مجله ایمنی زیستی
دوره ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹
ISSN 2716-9804 الکترونیکی، ISSN 2717-0632 چاپی

سیلیسیم و نانوذرات سیلیکا: مکانیسم جذب و انتقال در گیاهان و اثرات آن‌ها بر عملکرد گیاهان

طاهره رئیسی اردلی[۱،۲]، لیلا سلیمانپور[۱،۳]، مصطفی چرم[۲] و لیلا مأمنی[۱*]

۱- بخش نانوتکنولوژی، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی (ABRII)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی(AREEO)، البرز، ایران
۲- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳- گروه زراعت و اصلاح نبات، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران ایران
leila.mamani@abrii.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۲/۱۳، تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۲۰
صفحه ۹۴-۷۷

چکیده

سیلیسیم (Si) یکی از عناصر مفید برای رشد بسیاری از گونه‌های گیاهی است که باعث افزایش مقاومت گیاه در برابر انواع تنش‌های زیستی و غیرزیستی می‌شود. کاربرد نانوذرات سیلیکونی (SiNPs) در کشاورزی، علی‌رغم مزایای بسیار کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. این نانوذرات با ورود به گیاهان بر فعالیت‌های متابولیکی گیاه تاثیر می‌گذارند. نانوذرات سیلیکایی به دلیل ماهیت حفره‌ای که دارند، حامل‌های مناسبی برای مولکول‌های مختلف در کشاورزی هستند. گروه بزرگی از پروتئین‌ها و ژن‌ها باعث انتقال سیلیسیم در گیاه می‌شوند. *Lsi1* (Lower silicon transprter 1) و *Lsi2* (Lower silicon transprter 2) دو نوع انتقال‌دهنده سیلیسیم هستند که در جذب و توزیع سیلیسیم دخیل هستند. شناسایی این ناقل‌ها، مسیر جذب سیلیسیم از سطح ریشه و انتقال آن به اندام‌های هوایی را مشخص کرده است، اما هنوز ناقل‌های درگیر در جذب سیلیسیم در آوند چوبی به‌طور کامل شناسایی نشده‌اند. همچنین فرایند انتقال سیلیسیم در سلول‌های انباشت‌گر سیلیسیم مشخص نیست. با توجه به اینکه اثرات مفید سیلیسیم در گیاه با میزان تجمع آن در گیاه مرتبط است، بررسی مکانیسم جذب و انتقال سیلیسیم درگیاهان اهمیت زیادی دارد. در این مطالعه فرآیند جذب، انتقال و انباشت سیلیسیم در گیاهان و همچنین اهمیت سیلیسیم و نانوذرات سیلیکا برای محصولات کشاورزی بررسی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تنش، سیلیسیم، نانوفناوری، نانوسیلیکا، *Lsi*.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]

مقدمه

سیلیسیم (Si) یکی از عناصر مفید برای گیاهان است و در خاک و گیاه به فراوانی یافت می‌شود. سیلیسیم با کاهش اثرات مضر بسیاری از تنش‌های زیستی (از جمله آفات حشرات و پاتوژن‌های بیماری‌زا) و غیر زیستی (از جمله، خشکی، شوری، گرما، سرما، سمیت فلزات و عدم تعادل مواد مغذی) باعث افزایش رشد گیاهان می‌شود (Yan et al. 2018). در مطالعات مولکولی اخیر بر روی جذب و انتقال Si، گروه بزرگی از پروتئین‌ها و ژن‌ها با ویژگی‌های خاصی مشخص شده‌اند که باعث انتقال Si از محلول خاک به ریشه و از ریشه به ساقه در گونه‌های مختلف گیاهی می‌شوند (Ma and Yamaji, 2015).

میزان Si در گیاهان از ۱/۰ تا ۱۰ درصد متغیر است. تفاوت در میزان انباشت سیلیسیم در بافت‌ها و گونه‌های گیاهی را می‌توان با سیستم انتقال پیچیده Si توضیح داد (Yan et al. 2018; Rastogi et al. 2019).

سیلیسیم محلول توسط گیاهان به شکل اسید مونوسیلیک جذب می‌شود و در برخی از گیاهان بیش انباشت‌گر، ژن‌های مختلف انتقال‌دهنده Si (مانند *Lsi1*، *Lsi2* و *Lsi6*) به انتقال آن کمک می‌کنند (Rao and Susmitha, 2017).

تغییرات در تکنولوژی کشاورزی یک عامل عمده در شکل‌گیری کشاورزی مدرن بوده است. در زمینه کشاورزی پایدار، استفاده از فناوری نانو تکنولوژی در کشاورزی به‌عنوان یکی از روش‌های مناسب برای افزایش تولید محصول و امنیت غذایی جمعیت جهانی است (Lal, 2008). نانوذرات سنتزی به علت اندازه کوچک، نسبت سطح به حجم بزرگ و انرژی سطحی فراوان، دارای خصوصیات متفاوتی از مواد توده‌ای هم ساختار و اتم‌های تشکیل‌دهنده خود هستند (Liu and Lal, 2015). به‌طور مشابه، مشاهده شده است که نانوذرات سیلیسیمی (Si-NPs) خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوتی نسبت به مواد توده‌ای خود دارند. نانوذرات سیلیسی به دلیل خاصیت منحصر به فرد خود، در کشاورزی از پتانسیل بالایی برخوردار هستند و ممکن است در کاهش تنش‌های مختلف غیرزیستی نسبت به مواد توده‌ای بهتر عمل کنند (Rastogi et al. 2019). علاوه‌بر تأثیر مستقیم Si-NPs بر رشد و نمو گیاهان، این نانو ذرات می‌توانند به‌عنوان نانوآفت‌کش‌ها (Magda and Hussein, 2016; Ziaee and Ganji, 2016) نانوعلف‌کش (Lodriche et al. 2012) و نانوکودها (Janmohammadi et al. 2016) استفاده شوند. Si-NPs همچنین ممکن است به‌عنوان

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]

حامل‌های پروتئین‌ها و نوکلئوتیدها (Torney et al. 2007; Martin-Ortigosa et al. 2014) و سایر مواد شیمیایی موجود در گیاهان به کار روند. نانوزئولیت‌ها (Mirzaei et al. 2014) و نانوسنسورها (Rastogi et al. 2011; Liu et al. 2014)، این نانوذرات را در خود جای داده و می‌توانند در کشاورزی برای افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک و برای پایش مؤثر خاک مورد استفاده قرار گیرند (Rastogi et al. 2019). در این مقاله، یک مرور کلی از سیستم جذب، انتقال، توزیع و تجمع سیلیسیم در گیاهان ارائه و نقش Si و Si-NPs در افزایش محصولات کشاورزی بررسی می‌شود.

