



تأثیر سیلیس و نانوذرات سیلیس بر جوانه‌زنی بذرها و رشد گیاه شبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L.)

صنم نظرعلیان*^۱، احمد مجد^۲، سعید آیریان^۳، فرخ قهرمانی نژاد^۱، فرزانه نجفی^۱، ماریا گرگر^۴

^۱ گروه زیست شناسی گیاهی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

^۲ گروه زیست شناسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۳ گروه زیست شناسی سلولی و مولکولی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

^۴ گروه اکولوژی، محیط زیست و زیست شناسی گیاهی، دانشگاه استکهلم، استکهلم، سوئد

E-mail: sanam_alian@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۶/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۳/۳

چکیده

افزودن سیلیس باعث افزایش رشد زیست توده گیاهی می‌گردد. هدف از این مطالعه پیدا کردن پاسخ این سوال است که آیا سیلیس و نانوذرات سیلیس دارای اثراتی مشابه بر فرآیندهای رشد در گیاه شبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L.) هستند یا خیر. گیاهان در حضور ۰-۲/۵ میلی مولار تیمار سیلیکات سدیم و نانوذرات سیلیس در محیط هیدروپونیک به مدت ۳۰ روز رشد داده شدند. نتایج نشان داد که غلظت سیلیس در ریشه و ساقه با افزایش میزان سیلیس افزوده شده، افزایش یافت. جوانه‌زنی بذرها و شاخص زنده ماندن در حضور سیلیس در ۴ روز بعد از کاشت بذرها افزایش یافت، اما این شاخص‌ها در ادامه افزایش غلظت تیمارها با کاهش مواجه شد. طول نهال و وزن تر گیاه، طول کلی گیاه و مساحت برگ‌ها در حضور تیمارهای سیلیس و نانوذرات سیلیس افزایش یافته است، در حالی که وزن خشک گیاه، نسبت وزن خشک به وزن تر ساقه و طول ریشه چه در حضور تیمارها کاهش یافت. همچنین قطر استوانه آوندی مرکزی ریشه در ریشه‌های جوان و ضخامت بخش چوبی اندودرم در حضور تیمارها افزایش یافت. اثرات مشابهی در حضور تیمارهای سیلیس و نانوذرات سیلیس مشاهده شد اما افزایش در طول کلی گیاهان، ضخامت اندودرم، کاهش وزن خشک به وزن تر ساقه و طول ریشه چه در حضور تیمارهای نانوذرات نسبت به تیمارهای سیلیس کمی بر جسته‌تر بود. در نتیجه، سیلیس و نانوذرات سیلیس دارای اثرات مشابهی در رشد گیاه هستند و در نتیجه نانو ذرات سیلیس را میتوان به جای سیلیس مورد استفاده قرار داد.

کلیدواژه‌ها: توسعه نهال، جوانه‌زنی، سیلیس، شبلیله، نانوذرات سیلیس

مقدمه

نزدیک به ۱۳۵ گونه متعلق به خانواده بقولات گزارش شده است [۱۵]. گیاه شبلیله در طب سنتی و به عنوان افزودنی طبیعی در مواد غذایی استفاده می‌شود، و نشان داده شده است که دارای اثرات آنتی‌اکسیدان و

گیاه شبلیله، (*Trigonella foenum-graecum* L.) مهمترین گونه از جنس *Trigonella* در ایران است.

فرم‌های کمتر فعال سیلیس یا نانوذرات سیلیس که شبیه به فیتولیت‌ها عمل می‌کند صورت گیرد [۳].

نانوذرات به طور گسترده‌ای در سال‌های اخیر برای بسیاری از فرآیندهای کشاورزی و زیست‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نانوذرات با اندازه کوچک ممکن است از طریق فاگوسیتوز، پینوسیتوز، اندوسیتوز، ناقل‌های غشایی و در بافت‌ها از طریق ناقل‌های پارا سلولی وارد سلول‌های انسانی/ حیوانی شوند [۲۱]. نانوذرات سیلیس باعث بهبود جوانه‌زنی بذرها، افزایش ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر و نهال، وزن تر و وزن خشک در گیاه گوجه فرنگی شده است [۲۰]. مطالعات جوانه‌زنی بذر نشان داده‌اند که سمیت سلولی کمتری با استفاده از نانوذرات مشاهده می‌شود [۱۲]. در مطالعات میدانی افزودن سیلیس پتاسیم و نانوذرات سیلیس پتاسیم مشاهده شده است که، سیلیس در این حالت به میزان بالاتری نسبت به نانوذرات سیلیس انباشته شده بود، از آنجا که نانوذرات سیلیس به صورت نامحلول است و در نتیجه در خاک سیلیس به صورت سیلیکات در دسترس بود [۳]. به همین دلیل، کاهش تجمع فلزات در بخش‌های خوراکی از گیاهان با سیلیس نسبت به نانوذرات سیلیس بیشتر بود [۳].

در مطالعه قبلی نشان داده شد که نانوذرات سیلیس و سیلیس دارای اثرات مشابهی در شکل‌گیری لیگنین، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و جذب سیلیس دارند [۱۶]. با این حال، در مقایسه با سیلیس، نانوذرات سیلیس باعث افزایش انتقال سیلیس به ساقه و تنظیم مثبت بیشتر ژن *PST*، بیشتر از سیلیس است.

