

## اثر کوتاه مدت ذرات نانوسیلیکون بر برخی ویژگی‌های بافت شناختی و فیزیولوژیکی گیاه جودوسر (*Avean sativa L.*) و مقایسه آن با اثر سیلیکات سدیم

فریده عسگری<sup>\*</sup>، احمد مجد، پریسا جنوبی و فرزانه نجفی

ایران، تهران، دانشگاه خوارزمی، گروه علوم گیاهی

تاریخ دریافت: ۹۷/۱/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۷/۸/۱۵

### چکیده

گسترش استفاده از نانومواد از جمله نانوسیلیکون در صنعت، پزشکی و کشاورزی خطر ورود آنها به محیط‌زیست را افزایش داده، بنابراین بررسی اثرات احتمالی آنها بر موجودات زنده از جمله گونه‌های گیاهی ضروری به نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر اثر نانوسیلیکون بر فاکتورهای رشد، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و آناتومی گیاه جودوسر (*Avean sativa L.*) در مقایسه با سیلیکات سدیم بررسی شد. آزمایش‌ها در شرایط آزمایشگاهی و با چهار غلظت ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ میلی‌مولار سیلیکات سدیم و نانوسیلیکون به اجرا درآمد و گیاهان تنها به مدت ۷ روز در مرحله جوانی زنی سیلیکون را دریافت کردند. نتایج نشان دادند که نانوسیلیکون اثر منفی و سمی بر رشد و ساختار بافتی گیاهان تیمار شده نداشته و در بسیاری از صفات اندازه‌گیری شده نیز اثرات مثبتی را در مقایسه با گروه شاهد برجای گذاشت. بهبود رشد برگ‌ها و خصوصاً سلول‌های غلاف‌آوندی، قطر دهانه‌آوندی، افزایش ضخامت دیواره سلولی آوندچوب و همچنین افزایش قطر ساقه، قطب‌های آوندی و دهانه‌آوندی‌ثانویه همگی از آثار قرارگیری در معرض نانوسیلیکون و سیلیکات بود. برخلاف برگ و ساقه، هردو شکل سیلیکون به کاررفته در یک نگاه کلی، اثرات مثبت معنی‌داری را بر صفات اندازه‌گیری شده در ریشه نداشتند. افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموژاز در حضور نانوسیلیکون با افزایش معنی‌دار ضخامت دیواره سلولی نسبت به سایر تیمارها همراه بود که ارتباط فعالیت این آنزیم و سنتز لیگنین در دیواره را نشان می‌داد. تغییرات مشاهده شده در گیاهان تیمار شده، با وجود کوتاه بودن زمان تیمار، می‌تواند نشان‌دهنده القای ژن‌های متعدد درگیر در رشد گیاه توسط سیلیکون در همان ابتدای جوانه‌زنی باشند. در نهایت با نگاهی کلی به نتایج می‌توان گفت تاثیر مثبت سیلیکات سدیم بر صفات رویشی و تشریحی به مراتب بیشتر از نانوسیلیکون بود.

واژه های کلیدی: سیلیکون، نانوسیلیکون، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، جودوسر

\* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۲۰۳۶۱۱۶۷۵، پست الکترونیکی: faride.asgari@gmail.com

### مقدمه

نقش حیاتی و گسترده‌ای در اکوسیستم بازی می‌کنند و ممکن است به میزان قابل توجهی در معرض نانومواد قرار گیرند (۳۱). نانوسیلیکون (SiNP) یکی از نانوذراتی است که اخیراً توجه زیادی را به عنوان نانوکود به خود جلب نموده‌است و همچنین در صنعت از جمله در باتری‌های لیتیومی به کار می‌رود (۲۵). سیلیکون عنصری ضروری برای گیاهان نیست ولی اثرات مثبت بسیار زیادی بر رشد و میزان محصول گیاهان کشاورزی و همچنین مقاومت آنها