سیلیسیم در خاک و گیاه

سیلیسیم دومین عنصر فراوان در سطح زمین و خاک است و تقریباً ۲۸ درصد پوسته زمین را تشکیل می‌دهد. Si به‌طور عمده به شکل سیلیکات‌های اولیه و سیلیکات‌های ثانویه وجود دارد. سیلیکات‌های اولیه بیشتر در قسمت‌های شنی و سیلتی و سیلیکات‌های ثانویه در بخش‌های رسی خاک مشاهده می‌شوند. همچنین شکل‌های غیرکریستالی متفاوتی از سیلیکای آلی و بیوژنی نیز وجود دارد (Cornelis et al. 2011). با این وجود، بیشتر Si در خاک به شکل آلومینوسیلیکات کریستالی نامحلول است که به‌طور مستقیم برای گیاهان قابل دسترس نیست (Liang et al. 2015; Richmond and Sussman, 2003). شکل محلول Si در خاک، اسید مونوسیلیسیک است که می‌تواند توسط ریشه گیاه جذب شود و یک مولکول مونومر بدون بار (H_4SiO_4) در pH: 2 تا ۹ است. غلظت اسید منوسیلیسیک قابل دسترس گیاه از ۱/۰ تا ۶/۰ میلی‌مول بر لیتر در محلول خاک متغیر است (Yan et al. 2018).

سیلیسیم یک عنصر ضروری برای حیوانات و انسان‌ها و یک عنصر مفید برای گیاهان است. اگرچه ضرورت Si برای گیاه هنوز اثبات نشده است، اما اثرات سودمند Si در تقویت رشد گیاه، به ویژه برای گیاهان در شرایط تنش، در هر دو مطالعه آزمایشگاهی و میدانی تأیید شده است. سیلیسیم یک عنصر مورد نیاز در برخی از فعالیت‌های متابولیکی و فیزیولوژیکی در گیاهان است (Yan et al. 2018; Bao-Shan et al. 2004). در بررسی‌های اخیر، اثرات فیزیولوژی Si و تاثیر آن بر افزایش مقاومت گیاهان مورد بررسی قرار گرفته است. کاربرد Si در خاک‌های شور باعث کاهش اثرات مخرب شوری روی گیاهان می‌شود (Xu et al. 2015) تحقیقات نشان می‌دهد که

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]

استفاده از این کود در خاک‌های با کمبود Si می تواند باعث افزایش رشد گیاه شود و مقاومت گیاهان به بیماری، سرما و فلزات سنگین منگنز، آهن، آلومینیوم و مس را تقویت و باعث افزایش فتوسنتز شود. کوددهی Si باعث افزایش جذب پتاسیم شده و جذب سدیم را محدود می‌کند، بنابراین باعث افزایش نسبت پتاسیم به سدیم می‌شود و به تجمع پتاسیم، نیتروژن و گوگرد در گیاهان کمک می‌کند (Bao-Shan et al. 2004).

جذب، احیا و سیستم انتقال سیلیسیم در گیاهان

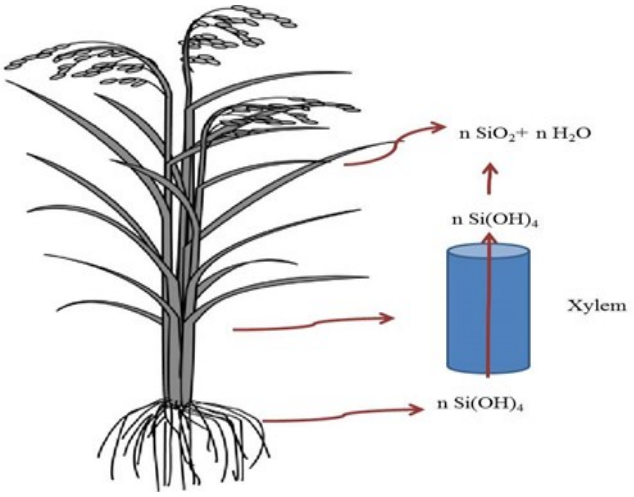
گیاهان باید سیلیسیم (Si) را از محلول خاک به بافت‌های مختلف انتقال دهند اما ریشه گیاه، Si را به صورت سیلیسیک اسید (H_4SiO_4)، جذب می‌کند (Ma and Takahashi, 2002; Knight and Kinrade, 2001). مکانیسم جذب Si بسته به نوع گیاه متفاوت است. H_4SiO_4 در ریشه‌های جانبی به وسیله جذب فعال، غیر فعال و جذب انتخابی انجام می‌شود (Yan et al. 2018; Cornelis et al. 2011). گیاهانی که دارای سیستم جذب فعال Si هستند باعث کاهش قابل توجه Si در خاک می‌شوند، بنابراین غلظت Si را در محلول غذایی کاهش می‌دهند. در حالی که برای گیاهانی که Si را به صورت غیر فعال جذب می‌کنند، غلظت Si در محلول بدون تغییر باقی می‌ماند. در مقابل، گیاهان با نوع جذب انتخابی Si ، تمایل به افزایش غلظت Si در محیط خارجی خود را دارند (Yan et al. 2018). انباشت مقدار زیاد H_4SiO_4 از طریق مکانیسم فعال بیشتر از جریان توده‌ای است که به دلیل تراکم زیاد انتقال‌دهنده‌های Si در ریشه و ساقه، باعث افزایش H_4SiO_4 در داخل غشای سلولی ریشه شده (Mitani and Ma, 2005) و توسط سلول‌های ریشه جذب و در سلول‌های اپیدرمی برگ قرار می‌گیرد. پس از حذف آب، H_4SiO_4 انباشته‌شده در برگ به سیلیکاژل پلیمری ($SiO_2.nH_2O$) تبدیل می‌شود که به‌عنوان فیتولیت شناخته می‌شود شکل (۱) (Tubana et al. 2016). سیلیکا (SiO2) در سلول، در سیتوپلاسم و واکوئل سلول‌های گیاه ذخیره می‌شود در حالی‌که، فیتولیت‌های بین سلول‌ها تقریباً در تمام قسمت‌های گیاه یعنی ریشه، ساقه، برگ، میوه، گل آذین و غیره ذخیره می‌شوند (Nawaz et al. 2019).

سیلیکا که در سلول‌های اپیدرمی برگ ذخیره شده است، بی‌حرکت است و نمی‌تواند به برگ‌های تازه انتقال پیدا کند در حالی‌که اسیدسیلیسیک به وسیله پروتئین‌های غشایی انتقال می‌یابد (Yan et al. 2018). فرآیندهای مولکولی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]

که در جذب و انتقال Si در گیاهان دخیل هستند توسط ناقل‌های مختلفی انجام می‌شود که کارکرد، بیان و مکان سلولی متفاوتی در گیاهان دارند (Deshmukh et al. 2013). این ناقل‌ها فقط در گیاهانی مانند برنج (Yamaji et al. 2008)، ذرت (Mitani et al. 2009)، گندم (Montpetit et al. 2012)، جو (Yamaji et al. 2012)، دم اسب (Grégoire et al. 2012) که Si را در بافت‌های خود تجمع می‌کنند و همچنین کدو (Mitani et all. 2011) و سویا (Deshmukh et al. 2013) شناسایی شده‌اند و مکانیسم‌های جذب و انتقال Si در دیگر گونه‌ها همچنان ناشناخته باقی مانده‌اند. بسیاری از حامل‌ها برای جذب، انتقال و توزیع Si مورد نیاز هستند. اولین حامل سیلیسیم (*OsLsi1*) در گیاهان عالی در برنج در سال ۲۰۰۶ شناسایی شد (Ma et al. 2006). دو نوع مختلف از حامل‌های Si در گونه‌های گیاهی مختلف گزارش شده است که شامل کانال‌ها و حامل‌های خروجی است.