بنابراین هدف از مطالعه حاضر مقایسه اثرات سیلیس و نانوذرات سیلیس بر رشد، به عنوان مثال جوانه‌زنی، توسعه جوانه‌ها و سایر پارامترهای رشد

ضدسرطانی قابل توجهی، در مدل‌های مختلف انسان و حیوانی است [۱۷].

سیلیس به عنوان یک عنصر مفید در ترویج رشد و ثبات ساختار در گیاهان در نظر گرفته شده است [۲]. سیلیس باعث افزایش فتوسنتز می‌شود. [۱۴]، علاوه بر این، سیلیس باعث افزایش فسفوریلاسیون قندها می‌شود که به نوبه خود باعث افزایش سنتز کربوهیدرات‌ها می‌گردد [۱]. علاوه بر این، محتوای ساکارز، سطح چربی و محتوای ویتامین C، با افزایش مقادیر سیلیس افزایش می‌یابد [۱۸]. همچنین سیلیس باعث افزایش کشت سلولی و گسترش دیواره‌های اولیه سلولی می‌شود، که باعث بهبود رشد در گیاهان می‌شود [۲۲]. تعرق متناسب با تثبیت دی اکسید کربن، با افزایش میزان سیلیس کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث افزایش عملکرد دانه می‌گردد [۸] با توجه به یافته‌های [۱۰] به نظر می‌رسد که سیلیس در عملکرد دانه برنج یعنی تعداد دانه بالا و اندازه بزرگ دانه‌ها دارای نقشی موثر است. علاوه بر ارتقاء رشد، سیلیس باعث کاهش تنش‌های زیستی و غیر زیستی در گیاهان می‌شود [۵]. سیلیس دارای اثرات مثبتی بر جوانه‌زنی بذرها در گوجه فرنگی تحت تنش خشکی است که باعث کاهش آسیب‌های اکسیداتیو در نهال‌ها با افزایش سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی می‌گردد [۱۹].

سیلیس دومین عنصر فراوان در پوسته زمین است. با این حال، در دسترس بودن آن برای گیاهان در خاک ضعیف است چرا که بسیاری از سیلیس موجود در خاک در مواد معدنی محدود شده است و هوازدگی سیلیس بسیار آهسته است [۶]. بنابراین، افزودن سیلیس برای رشد، ثبات و حفاظت گیاهان لازم است. سیلیکات اغلب به عنوان مواد افزودنی سیلیس استفاده می‌شود؛ با این حال، این امر می‌تواند با استفاده از

در گیاهان شنبلیله بود.

مواد و روش کار

شرایط رشد گیاهی

بذر گیاهان شنبلیله در محیط هیدروپونیک کشت شدند. بذرها از شرکت پاکان بذر در ایران تهیه شدند. این آزمایش با استفاده از طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با حداقل پنج تکرار اجرا شد. در این پژوهش از سیلیکات سدیم (Si) یا Na_2SiO_3 با غلظت‌های ۰ (شاهد)، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلی‌مولار بعنوان سیلیس و از nano-SiO_2 بعنوان نانو ذرات سیلیس (SiNP) با غلظت‌های ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلی‌مولار استفاده گردید. اندازه نانوذرات در طیفی حدود ۲۰-۳۰ نانومتر (تحقیقات نانو مواد آمریکا، ایالات متحده آمریکا) بود. گیاهان در ظروف کشت به ۱۱ گروه تقسیم شدند و به مدت ۳۰ روز در محیط هیدروپونیک با محلول غذایی هوگلند و تیمارهای سیلیکات سدیم و نانو ذرات سیلیس باقی ماندند. برای کشت گیاهان در محیط هیدروپونیک، در این روش گیاهان در شرایط کنترل شده داخل اتاق‌های با کنترل شرایط اقلیمی^۱ تحت شرایط نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸/ ساعت تاریکی با شدت نور^۲ $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ و میزان رطوبت حدود ۸۰٪ و دماهای روز/شب به ترتیب ۱۹/۲۳ درجه سانتی‌گراد رشد داده شدند.

روش اندازه گیری و آنالیز سیلیس جذب شده در گیاه

در این روش گیاهان سالم بعد از ۳۰ روز کشت در محیط هیدروپونیک در گلخانه برداشت شدند و ریشه‌های گیاهان پس از خارج شدن از محیط هیدروپونیک با آب مقطر شسته شد و آب اضافی

توسط دستمال کاغذی گرفته شد. در ادامه کل گیاهان وزن شدند و وزن تر^۳ کلی گیاهان بدست آمد. سپس هر گیاه به دو بخش هوایی یا بخش ساقه و بخش ریشه تقسیم شد و وزن تر هر بخش بصورت جداگانه اندازه گیری و ثبت گردید. در ادامه قسمت‌های وزن شده، خرد گردید و داخل قیف‌های کاغذی ریخته شد و در داخل آون با درجه حرارت ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت. بعد از گذشت ۲۴ ساعت وزن خشک^۴ هر یک از نمونه‌ها بصورت جداگانه اندازه‌گیری و ثبت گردید. برای انجام عملیات هضم در شرایط مرطوب^۵ حدود ۱ گرم بافت خشک شده گیاهی برای هر نمونه که در حدود ۱ میلی‌متر خرد شده اند، مورد نیاز است. این نمونه‌ها در حضور نسبت حجمی ۷:۳ از $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$ مورد هضم قرار گرفتند، سپس غلظت سیلیس در توده خشک^۶ در قسمت‌های ریشه و ساقه گیاه توسط اسپکتروسکوپی جذب اتمی (SpectraA 55B (Varian, Agilent, Australia) در مد کوره^۷ اندازه‌گیری شد.