نانو مواد شامل ذرات بین ۱-۱۰۰ نانومتر هستند که ویژگی و اثرات آنها علاوه بر ترکیب شیمیایی، تحت تاثیر اندازه آنها نیز می‌باشد (۲۴). گسترش سریع نانو تکنولوژی در سال‌های اخیر توجه زیادی را به اثر نانومواد روی محیط به خود جلب نموده‌است. با توجه به استفاده گسترده از نانومواد در محصولات مصرفی، رها شدن آنها در محیط اجتناب‌ناپذیر است، جایی که سرنوشت و رفتار آنها به میزان بسیار زیادی ناشناخته است. جمعیت‌های گیاهی

صورت گرفته تا کنون تاثیر نانوذرات سیلیکون بر ساختار سلول و بافت گیاهان به میزان کافی بررسی نشده است. تنها در پژوهشی که اخیراً صورت گرفته است، Nazaralian و همکاران (۲۹) تاثیر آن را بر سلول‌های آوند چوب گیاه شنبلیله بررسی کردند.

با بررسی پژوهش‌های پیشین در مورد اثر SiNP بر گیاهان، این پرسش مطرح می‌گردد که اگر گیاهان مدت زمان کوتاهی در معرض غلظت‌های نسبتاً بالای SiNP قرار گیرند، چه تغییراتی در مراحل بعدی رشد می‌تواند در آنها اتفاق بیافتد. بنابراین اهداف پژوهش حاضر بررسی اثر کوتاه مدت نانوذرات سیلیکون بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، محتوی پروتئین و ساختار تشریحی اندام‌های رویشی گیاه جودوسر و مقایسه آن با اثر سیلیکات سدیم می‌باشد. گیاه جودوسر یکی از گیاهان تیره گندمیان است که مانند سایر اعضای این خانواده سیلیکون را به میزان بالایی در خود جمع می‌کند. این گیاه علاوه بر ارزش غذایی اهمیت زیادی در حوزه پزشکی و تولید لوازم آرایشی - بهداشتی دارد.

### مواد و روشها

**شرایط کشت:** بذرهای گیاه جودوسر از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شده و پس از همسان سازی وزنی به وسیله محلول هیپوکلریت سدیم ۵ درصد (۷/۷) (دارای ۵ درصد کلر فعال) بمدت ۲۰ دقیقه و سپس اتانول ۷۰ درصد (۷/۷) بمدت ۳۰ ثانیه استریل شدند. پس از هر مرحله سه بار شستشو با آب مقطر استریل بمدت ۳۰ ثانیه صورت گرفت. ۱۵ بذر روی کاغذ صافی استریل درون پتری دیش‌های ۱۰ سانتی متری حاوی ۵ میلی‌لیتر آب مقطر استریل (گروه شاهد) و چهار غلظت (۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ میلی‌مولار) از محلول سیلیکات سدیم و نانوذرات سیلیکون در دمای  $25 \pm 2$  درجه سانتی گراد و شرایط روشنائی/تاریکی ۸/۱۶ ساعت کشت شدند. مدت زمان تیماردهی گیاهان محدود به دوران جوانی زنی بوده و دانه

در برابر تنش‌های زیست محیطی دارد. این عنصر با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان موجب افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های زیست محیطی می‌گردد (۱)، ۲ و ۲۶). هم‌چنین رسوب این عنصر در دیواره سلول‌های گیاهی موجب مقاومت بافتی در برابر حشرات گیاهخوار می‌گردد. رسوب این عنصر در قاعده برگ‌ها موجب افزایش ایستایی برگ در برابر نور و در نتیجه فعالیت بهتر فتوسنتزی گیاه می‌گردد (۱۴).