شکل ۱- انتقال سیلیکا (SiO2) از ریشه به برگ.

دو نوع انتقال‌دهنده Si شامل (*Lsi1*) و (*Lsi2*) در جذب و توزیع Si دخیل هستند. کانال معمول انتقال سیلیسیم (*Lsi1*) که انتقال منفذی سیلیسیم را در سراسر غشاء پلاسما، بین محلول خارجی آپوپلاست و سلول‌های گیاهی، تسهیل می‌کند، متعلق به زیرگروه NIP از پروتئین‌های شبه‌آکوپورین (کانال‌های آب) است. NIPها انتقال غیر فعال آب و یا اجسام حل‌شده بدون بار کوچک، مانند گلیسرول، اسید لاکتیک، آمونیاک، اسید بوریک، آرسنیت، سلنیت و اسیدسیلیسیک را

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]

تسهیل می‌کنند (Yan et al. 2018; Wallace and Roberts, 2005; Zhao et al. 2010).

Lsi1 برنج (*OsLsi1*) اولین ژن شناخته‌شده در گیاهان عالی است که مسئول ورود Si از محلول خارجی به سلول‌های ریشه‌ای است و با استفاده از جهش برنج (*lsi1*, *low silicon 1*) در نقص جذب فعال Si ، شناسایی شد (Ma and Takahashi, 2002; Ma et al. 2006).

پس از *OsLsi1*، *Lsi2* برنج (*OsLsi2*) به‌عنوان اولین ژن انتقال‌دهنده خروج Si در یک جهش جدید برنج (*lsi2, low silicon 2*) برای نقص جذب Si شناسایی شد. سپس همولوگ آن از جو (*HvLsi2*)، ذرت (*ZmLsi2*) و کدو تنبل (*CmLsi2*) جداسازی شد. انتقال‌دهنده خروج سیلیسیم (*Lsi2*) مسئول انتقال Si به خارج از سلول‌های گیاهی است. در مقایسه با مکانیزم انتقال غیر فعال *Lsi1*، انتقال Si توسط *Lsi2* یک فرآیند فعال است که توسط شیب پروتون در سراسر غشای پلاسما انجام می‌شود (Ma et al. 2007).

محصول ژن *Lsi2* یک پروتئین غشایی با ۱۱ عبور تراغشایی متعلق به یک ناقل آنیونی است که فاقد هر گونه تشابه با کانال *Lsi1* است. تنها شباهت آنها در انتقال آرسنیت ArsB است که در باکتری‌ها و آرکی‌ها دیده شده است. *Lsi2* همچنین آرسنیت را انتقال می‌دهد و در جذب آرسنیت در برنج دخالت دارد. در برنج، انتقال Si به ساقه توسط ژن *Lsi6* انجام می‌شود (Yan et al. 2018; Mitani and Ma, 2005; Ma et al. 2006).

در جدول ۱ اسامی برخی از ژن‌هایی که در جذب و انتقال Si در گیاهان نقش دارند نشان داده شده است.

جدول۱- برخی از ژن‌های شناسایی‌شده‌ی دخیل در جذب و انتقال سیلیسیم در گیاهان.

نام گونه	ژن‌های شناسایی شده
برنج (*Oryza sativa*)	*OsLsi1* و *OsLsi2*
جو (*Hordeum vulgare*)	*HvLsi1* و *HvLsi2*
ذرت (*Zea Mays*)	*ZmLsi1* و *ZmLsi2*
گندم (*Triticum aestivum*)	*TaLsi1*
کدو تنبل (*Cucurbita moschata*)	*CmLsi1*
سویا (*Glycine max*)	*GmNIP2-1* و *GmNIP2-2*
خیار (*Cucumis sativus*)	*CSiT1*، *CSiT2* و *CsLsi1*
دم اسبی (*Equisetum arvense*)	*EaNIP3-1*، *EaNIP3-3*، *EaNIP3-4*، *EaLsi2-1* و *EaLsi2-2*

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]

OsLsi1 و همولوگ‌های آن که کانال‌های ورودی Si را رمزگذاری می‌کنند، همه به پروتئین اصلی nodulin-26 -like intrinsicprotein: NIP) اختصاص دارند که یک خانواده بزرگ از آکواپورین گیاهی (AQP) است که شش دُمین بین غشایی به‌خوبی حفاظت‌شده دارد. NIP می‌تواند انتقال متقابل آب و یا برخی مولکول‌های بدون بار را تسهیل کند (Yan et al. 2018).

در حالی‌که *Lsi2*، انتقال‌دهنده خروجی Si، متعلق به یک خانواده کانال ناقل آنیونی است، این ناقل‌ها داخل غشای پلاسمایی قرار دارند، اما الگوهای مختلف بیانی در بافت یا مکان‌های سلولی مختلف را نشان می‌دهد که با سطوح مختلف تجمع Si پیوند دارند (Ma and Yamaji, 2015).

علاوه‌بر این، خصوصیات سوبسترای NIPها، به‌طور عمده توسط فیلتر انتخابی آروماتیک/آرژینین (ar/R) که شامل چهار دنباله اسیدآمینه است، محدود شده است. *Lsi1*ها در گونه‌های مختلف گیاهی متعلق به گروه NIP III هستند که با یک فیلتر منحصر به فرد انتخابی شامل Gly (G)، Ser (S)، Gly (G) و Arg (R) مشخص می‌شود (Ma and Yamaji, 2015; Ma, 2010). به‌تازگی کانال‌های سیلیسیم متعلق به یک زیرخانواده APA از (*EaNIP3s*) در دم‌اسبی صحرایی *Equisetum arvense*، شناسایی شده است که یکی از بزرگترین انباشت‌گرهای Si در گیاهان است. *EaNIP3*ها در مقایسه با دیگر ناقل‌های *Lsi1* دارای فیلتر انتخابی متمایز شامل S، Thr (T)، Ala (A) و R هستند. می‌توان گفت که *EaNIP3*؛ در دم اسبیان، کارآمدترین ناقلین شناخته‌شده Si در گیاهان هستند که حتی فعالیت بهتری نسبت به ناقلین برنج دارند (Ma and Yamaji, 2015; Kaur and Greger, 2019).

