

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 مأمی^{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 transporter 1) و *Lsi2* (Lower silicon transporter 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 در گیاهان 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*

مقدمه

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). علاوه بر تأثیر مستقیم Si-NPs بر رشد و نمو گیاهان، این نانو ذرات می‌توانند به‌عنوان نانوأفت‌کش‌ها (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

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).

"رئیی اردلی و همکاران، سیلیسیم و نانوذرات سیلیکا: مکانیسم جذب و انتقال در گیاهان و ..."

کریستالی نامحلول است که به طور مستقیم برای گیاهان قابل دسترس نیست (Liang et al. 2015; Richmond and Sussman, 2003). شکل محلول Si در خاک، اسید مونوسیلیسیک است که می تواند توسط ریشه گیاه جذب شود و یک مولکول مونومر بدون بار (H_4SiO_4) در pH: 2 تا 9 است. غلظت اسید مونوسیلیسیک قابل دسترس گیاه از ۱/۰ تا ۶/۰ میلی مول بر لیتر در محلول خاک متغیر است (Yan et al. 2018).

سیلیسیم یک عنصر ضروری برای حیوانات و انسان ها 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 فعالیت های متابولیکی و فیزیولوژیکی در گیاهان است (Yan et al. 2018; Bao-Shan et al. 2004). در بررسی های اخیر، اثرات فیزیولوژی Si و تاثیر آن بر افزایش مقاومت گیاهان مورد بررسی قرار گرفته است. کاربرد Si در خاک های شور باعث کاهش اثرات مخرب شوری روی گیاهان می شود (Xu et al. 2015) تحقیقات نشان می دهد که

حامل های پروتئین ها و نوکلئوتیدها (Torney et al. 2014; Martin-Ortigosa et al. 2007) و سایر مواد شیمیایی موجود در گیاهان به کار روند. نانوذرات سیلیکا (Mirzaei et al. 2014) و نانوسنسورها (Rastogi et al. 2011; Liu et al. 2014)، این نانوذرات را در خود جای داده و می توانند 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 می شود.

سیلیسیم در خاک و گیاه

سیلیسیم دومین عنصر فراوان در سطح زمین و خاک است و تقریباً ۲۸ درصد پوسته زمین را تشکیل می دهد. Si به طور عمده به شکل سیلیکات های اولیه و سیلیکات های ثانویه وجود دارد. سیلیکات های اولیه بیشتر در قسمت های شنی و سیلتی و سیلیکات های ثانویه در بخش های رسی خاک مشاهده می شوند. همچنین شکل های غیر کریستالی متفاوتی از سیلیکات های آلی و بیورنی نیز وجود دارد (Cornelis et al. 2011). با این وجود، بیشتر Si در خاک به شکل آلومینوسیلیکات

در محلول بدون تغییر باقی می ماند. 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 توده ای است که به دلیل تراکم زیاد انتقال دهنده های Si در ریشه و ساقه، باعث افزایش H_4SiO_4 در داخل غشای سلولی ریشه شده (Mitani and Ma, 2005) و توسط سلول های ریشه جذب و در سلول های اپیدرمی برگ قرار می گیرد. پس از حذف آب، H_4SiO_4 انباشته شده در برگ به سیلیکات پلیمری $(SiO_2.nH_2O)$ تبدیل می شود که به عنوان فیتولیت شناخته می شود شکل (۱) (Tubana et al. 2016). سیلیکا (SiO_2) در سلول، در سیتوپلاسم و واکوئل سلول های گیاه ذخیره می شود در حالی که، فیتولیت های بین سلول ها تقریباً در تمام قسمت های گیاه یعنی ریشه، ساقه، برگ، میوه، گل آذین و غیره ذخیره می شوند (Nawaz et al. 2019).

سیلیکا که در سلول های اپیدرمی برگ ذخیره شده است، بی حرکت است و نمی تواند به برگ های تازه انتقال پیدا کند در حالی که اسیدسیلیسیک به وسیله پروتئین های غشایی انتقال می یابد (Yan et al. 2018). فرآیندهای مولکولی

استفاده از این کود در خاک های 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 می کند، بنابراین باعث افزایش نسبت پتاسیم به سدیم می شود و به تجمع پتاسیم، نیتروژن و گوگرد در گیاهان کمک می کند (Bao-Shan et al. 2004).