مشاهده استوانه آوندی مرکزی و اندودرم ریشه

مقطع ریشه‌ها با برش عرضی در فاصله ۲۰٪ از نوک ریشه، (۴ سانتی‌متر از ۱۰ سانتی‌متر طول کل ریشه) آماده شد. پس از آن، مقطع ریشه‌ها برای مشاهده لیگنین با بربرین آنیلین آبی با استفاده از روش Brundrett برای مشاهده آناتومی ریشه رنگ‌آمیزی شد. برش‌های ریشه از طریق فیلترهای با طول موج ۶۱۰ نانومتر و ۵۱۰ زیر میکروسکوپ فلورسانس (Olympus BX60، الیمپوس، ژاپن) مشاهده شدند و

³ Fresh weight (FW)

⁴ Dry weight (DW)

⁵ Wet digestion

⁶ Dry biomass

⁷ Furnace

¹ Climate chamber

² Light intensity

در روز آخر) در طول گیاهچه بدست آمد. شاخص جوانه‌زنی بذر از مجموع نسبت تعداد کل بذرهای جوانه‌زده به تعداد روزهای پس از کاشت به دست آمد. سرعت جوانه‌زنی بر اساس فرمول زیر بدست آمد:

$$Vg = \sum \frac{Ni}{Di}$$

سرعت جوانه زنی بر حسب تعداد بذر در روز: Vg

تعداد بذر جوانه زده در هر روز: Ni

شماره روز: Di

شاخص‌های رشد

شاخص‌های طول ریشه‌چه، وزن تر و خشک کلی در محیط هیدروپونیک، وزن تر دانه، طول و وزن تر گیاهچه، مساحت برگ چهارم کامل رشد کرده با توجه به [۹] در پایان ۳۰ روز کشت اندازه‌گیری و محاسبه شدند.

آنالیزهای آماری

تجزیه و تحلیل آماری تمام داده‌های تجربی ارائه شده در این تحقیق بر روی حداقل پنج تکرار محاسبه شده است. سطح معنی‌داری داده‌های آماری در سطح $P < 0.05$ توسط آزمون‌های Tukey's HSD و T-test اندازه‌گیری شد و تحلیل رگرسیون با استفاده از نرم‌افزارهای آماری SPSS 21، Minitab 17 مقایسه شد.

نتایج

غلظت سیلیس در گیاهان با افزایش سیلیس و غلظت نانوذرات سیلیس افزایش یافته است (جدول ۱). غلظت سیلیس در ریشه‌های تحت تیمار بیشتر از ساقه‌ها بود. ظاهر گیاهان شنبلیله در پایان کشت متفاوت بود. گیاهان تحت تیمار با ۱,۵ و ۱,۰

تصاویر توسط یک دوربین دیجیتال الیمپوس XC30 (الیمپوس، ژاپن) ذخیره شدند. ضخامت بافت چوبی شده اندودرم ریشه و مساحت استوانه آوندی مرکزی در ریشه با نرم‌افزار اندازه‌گیری تصویر Klonk اندازه‌گیری شد.

آزمون جوانه‌زنی

بذرهای شنبلیله برای مطالعه ویژگی‌های جوانه‌زنی مورد استفاده قرار گرفت. دانه‌های با اندازه یکنواخت برای ضدعفونی سطحی با ۱,۵٪ (W/V) هیپوکلریت سدیم به مدت ۵ دقیقه شستشو داده شدند و سپس با آب مقطر چهار بار به طور کامل قبل از کاشت شسته شدند. دانه‌ها در ظروف پتری‌دیش یکبار مصرف ۹ سانتی‌متری در لایه‌ای از کاغذ صافی (واتمن # ۴۱) قرار داده شدند. بیست دانه در هر پتری‌دیش قرار داده شد. پتری‌دیش‌ها با یازده تیمار مختلف سیلیس تیمار داده شدند.