خصوصیات سلولی هر دو کانال ناقل سیلیسیم *Lsi1* و *Lsi2*، نشان می‌دهد که آنها در مراحل مختلف منجر به تجمع و توزیع Si می‌شوند و در جذب Si به ریشه دخیل هستند (Yan et al. 2018; Ma and Yamaji, 2015). در برنج، *Lsi1* و *Lsi2* در لایه‌های سلولی مشابه اما با قطب‌های مختلف، قرار دارند که نشان می‌دهد برای جذب Si نیاز به همیاری *Lsi1* و *Lsi2* است (Haynes, 2017). در ریشه‌های برنج، نوار کاسپارین در اگزودرم و اندودرم از حرکت آب و محلول از جمله Si، در هر لایه سلولی، از آپوپلاستیک جلوگیری می‌کند. بین اگزودرم و اندودرم در اسکلرانشیم بیشتر سلول‌های پوستی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]

در طی تکامل ریشه تخریب می‌شوند و آئرانشیم را تشکیل می‌دهند و با برخی از بقایای سلول‌ها و دیواره سلولی، اتصالات باریک آپوپلاستی را تشکیل می‌دهد (شکل ۲) (Ma and Yamaji, 2015). بنابراین، Si ابتدا توسط *Lsi1* در سمت دیستال (دورتر) سلول‌های اگزودرمی وارد سیم‌پلاست شده و سپس توسط *Lsi2* در طرف پروگزیمال (فوقانی) به سمت اتصالات آپوپلاستی صادر می‌شود (Haynes, 2017) (شکل ۲). *Lsi1* در سلول‌های اگزودرم و آندودرم نسبت به استوانه مرکزی در ریشه، دور از مرکز است. در صورتی‌که *Lsi2* نزدیک به مرکز این سلول‌ها قرار دارد. سیلیسیم توسط *Lsi1* متصل‌شده در سمت دیستال (دورتر) اندودرمی به سیم‌پلاست اندودرمی وارد می‌شود و توسط *Lsi2* که در طرف پروگزیمال (فوقانی) اندودرمی قرار دارد، به استوانه آوندی منتقل می‌شود (Ma and Yamaji, 2015; Ma et al. 2006; Ma, 2009).

تفاوت در جذب و انتقال سیلیسیم در ارقام و گونه‌های مختلف گیاهان

تنوع در مقدار غلظت Si بین واریته‌های مختلف در یک گونه وجود دارد. غلظت Si در برگ‌ها از ۵/۴ درصد تا ۱۰/۶ درصد در ۳۸ گونه *اوریزا پرنیس* (*Oryza perennis*)، تحت شرایط مشابه، متفاوت است. غلظت Si در دانه جو تغییرات زیادی در محدوده ۰-۰/۰۳۶ درصد را در بین ارقام مختلف نشان داد. همبستگی مثبت قوی بین جذب Si و سطح بیان *HvLsi2* در ارقام مختلف جو وجود دارد، که بیانگر آن است که سطح بیان *HvLsi2* جذب Si در این گونه را کنترل می‌کند (Yan et al. 2018; Ma and Yamaji, 2015).

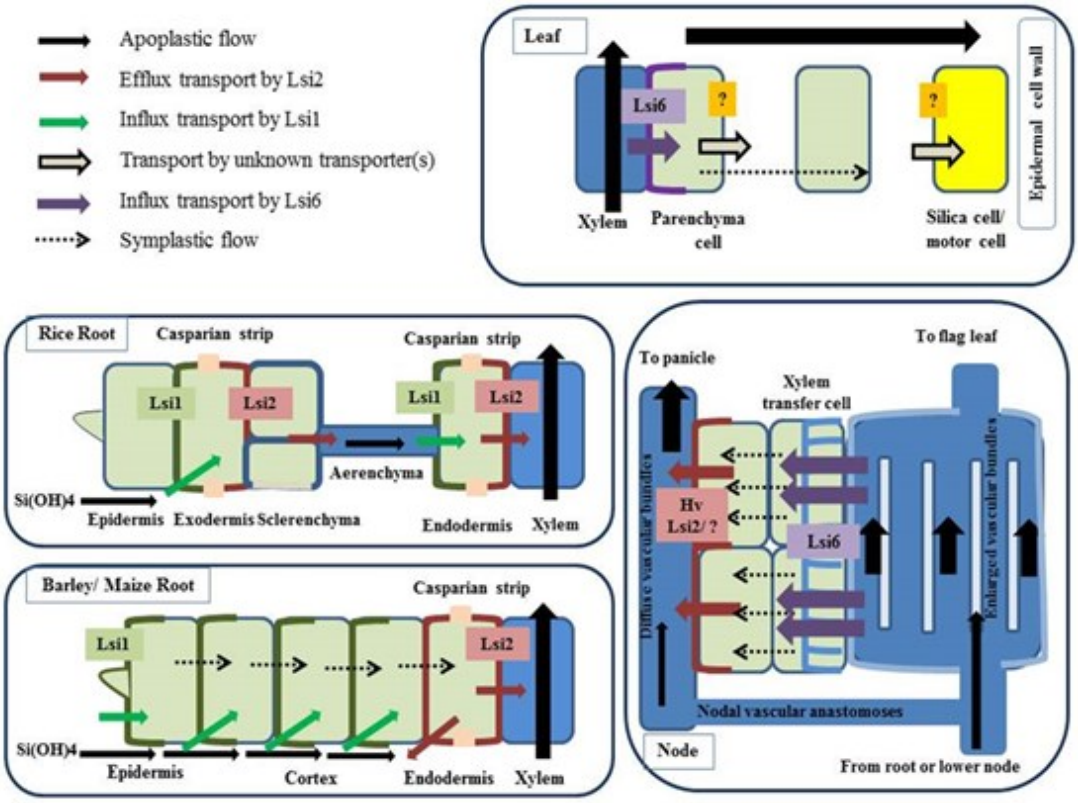
تفاوت در جذب Si در گیاهان ممکن است به علت ساختار ریشه باشد. در ریشه‌های برنج دو نوار کاسپاری در اگزودرم و آندودرم وجود دارد در حالی که در ذرت و جو به‌طور معمول یک نوار کاسپاری در قسمت آندودرم مشاهده می‌شود. علاوه‌براین، ریشه‌های بالغ برنج دارای یک ساختار به‌طور کامل متمایز با یک آئرانشیم به‌طور کامل توسعه یافته است در حالی‌که تقریبا تمام سلول‌های پوست (کورتکس) بین اگزودرم و آندودرم تخریب شده‌اند (شکل ۲).