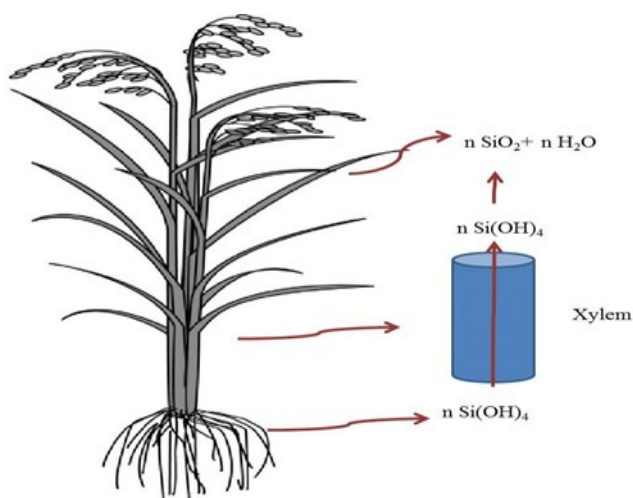
جذب، احیا و سیستم انتقال سیلیسیم در گیاهان

گیاهان باید سیلیسیم (Si) را از محلول خاک به بافت های مختلف انتقال دهند اما ریشه گیاه، Si را به صورت سیلیسیک اسید (H_4SiO_4)، جذب می کند (Ma and Takahashi, 2002; Knight and Kinrade, 2001). مکانیسم جذب Si بسته به نوع گیاه متفاوت است. H_4SiO_4 در ریشه های جانبی به وسیله جذب فعال، غیر فعال و جذب انتخابی انجام می شود (Yan et al. 2018; Cornelis et al. 2011). گیاهانی که دارای سیستم جذب فعال Si هستند باعث کاهش قابل توجه Si در خاک می شوند، بنابراین غلظت Si را در محلول غذایی کاهش می دهند. در حالی که برای گیاهانی که Si را به صورت غیر فعال جذب می کنند، غلظت Si

"رئیی اردلی و همکاران، سیلیسیم و نانوذرات سیلیکا: مکانیسم جذب و انتقال در گیاهان و ..."

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.

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 al. 2011) و سویا (Deshmukh et al. 2013)



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

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

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 پلازما، بین محلول خارجی آپوپلاست و سلول‌های گیاهی، تسهیل می‌کند،

فرآیند فعال است که توسط شیب پروتون در سراسر غشای پلازما 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.

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

Lsi1 برنج (*OsLsi1*) اولین ژن شناخته شده 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*) به عنوان 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

جدول ۱- برخی از ژن‌های شناسایی شده‌ی دخیل در جذب و انتقال سیلیسیم در گیاهان.

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

"رئیی اردلی و همکاران، سیلیسیم و نانوذرات سیلیکا: مکانیسم جذب و انتقال در گیاهان و ..."

(2010). به تازگی 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 دم‌اسبیان، 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., 2015; Ma and Yamaji, 2018). 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 آگزودرم و اندودرم از حرکت آب و محلول از جمله Si، در هر لایه سلولی، از آپوپلاستیک جلوگیری می‌کند. بین آگزودرم و اندودرم در اسکلرانسیم بیشتر سلول‌های پوستی

OsLsi1 و همولوگ‌های آن که کانال‌های ورودی Si را رمزگذاری می‌کنند، همه به پروتئین اصلی ندولین ۲۶ (nodulin-26-like) (intrinsic protein: NIP) اختصاص دارند که یک خانواده بزرگ از آکوپورین 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 حالی که *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).

علاوه بر این، خصوصیات سوبسترای NIP‌ها، به‌طور عمده توسط فیلتر انتخابی آروماتیک/آرژینین (ar/R) که شامل چهار دنباله اسیدآمینو 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, 2015).

پرنیس (*Oryza perennis*)، تحت شرایط مشابه، متفاوت است. غلظت Si در دانه جو تغییرات زیادی در محدوده ۰-۰/۳۶ 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 آندودرم 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 آثرانسیم به‌طور کامل توسعه یافته است در حالی که تقریباً تمام سلول‌های پوست (کورتکس) بین آگزودرم و آندودرم تخریب شده‌اند (شکل ۲).

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

در طی تکامل ریشه تخریب می‌شوند و آثرانسیم 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 آگزودرمی وارد سیم‌پلاست شده و سپس توسط *Lsi2* در طرف پروگزیمال (فوقانی) به سمت اتصالات آپوپلاستی صادر می‌شود (Haynes, 2017) (شکل ۲). *Lsi1* در سلول‌های آگزودرم و آندودرم نسبت به استوانه مرکزی در ریشه، دور از مرکز است. در صورتی که *Lsi2* نزدیک به مرکز این سلول‌ها قرار دارد. سیلیسیم توسط *Lsi1* متصل شده در سمت دیستال (دورتر) آندودرمی به سیم‌پلاست آندودرمی وارد می‌شود و توسط *Lsi2* که در طرف پروگزیمال (فوقانی) آندودرمی قرار دارد، به استوانه آوندی منتقل می‌شود (Ma and Yamaji, 2015; Ma et al. 2006; Ma, 2009).