پتری‌دیش‌ها در یک ژرمیناتور 1 ± 27 درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. جوانه‌زنی بذرها، روزانه تا ۶ روز پس از شروع آزمایش ثبت شدند. طول ریشه، طول محور زیرلپه، پس از ۴ و ۷ روز بعد از کشت اندازه‌گیری شد. در همان زمان، وزن تر اندازه‌گیری شد. برای تعیین وزن خشک نهال، نهال‌هایی که در هر پتری‌دیش تولید شده بودند در آون در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به یک وزن ثابت خشک شدند و سپس وزن خشک آنها اندازه‌گیری شد. شمارش بذرهای جوانه‌زده به صورت روزانه در ساعات معین از روز انجام گرفت. درصد جوانه‌زنی از طریق تعداد بذرهای جوانه‌زده شده در روز آخر (هفتم) در نظر گرفته شد. شاخص بهینه بذر از حاصلضرب درصد جوانه‌زنی نهائی (درصد جوانه‌زنی

حضور تیمارهای سیلیکات سدیم و ذرات نانو سیلیس افزایش یافته است. علاوه بر این پس از ۷ روز تیمار با تیمارهای سیلیکات سدیم و ذرات نانو سیلیس، اثرات سیلیس در افزایش درصد جوانه زنی بذرها در بالاترین غلظت‌های سیلیس به صورت اثر افزایشی مشاهده شد، در حالی که این اثرات در افزایش درصد جوانه زنی بذرها توسط هر دو تیمار سیلیکات سدیم و ذرات نانو سیلیس مشابه بود (جدول ۲).

میلی مولار سیلیس و ۱,۵ میلی مولار نانوذرات سیلیس بلندتر و برگ‌ها دارای اندازه‌های بزرگ‌تر بودند. گیاهانی که در حضور غلظت‌های بالاتر سیلیس و نانوذرات سیلیس بودند هیچ تفاوت خاصی در مقایسه با گروه شاهد نشان ندادند.

درصد جوانه زنی

جوانه زنی بذرها به طور قابل توجهی پس از ۴ روز در

جدول ۱. غلظت سیلیس در ریشه و اندام هوایی گیاهان شنبلیله در طول ۳۰ روز کشت در حضور مقادیر مختلف سیلیس به صورت سیلیکات سدیم و یا ذرات نانو سیلیس در محیط کشت هیدروپونیک. تعداد تکرار=۳، حروف مختلف نشان دهنده تفاوت‌های معنی دار نسبت به گروه شاهد هستند. میزان خطا برابر با $P \leq 0.05$ در نظر گرفته شده است.

تیمار سیلیس میلی مولار	غلظت سیلیس، $\mu\text{g gDW}^{-1}$			
	ساقه		ریشه	
	سیلیکات سدیم	نانوذرات سیلیس	سیلیکات سدیم	نانوذرات سیلیس
۰	20 ± 4^a	20 ± 4^a	165 ± 49^s	165 ± 49^s
۰/۵	52 ± 5^a	123 ± 5^{ab}	180 ± 45^s	245 ± 67^t
۱	100 ± 39^b	135 ± 15^{ab}	333 ± 38^t	434 ± 109^u
۱/۵	235 ± 23^b	193 ± 56^b	706 ± 271^v	486 ± 50^u
۲	223 ± 25^b	395 ± 129^d	472 ± 122^u	631 ± 130^v
۲/۵	361 ± 27^c	424 ± 151^d	530 ± 112^u	877 ± 54^v

جدول ۲. درصد جوانه زنی در گیاهان شنبلیله ۴، ۷ روز پس از تیمار دانه در حضور ۰-۲/۵ میلی مولار سیلیس به صورت سیلیکات سدیم یا ذرات نانو سیلیس. تعداد تکرار = ۵، حروف مختلف نشان دهنده تفاوت‌های معنی دار نسبت به گروه شاهد هستند. میزان خطا برابر با $P \leq 0.05$ در نظر گرفته شده است. * درصد میزان افزایش دارای تفاوت معنی دار نسبت به گروه شاهد است.

تیمار سیلیس میلی مولار	جوانه زنی			
	سیلیکات سدیم		نانو ذرات سیلیس	
	درصد	درصد تغییر نسبت به گروه کنترل	درصد	درصد تغییر نسبت به گروه کنترل
جوانه زنی در روز چهارم				
0	51 ± 9.5^a		51 ± 9.5^a	
0.5	82 ± 5.8^{bc}	160*	82 ± 5.9^{bc}	161*
1.0	88 ± 17.6^{ab}	173	90 ± 4.3^{bc}	176*
1.5	83 ± 13.4^{bc}	163*	87 ± 10.7^{bc}	171*
2.0	85 ± 4.3^{bc}	163*	78 ± 6.5^{abc}	153
2.5	89 ± 4.4^{bc}	175*	97 ± 2.5^c	190*
جوانه زنی در روز هفتم				
0	32 ± 11.9^{fgh}		32 ± 11.9^{fgh}	
0.5	58 ± 3.3^e	71	60 ± 3.2^{fgh}	76
1.0	60 ± 8.3^{efj}	76	53 ± 5.9^{gh}	65
1.5	57 ± 7.1^{efj}	67	59 ± 6.7^{gh}	79
2.0	59 ± 10.6^l	79*	58 ± 2.1^f	76
2.5	71 ± 18.3^{efj}	115	69 ± 7.1^{fg}	91

سرعت جوانه‌زنی، شاخص جوانه‌زنی و شاخص زنده ماندن

سرعت جوانه‌زنی به طور قابل توجهی با افزایش غلظت سیلیس، به استثنای پایین‌ترین و بالاترین غلظت سیلیس (۲/۰،۵/۵ میلی‌مولار) که در این غلظت‌ها سرعت جوانه‌زنی کاهش قابل توجهی داشت، افزایش یافته است (جدول ۳). در کل اثرات مشابهی برای هر دو تیمار سیلیکات سدیم و ذرات نانو سیلیس مشاهده شد.