بنابراین Si درون اگزودرم که به وسیله ناقل (influx transporter) *OsLsi1* منتقل شده است باید توسط ناقل (efflux transporter) *OsLsi2* به درون آپوپلاست در آئرانشیم انتشار یابد. با این وجود در ذرت و جو چنین ساختاری وجود ندارد یا ساختار ضعیفی وجود دارد. این تفاوت‌ها در

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]

موقعیت و قطبیت ناقل‌ها ممکن است یکی از دلایل تفاوت در ظرفیت جذب Si در گونه‌های مختلف باشد (Feng et al. 2011). کانال‌های Si در نهاندانگان و دم‌اسبیان به‌طور مستقل تکامل یافته‌اند و ژن‌های *Lsi2* نیز در خزه‌ای‌ها و نهانزادان آوندی وجود دارد، اما این ژن در نوئل سیتکایی از (رده مخروطیان) یافت نشده است که با تجمع کمتر Si در بازدانگان سازگار است. بر این اساس، *Lsi1* و *Lsi2* مشابه نهاندانگان اجدادی هستند. ولی با انتقال‌دهنده Si در دیاتومه‌ها به‌طور کامل تفاوت دارد (Hildebrand et al. 1997).



شکل ۲- نمایش سیستم انتقال سیلیسیم (Si) برای جذب، تخلیه در آوند چوبی و توزیع آن در گیاهان.
انتشار آپوپلاستیک و سیم‌پلاستی سیلیسیم با فلش‌های رنگی نشان داده شده است. در برنج، *Lsi1* و *Lsi2* در لایه‌های سلولی مشابه اما با قطب‌های مختلف، قرار دارند. که نشان می‌دهد برای جذب سیلیسیم نیاز به همیاری *Lsi1* و *Lsi2* است. در ریشه ذرت و جو، سیلیسیم توسط همیاری *Lsi1* و *Lsi2* در لایه‌های مختلف سلولی جذب می‌شود. در برگ‌ها و گره‌ها، سیلیسیم توسط *Lsi6* در دسته‌جات آوند چوبی تخلیه می‌شود. در جو، *HvLsi2* در انتقال مجدد سیلیسیم به آوند چوبی دخالت دارد، اما حامل مشابه در برنج مشخص نشده است (Ma and Yamaji, 2015).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]

نانوسیلیکا و اثرات آن بر تولیدات کشاورزی

فناوری نانو یک زمینه تحقیقاتی نوین قرن بیست و یکم است و تأثیر بسیار ارزشمندی بر اقتصاد، صنعت و زندگی مردم جهان می‌گذارد. نانوذرات دارای خصوصیات وابسته به اندازه، نسبت سطح به حجم بالا و خصوصیات نوری منحصر به فرد هستند و خاصیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی برجسته‌ای دارند (Tripathi et al. 2017). استفاده از فناوری نانو در کشاورزی به دلیل توسعه استراتژی‌های پایدار جدید، اهمیت زیادی دارد. در بعضی از مطالعات، اثرات نانوذرات سیلیکا بر فیزیولوژی گیاه مورد بررسی قرار گرفته است که در این مقاله به بررسی برخی از آنها می‌پردازیم.

سان و همکاران (۲۰۱۴) نشان داده‌اند که نانوذرات سیلیکا همراه با فلوئورسین ایزوتیوسیانات (FITC) در گیاهان لوپین، گندم و ذرت، جذب شده و بعد از ورود به ریشه‌ها، از طریق مسیرهای سیم‌پلاستیک/آپوپلاستیک، به قسمت‌های هوایی منتقل می‌شود. این مطالعه همچنین نشان داد که نانوذرات سیلیکا در دیواره سلولی انباشته می‌شوند، بنابراین وجود وابستگی با اجزای دیواره سلولی را نشان می‌دهد (Sun et al. 2014).

نشان داده شده است که نانوذرات سیلیکا با تأثیر بر سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی از گیاهچه‌های گندم در برابر اشعه UV محافظت می‌کنند (Tripathi et al. 2017). همچنین این نانوذرات اثرات منفی تنش UV-B، یعنی کاهش وزن تر، کاهش کلروفیل و آسیب بافت را کاهش می‌دهند. نانوذرات سیلیکا باعث کاهش استرس اکسیداتیو در گیاهان نخود فرنگی حاوی عنصر کروم شدند. فعالیت آنزیم‌هایی از جمله سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز در حضور نانوذرات سیلیکا بطور معنی‌داری افزایش یافت، اما فعالیت کاتالاز، گلوتاتیون ردوکتاز و دهیدروسکوربات ردوکتاز کاهش یافت. نانوذرات سیلیکا با کاهش تجمع عنصر کروم در ریشه و ساقه و کاهش سطح رادیکال‌های آزاد اکسیژن (ROS) و تنظیم جذب مواد مغذی مورد نیازگیاهان، باعث کاهش سمیت کروم در گیاه شدند (Tripathi et al. 2015).

در مطالعه دیگری نشان داده شد که کاربرد نانوذرات سیلیکا در غلظت ۸ گرم در لیتر جوانه‌زنی گیاه گوجه فرنگی را افزایش داد و همچنین باعث افزایش وزن تر و خشک گیاه به میزان ۶/۱۱۶ و ۵/۱۱۷ درصد شد. در مطالعات دیگر از نانوذرات سیلیسیمی به‌عنوان حامل کودهای مورد نیاز گیاهان استفاده شد به‌عنوان

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]

مثال از نانوذرات با اندازه ۲-۱۰ نانومتر به‌عنوان یک حامل کارآمد برای کودهای اوره، بور و نیتروژن استفاده شد (Torney et al. 2007; Wanyika et al. 2012).

همچنین در مطالعه پرتامینینگ و همکاران (۲۰۱۸) برای بهینه‌سازی کود، از ترکیب کود NPK با کود NanoChisil (کودی دارای کیتوزان و سیلیسیم) و همچنین از نانوسیلیکا برای ذرت سیاه استفاده شده است. نتایج نشان داد که استفاده از ترکیب کود NPK با کود NanoChisil و کود NPK با نانوسیلیکا در افزایش ارتفاع گیاه، تعداد برگ، وزن تر و وزن خشک موثر بوده است و استفاده از ۷۵٪ NanoChisil و ۲۵٪NPK در افزایش ارتفاع بوته، تعداد برگ، وزن مرطوب و وزن خشک بهترین عملکرد را داشته است (Pertaminingsih et al. 2018). در جدول ۲ برخی اثرات مشاهده شده از کاربرد نانوذرات سیلیکا بر گیاهان به صورت خلاصه نشان داده شده است.

جدول ۲- تأثیر نانوذرات سیلیسی بر رشد و عملکرد گیاهان.