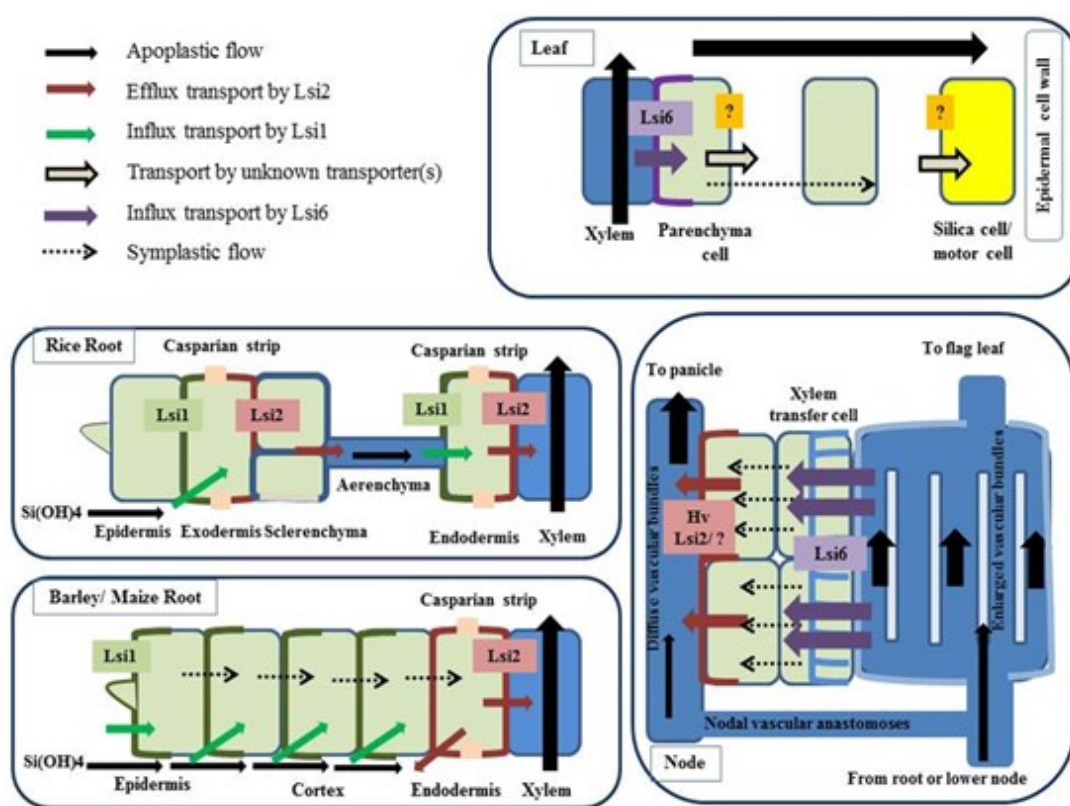
تفاوت در جذب و انتقال سیلیسیم در ارقام و گونه‌های مختلف گیاهان

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

"رئیی اردلی و همکاران، سیلیسیم و نانوذرات سیلیکا: مکانیسم جذب و انتقال در گیاهان و ..."

ژن در نوئل سیتکایی از (رده مخروطیان) یافت شده است که با تجمع کمتر Si در بازدانگان سازگار است. بر این اساس، *Lsi1* و *Lsi2* مشابه نهادانگان اجدادی هستند. ولی با انتقال دهنده Si در دیاتومه‌ها به طور کامل تفاوت دارد (Hildebrand et al. 1997).

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 نهادانگان و دم‌اسبیان به طور مستقل تکامل یافته‌اند و ژن‌های *Lsi2* نیز در خزه‌ای‌ها و نهادزادان آوندی وجود دارد، اما این



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).

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 دهیدروآسکوربات 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 نیاز گیاهان، 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

"رئیی اردلی و همکاران، سیلیسیم و نانوذرات سیلیکا: مکانیسم جذب و انتقال در گیاهان و ..."

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.

مثال از نانوذرات با اندازه ۲-۱۰ نانومتر به عنوان 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