شاخص جوانه‌زنی در غلظت‌های متوسط سیلیس افزایش یافته است، اما این افزایش بصورت معنی‌داری نیست (جدول ۳). در کل اثرات مشابهی برای شاخص جوانه‌زنی در هر دو تیمار سیلیکات سدیم و ذرات نانو سیلیس مشاهده شد.

شاخص زنده ماندن در تیمار سیلیس به طور قابل توجهی با غلظت متوسط سیلیس (۱ و ۱/۵ میلی‌مولار) افزایش یافته است، و مستقل از نوع تیمار (سیلیکات سدیم یا نانوذرات سیلیس) اضافه شده است.

وزن تر، وزن خشک، نسبت وزن خشک به وزن تر و رابطه وزن بین ریشه و اندام هوایی

وزن ریشه و اندام هوایی در گیاهان که به مدت ۳۰ روز در محیط غذایی کشت داده شدند، در حضور غلظت‌های مختلف سیلیکات و ذرات نانو سیلیس در جدول ۳ نشان داده شده است. هیچ تأثیر قابل توجهی از سیلیس بر وزن تر (FW) یا وزن خشک (DW) مشاهده نشد. تیمار سیلیس باعث کاهش وزن خشک ساقه به طور مشابه با هر دو تیمار سیلیکات و ذرات نانو سیلیسمی شود. وزن تر ساقه مقدار بسیار کمی با سیلیکات کاهش می‌یابد و با ذرات نانو سیلیس اصلاً کاهش نشان نمی‌دهد. در ریشه، وزن خشک به مقدار ناچیز با سیلیکات و ذرات نانو سیلیس کاهش می‌یابد، در حالی که وزن تر با ذرات نانو سیلیس و با ۱،۵-۲،۵ میلی‌مولار سیلیکات افزایش یافته است. با استثنا بودن ریشه در تیمار غلظت پایین سیلیکات و ذرات نانو سیلیس، نسبت وزن خشک/وزن تر در هر دو قسمت ریشه و اندام هوایی به میزان اندکی با افزوده شدن سیلیس کاهش می‌یابد. نسبت وزن خشک/وزن تر در ساقه با تمام غلظت‌های ذرات نانو سیلیس و با غلظت‌های ۰،۵ و ۲،۵ میلی‌مولار سیلیکات، به ترتیب صورت معنی‌داری کاهش می‌یابد (جدول ۴).

جدول ۳. سرعت جوانه‌زنی، شاخص جوانه‌زنی و شاخص زنده ماندن در گیاهان سنبله در روز هفتم پس از کشت در حضور ۰-۲/۵ میلی‌مولار سیلیس به صورت سیلیکات سدیم یا ذرات نانو سیلیس. تعداد تکرار = ۵، حروف مختلف نشان دهنده تفاوت‌های معنی‌دار نسبت به گروه شاهد هستند. میزان خطا برابر با $P \leq 0.05$ در نظر گرفته شده است.

تیمار سیلیس میلی مولار	سرعت جوانه‌زنی (روز)		شاخص جوانه‌زنی		شاخص زنده ماندن	
	سیلیکات	ذرات نانو سیلیس	سیلیکات	ذرات نانو سیلیس	سیلیکات	ذرات نانو سیلیس
۰	8.3 ± 0.6 ^k	8.3 ± 0.6 ^k	12.0 ± 0.8 st	12.0 ± 0.8 st	280 ± 35 ^v	280 ± 35 ^v
۰/۵	6.1 ± 0.5 ^m	5.5 ± 0.8 ^m	8.7 ± 0.6 ^{tu}	7.7 ± 0.7 ^{tu}	200 ± 30 ^v	269 ± 40 ^v
۱	8.3 ± 0.8 ^k	6.4 ± 0.7 ^m	12.2 ± 0.4 st	15.6 ± 0.6 ^s	569 ± 83 ^{xy}	643 ± 131 ^y
۱/۵	7.4 ± 0.6 ^l	5.2 ± 0.5 ^m	16.1 ± 0.6 ^s	14.8 ± 0.7 ^s	760 ± 184 ^y	637 ± 119 ^y
۲	6.0 ± 0.8 ^m	4.0 ± 0.6 ^m	15.5 ± 1.2 ^s	9.5 ± 1.0 ^{tu}	347 ± 77 ^{vx}	260 ± 64 ^v
۲/۵	4.9 ± 0.3 ^m	5.6 ± 0.8 ^m	12.1 ± 1.0 st	6.5 ± 0.9 ^u	239 ± 51 ^v	134 ± 28 ^v

جدول ۴. وزن خشک (DW)، وزن تر (FW) در ریشه و اندام هوایی گیاهان شنبلیله پس از ۳۰ روز کشت در محیط غذایی در حضور ۰-۲/۵ میلی مولار سیلیس به صورت سیلیکات سدیم یا ذرات نانو سیلیس. تعداد تکرار=۱۳، حروف مختلف نشان دهنده تفاوت‌های معنی‌دار نسبت به گروه شاهد هستند. میزان خطا برابر با $P \leq 0/05$ در نظر گرفته شده است. * درصد میزان افزایش دارای تفاوت معنی‌دار نسبت به گروه شاهد است.