در مورد اثر SiNP بر گیاهان پژوهش‌های اندکی صورت گرفته است که نتایج گوناگونی را نشان داده اند. با توجه به اندازه SiNP به کار رفته و گونه گیاهی، اثرات مثبت و منفی بر روی گیاهان گزارش شده است. نانوذرات کوچکتر از ۲۰ نانومتر (کوآنوم دات‌ها) تاثیر منفی بر جوانه زنی و رشد گیاه برنج داشتند، ولی SiNP‌های بزرگتر از ۲۰ نانومتر اثر مثبتی را در پژوهش فوق بر گیاه برنج نشان دادند (۲۸). برخلاف پژوهش پیشین، Siddiqui و Al-Whaibi (۳۵) در پژوهش خود نشان دادند که SiNP با اندازه ۱۲ نانومتر جوانه زنی گیاه گوجه فرنگی را افزایش داد. در حالی که Le و همکاران (۲۳) اثر سمی SiNP‌های ۳۰ نانومتری را بر گیاه کتان گزارش کردند. هم‌چنین این نانوذرات با اندازه بیش از ۲۰ نانومتر بر بقای تک سلولی *Pesudokirchneriella subcapitata* نیز اثر منفی گذاشتند (۴۰). اما گزارش‌هایی نیز وجود دارند که نشان می‌دهند اثر این نانوذره بر رشد و فیزیولوژی گیاهان تقریباً مشابه سیلیکون توده‌ای اما با شدتی متفاوت می‌باشد (۲۹ و ۳۸). هم‌چنین گزارش‌های اخیر نشان می‌دهند که نانوذرات سیلیکون موجب کاهش اثرات منفی تنش‌های زیست محیطی مانند شوری می‌گردند (۳۹).

سیلیکون علاوه بر فیزیولوژی گیاهان، بر ساختار سلولی و بافتی آنان نیز اثر می‌گذارد. این عنصر انعطاف پذیری دیواره را افزایش داده (۲۱) و موجب افزایش قطر دهانه آوندهای چوب نیز می‌گردد (۲۹). با توجه به بررسی منابع

فوق توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر بمدت ۳ دقیقه خوانده شد (۲۲).

محلول واکنش برای سنجش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) شامل ۵۰ میلی‌مولار بافر فسفات پتاسیم (pH= 7.5)، ۱۳ میلی‌مولار متیونین، ۷۵ میکرومول NBT (Nitroblue tetrazolium chlorid)، ۴ میکرومول ربیوفلاوین و ۰/۱ میلی‌مولار EDTA بود. به ۱۰۰ میکرولیتر عصاره استخراج شده، ۲/۹ میلی‌مولار از مخلوط واکنش اضافه شد، ترکیب حاصله بمدت ۲۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد توسط دو لامپ فلورسنت ۲۰ وات بمدت ۱۵ دقیقه نوردهی شد. جذب مخلوط واکنش در طول موج ۵۶۰ نانومتر تعیین شد (۱۷).

برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز، مخلوط واکنش حاوی ۱۰۰ میلی‌مولار بافر فسفات پتاسیم (pH= 7)، ۱۵ میلی‌مولار  $H_2O_2$  و ۱۰۰ میلی‌مولار عصاره آنزیمی در حجم ۳ میلی‌لیتر بود. واکنش در طول موج ۲۴۰ نانومتر برای مدت ۳ دقیقه اندازه‌گیری شد (۳). فعالیت کلیه آنزیم‌ها به عنوان واحد آنزیم در گرم وزن تر ( $U\ g^{-1}\ fw$ ) محاسبه گردید.

**بررسی‌های بافت‌شناسی:** برای بررسی‌های بافت‌شناسی ۱ سانتی‌متر از میانه برگ و یک سانتی‌متر از میانه میانگره ششم و یک سانتی‌متر در فاصله ۸-۹ سانتی‌متر از نوک ریشه بصورت دستی برش عرضی گرفته شد. سپس برش‌ها با رنگ آمیزی مضاعف متیلن‌بلو-کارمن زاجی رنگ آمیزی شدند و با میکروسکوپ نوری مدل (Zeiss، آلمان) مشاهده و با دوربین دیجیتال تصویربرداری شدند. صفات بافتی توسط نرم افزار Micro measure 3.3 اندازه‌گیری شدند.