نوع، غلظت و سایز نانوذرات	گیاه	اثرات مشاهده‌شده بر روی گیاهان	منبع
نانوذرات Si ۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ۱۰ نانومتر	خیار	کاهش اثرات مضر شوری و افزایش پارامترهای جوانه‌زنی و رشد رویشی گیاهچه‌های خیار. بهینه بودن غلظت ppm ۲۰۰ در بین دوزهای آزمایش‌شده	(Alsaeedi et al. 2018)
نانوذرات سیلیکا ۶۰۵،۱۲۱۰، ۲۴۲۰ گرم بر هکتار ۲۰۰ نانومتر	برنج	افزایش مقدار لیگنین برگ (۱۱۲/۷ درصد) و جذب خالص کربن (افزایش ۱/۸۳) و نرخ تعرق (۴۸/۳)	(Alvarez et al. 2018)
۲۵٪ نانو ذره سیلیکا	ذرت	افزایش ارتفاع گیاه، تعداد برگ، وزن مرطوب و وزن خشک با کاربرد ترکیب کود NPK با نانوسیلیکا	(Pertaminingsih et al. 2018)
کود نانو سیلیکا ، ۱/۷۵ ، ۲/۵ و ۳/۷۵ میلی‌لیتر بر لیتر	سویا	مناسب بودن غلظت کود نانوسیلیکا ۲/۵ میلی‌لیتر برای وزن خشک بذر	(Suciaty et al. 2018)
نانوذرات S ۰،۲۰۰،۵۰۰،۱۰۰۰،۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ۲۰ نانومتر	لوپین	افزایش رشد، مقدار پروتئین کل و افزایش فتوسنتز	(Sun et al. 2016)
نانوذرات سیلیکا ۱۰۰۰ میلی‌مولار ۲۰-۹۵ نانومتر	گندم	محافظت در برابر تنش UV-B با افزایش سیستم دفاعی آنتی اکسیدانی از نهال‌های گندم	(Tripathi et al. 2017)

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]

نانوذرات Si ۷۵–۱۲۵ نانومتر ۱۰ میکرو مولار SiNp	نخودفرنگی	افزایش فعالیت آنزیم‌هایی از جمله سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز	(Tripathi et al. 2015)
نانوذرات Si ۲۰ نانومتر ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم بر لیتر	لوپین، گندم، ذرت	نفوذ نانوذرات به دیواره سلولی، انتقال به اندام هوایی گیاهان	(Sun et al. 2014)
نانوذرات سیلیکا ۲–۱۴ میلی‌گرم بر لیتر ۱۲ نانومتر	گوجه فرنگی	افزایش جوانه‌زنی در گیاه و افزایش وزن تر و خشک	(Siddiqui and Al-Whaibi, 2014)
نانوذرات سیلیکا ۶۲, ۱۲۵, ۲۵۰, ۵۰۰, ۱۰۰۰, ۲۰۰۰ میکرو لیتر بر لیتر	زغال اخته	رشد ریشه جانبی، طول ریشه اصلی و مقدار کلروفیل	(Bao-Shan et al. 2004)
نانوذرات سیلیکا ۰، ۰/۷۵، ۱/۵، ۲، ۳/۷۵ میلی‌لیتر بر لیتر ۳۰> نانومتر	پنبه	سمیت SNPs و مشکلات جذب مواد مغذی	(Suciaty et al. 2018)

سرنوشت، اثرات محیطی و سمیت نانوذرات سیلیکا

در دهه‌های اخیر استفاده از نانوذرات در صنعت، پزشکی و کشاورزی به سرعت افزایش یافته است. نانوذرات سیلیکا نیز در مقیاس گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Van Hoecke et al. 2011). اثرات احتمالی فناوری‌های جدید بر تمام جنبه‌های اکوسیستم‌ها باید قبل از استفاده از آنها مورد بررسی قرار گیرد. به‌تازگی اثرات نانوذرات Si بر گیاهان علفی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (Mathur and Roy, 2020). سمیت نانوسیلیکا بر *آرابیدوپسیس* (*Arabidopsis thaliana*) گزارش شده است اما این سمیت به اندازه دیگر نانوذرات نبود (Lee et al. 2010). اثرات محیطی نانوذرات سیلیکا به ندرت بررسی شده است (Lönnerud, 2017).

گزارش شده است که قابلیت اصلاح سطح نانوذرات سیلیکا نقش مهمی در تجمع و رسوب آنها در فاضلاب و در نتیجه حذف آنها از پساب در زمان تصفیه اولیه فاضلاب دارد. نانوذرات سیلیکا (با پوشش توئین) به احتمال زیاد در فاضلاب رسوب می‌کنند ولی نانوذرات غیرپوشش‌دار سیلیکا به حرکت خود در جریان فاضلاب ادامه می‌دهند (Jarvie et al. 2009).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]

اطلاعات بیشتری در مورد تأثیر انـدازه نـانوذرات سیلیکا بر سرنوشت آنها در اکوسیستم لازم است و در آینده باید تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

بـا توجـه بـه اینکـه سیلیسـیم در بافـت تمـامی گیاهـان وجـود دارد امـا هنـوز مکانیسـم تجمـع سیلیسیم به‌طور کامل بررسـی نشـده اسـت. بـرای درک دقیق نقش سیلیسیم در گیاه، باید ویژگی‌های مولکولی و فیزیولوژیکی ناقل‌های سیلیسیم بررسی شود. تنظیم بیان ناقل‌های سیلیسـیم در گونـه‌های گیاهی متفاوت است. بـا ایـن حـال، مکانیزم‌هـای کنترل بیان ژن ناقلان سیلیسیم ناشناخته هستند. در گیاهانی کـه سیسـتم جـذب سیلیسـیم در آنهـا نـا کارآمـد اسـت، اگـر از انتقال‌دهنـده‌هـای مناسـب سیلیسیم استفاده شود، سیلیسیم بـه خـوبی جـذب شده و باعـث کـاهش اثـرات تنش‌هـا در گیاهـان می‌شود.

بـرای توصـیف انتقـال سیلیسـیم در بسـیاری از گیاهان باید کارهای تحقیقاتی بیشتری انجام شـود و با استفاده از مهندسی ژنتیک می‌توان اثرات مفید سیلیسیم در گیاهان را افزایش داد. مطالعات نشان می‌دهند که کاربرد نانوذرات سیلیسـیمی (Si-NP) مـی‌توانـد در بخش‌هـای مختلـف کشـاورزی و بیوتکنولوژی گیاهان بسیار مـؤثر باشـد. همچنـین استفاده از این نـانو ذرات همـراه بـا مولکول‌هـای زیستی می‌تواند برای تولید ارقام جدید مقـاوم در برابر تنش‌های زیستی و غیر زیستی مناسب باشد. با توجه به اینکه گیاهان زراعی در معـرض طیـف وسیعی از تنش‌های زیسـتی و غیـر زیسـتی قـرار مـی‌گیرنـد، افـزودن نـانوکود سیلیسـیم مـی‌توانـد مقاومت به محصول را نسبت به چنـین تنش‌هـایی افزایش دهد و باعث افزایش بازده شود. همچنـین از ایـن نـانوذرات مـی‌تـوان در سـاخت کودهـای سازگار با محیط زیسـت اسـتفاده کـرد. بنـابراین، استفاده از Si-NPs راه حل مناسبی بـرای بسـیاری از مشـکلات کشـاورزی در مـورد علف‌هـای هرز، بیماری‌ها، خشکسـالی و عملکـرد محصـول می‌توانـد باشـد. بـا ایـن حـال، کـاربرد گسـترده نانوکودهای سیلیسیم در مزرعه باید ارزیابی شـده و بررسی‌های میدانی بیشتری انجام شود.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]

References فهرست منابع

Alsaeedi A, El-Ramady H, Alshaal T, El-Garawani M, Elhawat N, Al-Otaibi A. 2018. Exogenous nanosilica improves germination and growth of cucumber by maintaining K^+/Na^+ ratio under elevated Na+ stress. Plant physiology and biochemistry 125: 164-171.