تیمار سیلیس میلی مولار	ساقه‌ها		ریشه‌ها	
	سیلیکات سدیم	ذرات نانو سیلیس	سیلیکات سدیم	ذرات نانو سیلیس
وزن خشک، mg				
۰	117±31 ^a	117±31 ^a	30±4 ^a	30±4 ^a
۰/۵	70±10 ^d	82±9 ^d	20±4 ^a	21±4 ^a
۱	116±32 ^{abc}	128±24 ^{abc}	18±4 ^a	30±10 ^a
۱/۵	129±20 ^{abc}	100±19 ^{abc}	27±3 ^a	16±5 ^a
۲	155±33 ^{ab}	133±16 ^{bc}	30±7 ^a	20±5 ^a
۲/۵	183±27 ^c	180±20 ^c	16±3 ^a	23±7 ^a
وزن تر، mg				
۰	714±117 ^{ab}	714±117 ^{ab}	178±28 ^{abc}	178±28 ^{abc}
۰/۵	487±73 ^b	514±57 ^b	131±39 ^c	185±49 ^{abc}
۱	544±166 ^b	738±88 ^{ab}	150±57 ^{bc}	299±66 ^{ab}
۱/۵	731±62 ^{ab}	746±113 ^{ab}	289±51 ^{ab}	205±46 ^{abc}
۲	925±190 ^a	728±121 ^{ab}	249±66 ^{abc}	231±41 ^{abc}
۲/۵	947±160 ^b	770±90 ^{ab}	218±57 ^{abc}	326±65 ^a

شده بودند.

ضخامت دیواره سلولی آوند چوبی با افزایش غلظت سیلیس، به طور مشابه با هر دو تیمار سیلیکات سدیم و ذرات نانو سیلیس افزایش یافته است. در برش‌های ریشه اولیه سیلیکات با میزان اثر کمتری نسبت به ذرات نانو سیلیس به خصوص در ۱/۵ میلی مولار سیلیس اضافه شده دیده شد، قطر منطقه استوانه آوندی مرکزی در حضور سیلیس و ذرات نانو سیلیس افزایش یافت. با این حال، در گیاهان مسن‌تر تفاوتی بین تیمارها (جدول ۵) مشاهده نشد.

در ریشه نمونه‌های کنترل تعداد سلول‌های با دیواره چوبی شده اندودرم کمتر از زمانی است که تحت تیمار با ۱/۵ میلی مولار سیلیکات سدیم و ذرات

چوبی شدن سلول‌های آوند چوبی در اندودرم ریشه‌های

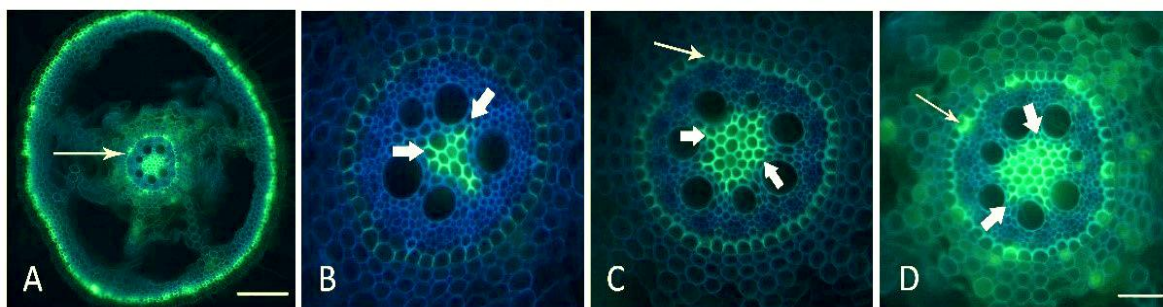
جوان

اثر سیلیس و ذرات نانو سیلیس در چوبی شدن سلول‌های آوند چوبی در اندودرم ریشه‌های جوان مورد بررسی قرار گرفت و آناتومی ریشه تحت تیمار با سیلیکات سدیم و ذرات نانو سیلیس (جدول ۴) متفاوت بود. توسعه اندودرم در شنبلیله ۲۰ روزه مورد مطالعه قرار گرفت. با اضافه شدن میزان بالایی از سیلیس فرآیند چوب‌شدگی آشکار بود (جدول ۴). در ریشه کنترل تنها آوند چوبی اولیه و آوند چوبی ثانویه ابتدایی چوبی شدند، اما در ریشه تحت تیمار با ۱,۵ میلی مولار سیلیکات و ذرات نانو سیلیس سلول‌های آوند چوبی اندودرم بیش از ریشه گروه شاهد چوبی

نانو سیلیس بودند و سلول‌های بافت گزیم و شده بودند (شکل ۱). بخش‌هایی از اندودرم بیش از ریشه گروه شاهد چوبی

جدول ۵. ضخامت بخش‌چوبی شده در اندودرم و مساحت استوانه آوندی مرکزی در برش‌های عرضی ریشه در فاصله ۲۰ درصد از مجموع از نوک ریشه (۴ سانتی متر) در گیاهان شنبلیله کشت در طول ۲۰ روز در حضور ۰-۲/۵ میلی مولار سیلیس به صورت سیلیکات سدیم یا ذرات نانو سیلیس. تعداد تکرار=۱۰، حروف مختلف نشان دهنده تفاوت‌های معنی‌دار نسبت به گروه شاهد هستند. میزان خطا برابر با $P \leq 0/05$ در نظر گرفته شده است.

