowering of arsenic uptake and improved antioxidant defence system. *Ecological Engineering*, 52, 96-103. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.057>
- Van Bockhaven, J., Spíchal, L., Novák, O., Strnad, M., Asano, T., Kikuchi, S., H'ofte, M., & De Vleeschauwer, D. 2015. Silicon induces resistance to the brown spot fungus *Cochliobolus miyabeanus* by preventing the pathogen from hijacking the rice ethylene pathway. *New Phytologist*, 206(2), 761-773. <https://doi.org/10.1111/nph.13270>
- Vanlerberghe, G.C., Martyn, G.D., & Dahal, K. 2016. Alternative oxidase: a respiratory electron transport chain pathway essential for maintaining photosynthetic performance during drought stress. *Physiologia Plantarum*, 157, 322- 337. <https://doi.org/10.1111/pp1.12451>
- Verma, K.K., Song, X.P., Tian, D.D., Guo, D.J., Chen, Z.L., Zhong, C.S., Nikpay, A., Singh, M., Rajput, V.D., Singh, R.K., Minkina, T., & Li, Y.R. 2021. Influence of silicon on

- biocontrol strategies to manage biotic stress for crop protection, performance, and improvement. *Plants*, 10(10), 2163. <https://doi.org/10.3390/plants10102163>
- Verma, K.K., Song, X.P., Singh, M., Tian, D.D., Rajput, V.D., Minkina, T., & Li, Y.R. 2023. Association of silicon and soil microorganisms induces stress mitigation, increasing plant productivity. *Benefits of Silicon in the Nutrition of Plants*, 299–328. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-26673-7\\_17](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-26673-7_17)
- Verma, K.K., Song, X.P., Liang, Q., Huang, H.R., Bhatt, R., Xu, L., Chen, G.L., & Li, Y.R., 2024. Unlocking the role of silicon against biotic stress in plants. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1430804. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1430804>
- Wang, M., Gao, L., Dong, S., Sun, Y., Shen, Q., & Guo, S. 2017. Role of silicon on plant-pathogen interactions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 701. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00701>
- Wu, C., Zou, Q., Xue, S., Mo, J., Pan, W., Lou, L., & Wong, M.H. 2015. Effects of silicon (Si) on arsenic (As) accumulation and speciation in rice (*Oryza sativa* L.) genotypes with different radial oxygen loss (ROL). *Chemosphere*, 138, 447-453. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.081>
- Wu, Q.S., Wan, X.Y., Su, N., Cheng, Z.J., Wang, J.K., Lei, C.L., Zhang, X., Jiang, L., Ma, J.F., & Wan, J.M. 2006. Genetic dissection of silicon uptake ability in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Science*, 171(4), 441-448. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2006.05.001>
- Wu, Z., Liu, S., Zhao, J., Wang, F., Du, Y., Zou, S., Li, H., Wen, D., & Huang, Y. 2017. Comparative responses to silicon and selenium in relation to antioxidant enzyme system and the glutathione-ascorbate cycle in flowering Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis*) under cadmium stress. *Environmental and Experimental Botany*, 133, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.09.005>
- Yamaji, N., Sakurai, G., Mitani-Ueno, N., & Ma, J.F. 2015. Orchestration of three transporters and distinct vascular structures in node for intervacular transfer of silicon in rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 112(36), 11401-11406. <https://doi.org/10.1073/pnas.1508987112>
- Yan, G., Fan, X., Peng, M., Yin, C., Xiao, Z., & Liang, Y. 2020. Silicon improves rice salinity resistance by alleviating ionic toxicity and osmotic constraint in an organ-specific pattern. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1-12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00260>
- Ye, M., Song, Y., Long, J., Wang, R., Baerson, S.R., Pan, Z., Zhu-Salzman, K., Xie, J., Cai, K., Luo, S., & Zeng, R. 2013. Priming of jasmonate-mediated antiherbivore defense responses in rice by silicon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A*, 110(38), 3631-3639. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305848110>
- Zhao, D.Q., Xu, C., Luan, Y.T., Shi, W.B., Tang, Y.H., & Tao, J. 2021. Silicon enhances stem strength by promoting lignin accumulation in herbaceous peony (*Paeonia lactiflora* Pall.). *International Journal of Biological Macromolecules*, 190, 769-779. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.016>
- Zhou, T.Y., Cui, R.L., Shu, C.C., Zhu, K.Y., Zhang, W.Y., Zhang, H., Liu, L.J., Wang, Z.Q., Gu, J.F., & Yang, J.C. 2024. Combining urea and controlled release nitrogen fertilizer to enhance lodging resistance of rice (*Oryza sativa* L.) by altering accumulation of silicon and cell wall polymers at high yielding levels. *Field Crops Research*, 315, 109459. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109459>
- Zhu, Y.X., Gong, H.J., & Yin, J.L. 2019. Role of silicon in mediating salt tolerance in plants: A Review. *Plants*, 8(6), 147. <https://doi.org/10.3390/plants8060147>