Alvarez RDCF, de Mello Prado R, Felisberto G, Deus ACF, DE Oliveira RLL. 2018. Effects of soluble silicate and nanosilica application on rice nutrition in an *Oxisol*. Pedosphere 28(4): 597-606.

Bao-Shan L, Chun-hui L, Li-jun F, Shu-chun Q, Min Y. 2004. Effect of TMS (nanostructured silicon dioxide) on growth of Changbai larch seedlings. Journal of Forestry Research 15(2): 138-140.

Cornelis JT, Delvaux B, Georg RB, Lucas Y, Ranger J, Opfergelt S. 2011. Tracing the origin of dissolved silicon transferred from various soil-plant systems towards rivers: a review. Biogeosciences 8(1): 89-112.

Deshmukh RK, Vivancos J, Guérin V, Sonah H, Labbé C, Belzile F, Bélanger RR. 2013. Identification and functional characterization of silicon transporters in soybean using comparative genomics of major intrinsic proteins in *Arabidopsis* and rice. Plant Molecular Biology 83(4-5): 303-315.

Feng J, Yamaji N, Mitani-Ueno N. 2011. Transport of silicon from roots to panicles in plants. Proceedings of the Japan Academy, Series B 87(7): 377-385.

Grégoire C, Rémus-Borel W, Vivancos J, Labbé C, Belzile F, Bélanger RR. 2012. Discovery of a multigene family of aquaporin silicon transporters in the primitive plant *Equisetum arvense*. The Plant Journal 72(2): 320-330.

Haynes RJ. 2017. Significance and role of Si in crop production. Advances in Agronomy 146: pp.83-166.

Hildebrand M, Volcani BE, Gassmann W, Schroeder JI. 1997. A gene family of silicon transporters. Nature 385(6618): 688-689.

Janmohammadi M, Amanzadeh T, Sabaghnia N, Ion V. 2016. Effect of nano-silicon foliar application on safflower growth under organic and inorganic fertilizer regimes. Botanica 22(1): 53-64**.**

Jarvie HP, Al-Obaidi H, King SM, Bowes MJ, Lawrence MJ, Drake AF, Green MA, Dobson PJ. 2009. Fate of silica nanoparticles in simulated primary wastewater treatment. Environmental Science and Technology 43(22): 8622-8628.

Kaur H, Greger M. 2019. A review on Si uptake and transport system. Plants 8(4): p.81.

Knight CT, Kinrade SD. 2001. A primer on the aqueous chemistry of silicon. In Studies in Plant Science 8: 57-84.

Lal R. 2008. Promise and limitations of soils to minimize climate change. Journal of Soil and Water Conservation 63(4): 113A-118A.

Liang Y, Nikolic M, Bélanger R, Gong H, Song A. 2015. Silicon in agriculture. Dordrecht: Springer. 10: 978-94.

Lee CW, Mahendra S, Zodrow K, Li D, Tsai YC, Braam J, Alvarez PJ. 2010. Developmental phytotoxicity of metal oxide nanoparticles to *Arabidopsis thaliana*. Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal 29(3): 669-675.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]

Liu R, Lal R. 2015. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. Science of the Total Environment 514:131-139.

Liu X, Zhang N, Bing T, Shangguan D. 2014. Carbon dots based dual-emission silica nanoparticles as a ratiometric nanosensor for Cu^{2+}. Analytical chemistry, 86(5), pp.2289-2296.

Lodriche SS, Soltani S, Mirzazadeh RUS. 2012. Patent Application No. 13/406,538.

Lönnerud S. 2017. Toxicity of seven silica nano-particles to *Raphidocelis subcapitata*: Single compound and mixture effects. Degree project for Master of Science 45 ECTS. University of Gothenburg**.**

Ma JF. 2010. Silicon transporters in higher plants. MIPs and their role in the exchange of metalloids. pp 99-109.

Ma JF. 2009. Silicon uptake and translocation in plants.

Ma JF, Takahashi E. 2002. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Elsevier.

Ma JF, Yamaji N, Mitani N, Tamai K, Konishi S, Fujiwara T, Katsuhara M, Yano M. 2007. An efflux transporter of silicon in rice. Nature 448(7150): 209-212.

Ma JF, Tamai K, Yamaji N, Mitani N, Konishi S, Katsuhara M, Ishiguro M, Murata Y, Yano M. 2006. A silicon transporter in rice. Nature 440(7084): 688-691.

Ma JF, Yamaji N. 2015. A cooperative system of silicon transport in plants. Trends in Plant Science 20(7): 435-442.

Magda S, Hussein MM. 2016. Determinations of the effect of using silica gel and nano-silica gel against Tutaabsoluta (Lepidoptera: Gelechiidae) in tomato fields. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research 8(4): 506-512.

Martin-Ortigosa S, Peterson DJ, Valenstein JS, Lin VSY, Trewyn BG, Lyznik LA, Wang K. 2014. Mesoporous silica nanoparticle-mediated intracellular Cre protein delivery for maize genome editing via loxP site excision. Plant Physiology 164(2): 537-547.

Mathur P, Roy S. 2020. Nanosilica facilitates silica uptake, growth and stress tolerance in plants. Plant Physiology and Biochemistry 157: 114-127.

Mirzaei AM, Safari SAA, Sheklabadi M. 2014. Aggregation stability and organic carbon fraction in soil amended with some plant residues, nanozeolite and natral zeolite.

Mitani N, Ma JF. 2005. Uptake system of silicon in different plant species. Journal of Experimental Botany 56(414): 1255-1261.

Mitani N, Yamaji N, Ago Y, Iwasaki K, Ma JF. 2011. Isolation and functional characterization of an influx silicon transporter in two pumpkin cultivars contrasting in silicon accumulation. The Plant Journal 66(2): 231-240.

Mitani N, Yamaji N, Ma JF. 2009. Identification of maize silicon influx transporters. Plant and Cell Physiology 50(1): 5-12.

Montpetit J, Vivancos J, Mitani-Ueno N, Yamaji N, Rémus-Borel W, Belzile F, Ma JF, Bélanger RR. 2012. Cloning, functional characterization and heterologous expression of *TaLsi1*, a wheat silicon transporter gene. Plant Molecular Biology. 79(1-2):35-46.