تیمار سیلیس، میلی مولار	مساحت استوانه آوندی مرکزی، μm^2		ضخامت دیواره سلولی، μm	
	سیلیکات	ذرات نانو سیلیس	سیلیکات	ذرات نانو سیلیس
۰	1050 ± 23^a	1050 ± 23^a	1.62 ± 0.03^b	1.62 ± 0.03^b
۰/۵	1370 ± 34^a	1465 ± 21^a	2.57 ± 0.36^{bc}	2.99 ± 0.45^{bc}
۱	1625 ± 23^a	2100 ± 46^a	2.92 ± 0.06^b	3.54 ± 0.18^{bcd}
۱/۵	2205 ± 28^a	2445 ± 41^a	3.79 ± 0.54^d	5.06 ± 2.42^e
۲	1980 ± 19^a	2065 ± 51^a	3.08 ± 0.16^{bcd}	4.23 ± 1.12^{de}
۲/۵	1555 ± 32^a	1125 ± 48^a	2.45 ± 0.42^{bc}	3.61 ± 1.34^{de}



شکل ۱. توسعه مساحت استوانه آوندی مرکزی و بخش‌های چوبی شده در اندودرم در برش‌های عرضی ریشه گیاهان گروه کنترل (A,B)، تیمار سیلیکات سدیم (C) و ذرات نانو سیلیس (D). پیکان‌های ضخیم اشاره به مساحت افزایش یافته قسمت چوبی شده در اندودرم و استوانه مرکزی آوندی دارند. پیکان‌های باریک اشاره به قسمت اندودرم در ریشه دارند. میله مقیاس = ۵۰ و ۲۰۰ میکرومتر است.

می‌توان این چنین نتیجه‌گیری نمود که با افزایش غلظت سیلیس به خصوص در غلظت‌های ۱/۵ و ۲ میلی‌مولار جوانه‌زنی بذر و شاخص زنده ماندن در حضور سیلیس در روز ۴ بعد از رشد بذر افزایش یافته است.

سیلیس نقش حیاتی در رشد گیاه ایفا می‌کند و باعث تنظیم محتوای جیبرلین درونزا در گیاهان

بحث

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سیلیس گرفته شده به هر دو صورت سیلیکات سدیم و نانو ذرات سیلیس (جدول ۱) باعث افزایش میزان جذب توسط سیلیس گیاهان می‌شوند.

طبق نتایج آماری بدست آمده از اثر غلظت‌های مختلف سیلیس و نانو ذرات سیلیس (۰-۲/۵ mM)

نسبت به سیلیکات سدیم کمی برجسته تر بود. در نتیجه، هر دو سیلیکات و ذرات نانو سیلیس به طور کلی دارای اثرات مشابه در رشد گیاه هستند و در نتیجه ذرات نانو سیلیس می تواند به جای سیلیکات سدیم استفاده شود.

نتیجه گیری که می توان از این پژوهش به دست آورد این است که هر دو تیمار سیلیکات سدیم و ذرات نانو سیلیس اثرات مشابهی در گیاهان دارند، هر دو در مقادیر به کار گرفته شده، غیرسمی هستند و جذب سیلیس در هر دو تیمار سیلیکات سدیم و ذرات نانو سیلیس مشاهده شده است. بنابراین، هر دو شکل سیلیس می تواند به عنوان کودهای افزودنی در بخش کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

References

- [1] Adams F (1980) Interactions of phosphorus with other elements in soils and in plants. The role of phosphorus in agriculture. American Society of Agronomy 655-680.
- [2] Epstein E (2009) Silicon: its manifold roles in plants. *Annals of Applied Biology* 155:155-160.
- [3] Greger M, Landberg T (2015) Silicon reduces cadmium and arsenic levels in field-grown crops. *Silicon*. DOI 10.1007/s12633-015-9338-z
- [4] Hwang SJ, Hamayun M, Kim HY, Na CI, Kim KU, Shin DH, Lee IJ (2007) Effect of nitrogen and silicon nutrition on bioactive gibberellin and growth of rice under field conditions. *Journal of Crop Science and Biotechnology* 10:281-286.
- [5] Imtiaz M, Rizwan MS, Mushtaq MA, Ashraf M, Shahzad SM, Yousaf B, Saeed DA, Rizwan M, Nawaz MA, Mehmood S, Tu S (2016) Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: A review. *J. Environ. Manag* 183:521-529.
- [6] Keller C, Guntzer F, Barboni D, Labreuche J, Meunier JD (2012) Impact of agriculture on the Si biogeochemical cycle: input from phytolith studies. *Comptes Rendus Geoscience* 344:739-746.

می شود. با این حال، اطلاعات کمی در مورد مکانیسمی که از طریق آن سیلیس می تواند فعالیت و سطح هورمون های گیاهی در گیاهان [۴] را تحت تاثیر قرار دهد وجود دارد. لیو همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که تحت تنش شوری، سیلیس باعث رشد گیاهان می شود که با افزایش اثرات کاهش یافته جیبرلین درونزا همراه بود [11].