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

منبع	اثرات مشاهده‌شده بر روی گیاهان	گیاه	نوع، غلظت و سایز نانوذرات
Alsaeedi et al. (2018)	کاهش اثرات مضر شوری و افزایش پارامترهای جوانه‌زنی و رشد رویشی گیاهچه‌های خیار. بهینه بودن غلظت ۲۰۰ ppm در بین دوزهای آزمایش شده	خیار	نانوذرات Si ۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ۱۰ نانومتر
Alvarez et al. (2018)	افزایش مقدار لیگنین برگ (۱۱۲/۷ درصد) و جذب خالص کربن (افزایش ۱/۸۳) و نرخ تعرق (۴۸/۳)	برنج	نانوذرات سیلیکا ۶۰۵، ۱۲۱۰، ۲۴۲۰ گرم بر هکتار ۲۰۰ نانومتر
Pertaminingsih (et al. 2018)	افزایش ارتفاع گیاه، تعداد برگ، وزن مرطوب و وزن خشک با کاربرد ترکیب کود NPK با نانوسیلیکا	ذرت	۲۵٪ نانو ذره سیلیکا
Suciaty et al. (2018)	مناسب بودن غلظت کود نانوسیلیکا ۲/۵ میلی‌لیتر برای وزن خشک بذر	سویا	کود نانو سیلیکا ۰، ۱/۷۵، ۲/۵ و ۳/۷۵ میلی‌لیتر بر لیتر
Sun et al. (2016)	افزایش رشد، مقدار پروتئین کل و افزایش فتوسنتز	لوپین	نانوذرات S ۰، ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ۲۰ نانومتر
Tripathi et al. (2017)	محافظت در برابر تنش UV-B با افزایش سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی از نهال‌های گندم	گندم	نانوذرات سیلیکا ۱۰۰۰ میلی‌مولار ۲۰-۹۵ نانومتر

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

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 *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 (Lönnnerud, 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).

"رئیی اردلی و همکاران، سیلیسیم و نانوذرات سیلیکا: مکانیسم جذب و انتقال در گیاهان و ..."

و با استفاده از مهندسی ژنتیک می‌توان اثرات مفید سیلیسیم در گیاهان را افزایش داد. مطالعات نشان می‌دهند که کاربرد نانوذرات سیلیسیم (Si-NP) می‌تواند در بخش‌های مختلف کشاورزی و بیوتکنولوژی گیاهان بسیار مؤثر باشد. همچنین استفاده از این نانو ذرات همراه با مولکول‌های زیستی می‌تواند برای تولید ارقام جدید مقاوم در برابر تنش‌های زیستی و غیر زیستی مناسب باشد. با توجه به اینکه گیاهان زراعی در معرض طیف وسیعی از تنش‌های زیستی و غیر زیستی قرار می‌گیرند، افزودن نانوکود سیلیسیم می‌تواند مقاومت به محصول را نسبت به چنین تنش‌هایی افزایش دهد و باعث افزایش بازده شود. همچنین از این نانوذرات می‌توان در ساخت کودهای سازگار با محیط زیست استفاده کرد. بنابراین، استفاده از Si-NPs راه حل مناسبی برای بسیاری از مشکلات کشاورزی در مورد علف‌های هرز، بیماری‌ها، خشکسالی و عملکرد محصول می‌تواند باشد. با این حال، کاربرد گسترده نانوکودهای سیلیسیم در مزرعه باید ارزیابی شده و بررسی‌های میدانی بیشتری انجام شود.

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

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به اینکه سیلیسیم در بافت تمامی گیاهان وجود دارد اما هنوز مکانیسم تجمع سیلیسیم به‌طور کامل بررسی نشده است. برای درک دقیق نقش سیلیسیم در گیاه، باید ویژگی‌های مولکولی و فیزیولوژیکی ناقل‌های سیلیسیم بررسی شود. تنظیم بیان ناقل‌های سیلیسیم در گونه‌های گیاهی متفاوت است. با این حال، مکانیسم‌های کنترل بیان ژن ناقلان سیلیسیم ناشناخته هستند. در گیاهانی که سیستم جذب سیلیسیم در آنها نا کارآمد است، اگر از انتقال‌دهنده‌های مناسب سیلیسیم استفاده شود، سیلیسیم به خوبی جذب شده و باعث کاهش اثرات تنش‌ها در گیاهان می‌شود.

برای توصیف انتقال سیلیسیم در بسیاری از گیاهان باید کارهای تحقیقاتی بیشتری انجام شود

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.

"رئیس اردلی و همکاران، سیلیسیم و نانوذرات سیلیکا: مکانیسم جذب و انتقال در گیاهان و ..."

- 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 Cu²⁺. *Analytical chemistry*, 86(5), pp.2289-2296.
- Lodriche SS, Soltani S, Mirzazadeh RUS. 2012.** Patent Application No. 13/406,538.
- Lönnnerud 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 *Tuta absoluta* (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 natural 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.

- 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-Wahaibi MH. 2014.** Role of nano-SiO₂ 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, Siegle 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 Schampelaere KA, Ramirez-Garcia S, Van der Meeren P, Smaghe G, Janssen CR. 2011.** Influence of alumina coating on characteristics and effects of SiO₂ 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.

"رئیس اردلی و همکاران، سیلیسیم و نانوذرات سیلیکا: مکانیسم جذب و انتقال در گیاهان و ..."

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).

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 Chorom², Leila Ma'mani^{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 transporter 1) and *Lsi2* (Lower silicon transporter 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.