Nawaz MA, Zakharenko AM, Zemchenko IV, Haider MS, Ali MA, Imtiaz M, Chung G, Tsatsakis A, Sun S, Golokhvast KS. 2019. Phytolith formation in plants: From soil to cell. Plants 8(8): p.249.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]

Pertaminingsih LD, Prihastanti E, Parman S, Subagio A. 2018. Application of inorganic fertilizer with NanoChisil and Nanosilica on black corn plant growth (Zea mays L.). In Journal of Physics: Conference Series 1025(1): p. 012128. IOP Publishing.

Rao GB, Susmitha P. 2017. Silicon uptake, transportation and accumulation in Rice. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry 6(6): 290-293.

Rastogi A, Tripathi DK, Yadav S, Chauhan DK, Živčák M, Ghorbanpour M, El-Sheery NI, Brestic M. 2019. Application of silicon nanoparticles in agriculture. 3 Biotech 9(3): 1-11.

Rastogi SK, Pal P, Aston DE, Bitterwolf TE and Branen AL. 2011. 8-Aminoquinoline functionalized silica nanoparticles: a fluorescent nanosensor for detection of divalent zinc in aqueous and in yeast cell suspension. ACS applied materials and interfaces 3(5): 1731-1739.

Richmond KE, Sussman M. 2003. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. Current Opinion in Plant Biology 6(3): 268-272.

Siddiqui MH, Al-Whaibi MH. 2014. Role of nano-SiO_2 in germination of tomato (*Lycopersicum esculentum* seeds Mill.). Saudi Journal of Biological Sciences 21(1): 13-17.

Suciaty T, Purnomo D, Sakya AT. 2018. The effect of nano-silica fertilizer concentration and rice hull ash doses on soybean (Glycine max (L.) Merrill) growth and yield. In IOP Conference series: Earth and Environmental Science 129(1): p. 012009). IOP Publishing.

Sun D, Hussain HI, Yi Z, Rookes JE, Kong L, Cahill DM. 2016. Mesoporous silica nanoparticles enhance seedling growth and photosynthesis in wheat and lupin. Chemosphere 152: 81-91.

Sun D, Hussain HI, Yi Z, Siegele R, Cresswell T, Kong L, Cahill DM. 2014. Uptake and cellular distribution, in four plant species, of fluorescently labeled mesoporous silica nanoparticles. Plant Cell Reports 33(8): 1389-1402.

Torney F, Trewyn BG, Lin VSY, Wang K. 2007. Mesoporous silica nanoparticles deliver DNA and chemicals into plants. Nature Nanotechnology 2(5): 295-300.

Tripathi DK, Singh VP, Prasad SM, Chauhan DK, Dubey NK. 2015. Silicon nanoparticles (SiNp) alleviate chromium (VI) phytotoxicity in *Pisum sativum* (L.) seedlings. Plant Physiology and Biochemistry 96: 189-198.

Tripathi DK, Singh S, Singh VP, Prasad SM, Dubey NK, Chauhan DK. 2017. Silicon nanoparticles more effectively alleviated UV-B stress than silicon in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings. Plant Physiology and Biochemistry 110: 70-81.

Tubana BS, Babu T, Datnoff LE. 2016. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: history and future perspectives. Soil Science 181(9/10):393-411.

Van Hoecke K, De Schamphelaere KA, Ramirez–Garcia S, Van der Meeren P, Smagghe G, Janssen CR. 2011. Influence of alumina coating on characteristics and effects of SiO_2 nanoparticles in algal growth inhibition assays at various pH and organic matter contents. Environment international 37(6): 1118-1125.

Wallace IS, Roberts DM. 2005. Distinct transport selectivity of two structural subclasses of the nodulin-like intrinsic protein family of plant aquaglyceroporin channels. Biochemistry 44(51): 16826-16834.

Wanyika H, Gatebe E, Kioni P, Tang Z, Gao Y. 2012. Mesoporous silica nanoparticles carrier for urea: potential applications in agrochemical delivery systems. Journal of Nanoscience and Nanotechnology 12(3): pp.2221-2228.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]

Xu CX, Ma YP, Liu YL, 2015. Effects of silicon (Si) on growth, quality and ionic homeostasis of aloe under salt stress. South African Journal of Botany 98: 26-36.

Yamaji N, Chiba Y, Mitani-Ueno N, Ma JF. 2012. Functional characterization of a silicon transporter gene implicated in silicon distribution in barley. Plant Physiology 160(3): 1491-1497.

Yamaji N, Mitatni N, Ma JF. 2008. A transporter regulating silicon distribution in rice shoots. The Plant Cell 20(5): 1381-1389.

Yan GC, Nikolic M, Ye MJ, Xiao ZX, Liang YC. 2018. Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. Journal of Integrative Agriculture 17(10): 2138-2150.

Zhao XQ, Mitani N, Yamaji N, Shen RF, Ma JF. 2010. Involvement of silicon influx transporter *OsNIP2*; 1 in selenite uptake in rice. Plant Physiology 153(4): 1871-1877.

Ziaee M, Ganji Z. 2016. Insecticidal efficacy of silica nanoparticles against Rhyzopertha dominica F. and Tribolium confusum Jacquelin du Val. Journal of Plant Protection Research 56(3).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]

Silicon and Silica Nanoparticles: Uptake and Transport Mechanism in Plants and Their Effects on Plant Yield

Raiesi Ardali[1,2], Leila Soleimanpour[1,3], Mostafa Chorom[2], Leila Maʿmani[1*]

1- Department of Nanotechnology, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
2- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
3- Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources of Karaj, University of Tehran Iran.

leila.mamani@abrii.ac.ir

Abstract

Silicon (Si) is one of the useful elements for the growth of many plant species and increases the plant's resistance to various types of abiotic and biotic stresses. Despite their many advantages, the application of silicon nanoparticles (Si-NPs) has been less explored in agriculture. These nanoparticles affect the metabolic activity of plants by entering plants. Also, due to the porous nature of silica nanoparticles, they are suitable nanocarriers for various molecules in agriculture. A large group of proteins and genes cause the transfer of silicon in the plant. *Lsi1* (Lower silicon transprter 1) and *Lsi2* (Lower silicon transprter 2) are two main types of Si transporter in the uptake and distribution of Si have been identified. Identification of these transporters has determined the path of silicon uptake from the root level and its transfer to the shoots. But the Si transporter involved in silicon uptake in the xylem have not yet been fully identified. Also, silicon transporters for silica cells, in which a very high amount of silicon accumulates are not known. Because the beneficial effects of silicon in the plant are related to the amount of silicon accumulation in the plant, it is important to study the mechanism of Si uptake and transport in plants. This paper investigates the uptake, transport, and accumulation of silicon in plants as well as the importance of silicon and nano silicon for agricultural products.

Keywords: *Lsi*, Nanosilica, Nanotechnology, Silica Nanoparticle, Stress.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1399.13.4.4.0]