مطالعات قبلی نشان داده است که افزایش سیلیس باعث افزایش رشد گیاهان می شود [۲۳]، که نتایج ما نشان داد که هر دو تیمار سیلیکات سدیم و ذرات نانو سیلیس باعث افزایش غلظت سیلیس و افزایش ضخامت دیواره های سلولی آوند چوبی در ساقه و ریشه شنبلیله می گردد که با مطالعات قبلی همسویی دارد.

قطر استوانه آوندی مرکزی ریشه در ریشه های جوان و ضخامت بافت چوبی شده اندودرم افزایش یافته است. با توجه به نتایج Lukačová و همکاران (۲۰۱۳) سیلیس در گیاهان تحت تنش کادمیوم باعث تغییر آناتومی ریشه و افزایش بافت چوب پنبه ای در ریشه گشت [۱۳]. همچنین سیلیس قطر ریشه و محتوای لیگنینی در مراحل اولیه جوانه در کلزا را افزایش داد [۷].

طول نهال و وزن تر، طول کل گیاه و سطح برگ افزایش یافته است در حالی که وزن خشک، نسبت وزن خشک به وزن تر ساقه و طول ساقهچه با تیمار سیلیکات سدیم و ذرات نانو سیلیس کاهش یافته است.

اثرات تیمار سیلیکات سدیم و ذرات نانو سیلیس مشابه بود اما افزایش در طول بوته ها و ضخامت دیواره سلولی و کاهش نسبت وزن خشک به وزن تر ساقه و طول ساقهچه در تیمار با ذرات نانو سیلیس

- [7] Kuai J, Sun Y, Guo C, Zhao L, Zuo Q, Wu J, Zhou G (2017) Root-applied silicon in the early bud stage increases the rapeseed yield and optimizes the mechanical harvesting characteristics. *Field Crops Research* 200:88-97.
- [8] Kupfer C, Kahnt G (1992) Effects of the application of amorphous silica on transpiration and photosynthesis of soybean plants under varied soil and relative air humidity conditions. *Journal of Agronomy and Crop Sciences* 168:318-325.
- [9] Kvet J, Necas J, Kubín Š (1966) Measurement of leaf area. *Methods of Studying Photosynthetic Production of Plants*. Academia Praha 315-334.
- [10] Lavinsky AO, Detmann KC, Reis JV, Ávila RT, Sanglard ML, Pereira LF, DaMatta FM (2016) Silicon improves rice grain yield and photosynthesis specifically when supplied during the reproductive growth stage. *Journal of Plant Physiology* 206: 125-132.
- [11] Lee SK, Sohn EY, Hamayun M, Yoon JY, Lee IJ (2010). Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. *Agroforestry systems* 80: 333-340.
- [12] Lin D, Xing B (2007) Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Environmental Pollution* 150: 243-250.
- [13] Lukačová Z, Švubová R, Kohanová J, Lux A (2013) Silicon mitigates the Cd toxicity in maize in relation to cadmium translocation, cell distribution, antioxidant enzymes stimulation and enhanced endodermal apoplasmic barrier development. *Plant Growth Regulation* 70:89-103.
- [14] Ma CC, Li QF, Gao YB, Xin TR (2004) Effects of silicon application on drought resistance of cucumber plants. *Soil Science and Plant Nutrition* 50:623-632.
- [15] Mozaffarian V. 1997. A dictionary of Iranian plant names. Iranian Contemporary Culture Press, Tehran 756-757.
- [16] Nazarian S, Majd A, Irian S, Najafi F, Ghahramaninejad F, Landberg T, Greger M (2017) Comparison of silicon nanoparticles and silicate treatments in fenugreek. *Plant Physiology and Biochemistry* <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.03.009>
- [17] Ouzir M, El Bairi K, Amzazi S (2016) Toxicological properties of fenugreek (*Trigonella foenum graecum*). *Food and Chemical Toxicology* 96:145-154.
- [18] Savant NK, Korndörfer GH, Datnoff LE, Snyder GH (1999) Silicon nutrition and sugarcane production: a review. *Journal of Plant Nutrition* 22:1853-1903.
- [19] Shi Y, Zhang Y, Yao H, Wu J, Sun H, Gong H (2014) Silicon improves seed germination and alleviates oxidative stress of bud seedlings in tomato under water deficit stress. *Plant Physiology and Biochemistry* 78:27-36.
- [20] Siddiqui MH, Al-Wahaibi MH (2014) Role of nano-SiO₂ in germination of tomato (*Lycopersicon esculentum* seeds Mill.). *Saudi journal of biological sciences* 21:13-17.
- [21] Sitharaman B ed (2016) *Nanobiomaterials handbook*. CRC Press.
- [22] Vaculík M, Lux A, Luxová M, Tanimoto E, Lichtscheidl I (2009) Silicon mitigates cadmium inhibitory effects in young maize plants. *Environmental and Experimental Botany* 67:52-58.
- [23] Zhu Y, Gong H (2014) Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for sustainable development*. 34: 455-472.