**آنالیز آماری:** آنالیز واریانس (ANOVA) برای تمام داده‌های آزمایش در این کار با استفاده از نرم افزار SPSS-19 انجام شد. اختلاف میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ( $P < 0.05$ ) مقایسه گردید و خطای استاندارد

رست‌های ۷ روزه پس از همگن‌سازی به گلدان‌های ۱/۵ لیتری حاوی محلول غذایی لانگشتاین (۲۰) بدون افزودن هیچ غلظتی از سیلیکات‌سدیم و نانو سیلیکون انتقال یافتند و پس از چهار هفته گیاهان منتخب برای بررسی‌های بافت‌شناختی و فیزیولوژیکی برداشت شدند.

سیلیکات‌سدیم بصورت تری‌سیلیکات سدیم ( $Na_2SiO_3$ ؛ شرکت سیگما) و نانوذرات سیلیکون بصورت پودر  $SiO_2$  (شرکت US Research Nanomaterials, INS) استفاده شدند. سونیکاسیون SiNP‌ها توسط دستگاه اولتراسونیکاتور در طول موج ۱۰ مگاهرتز بمدت ۴۰ دقیقه در آب صورت گرفت و در نهایت محلول تقریباً یکنواختی از این ذرات به دست آمد. کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه و در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار انجام شد.

**فاکتورهای رشد:** گیاهان ۴ هفته‌ای برداشت شده و طول ریشه و اندام هوایی و هم‌چنین وزن تر ریشه و اندام هوایی گیاهان اندازه‌گیری شد. سپس بمدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و وزن خشک آنها اندازه‌گیری شد.

**محتوی پروتئین کل:** نمونه برگ‌های تازه در نیتروژن مایع پودر شدند و با بافر فسفات پتاسیم (pH= 6.8, 0.1 M) حاوی ۱ میلی‌مولار EDTA هموژنیزه گردیدند. محلول فوق بمدت ۲۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد با دور ۱۲۰۰۰ سانتریفوژ شده و سپس محلول رویی برای سنجش پروتئین کل به روش برادفورد استفاده شد (۸).

**سنجش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی:** عصاره سلولی تهیه شده برای سنجش پروتئین کل برای سنجش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی استفاده شد. برای سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز (POD)، به ۱۰۰ میکرولیتر عصاره استخراج شده، ۲/۹ میلی‌لیتر محلول واکنش حاوی ۱ میلی‌لیتر بافر فسفات (25 mM, pH= 6.8)، ۵۰ میکرولیتر گایاکول، ۵۰ میکرولیتر  $HO_2$  اضافه شد. جذب محلول

گروه شاهد بود و وزن خشک اندام هوایی نیز در بین تیمارهای SiNP تنها در غلظت ۱۰ میلی‌مولار افزایش نشان داد. تیمار گیاهان با سیلیکات سدیم و SiNP وزن خشک ریشه را افزایش نداد. وزن خشک ریشه تیمارهای ۷/۵ و ۱۰ میلی‌مولار سیلیکات و ۱۰ میلی‌مولار SiNP تفاوت معنی‌داری با گروه شاهد نداشت و سایر تیمارها موجب کاهش وزن خشک ریشه شدند. طول اندام هوایی گیاهان تحت تیمار نسبت به گروه شاهد افزایش یافت و این افزایش در غلظت‌های ۱۰ میلی‌مولار هر دو نوع سیلیکون به کار رفته چشم‌گیرتر بود. در این صفت نیز تیمارهای سیلیکات عملکرد بهتری را نشان دادند و به غیر از تیمار ۱۰ میلی‌مولار SiNP، سایر غلظت‌های به کار رفته اندام هوایی کوتاه‌تری داشتند.

میانگین‌ها ( $\pm$ SE) در جدول‌ها و نمودار نشان داده شده‌است.

## نتایج

**فاکتورهای رشد:** اندازه‌گیری فاکتورهای رشد گیاهان شاهد و تحت تیمار نشان داد که به طور کلی تیمار کوتاه مدت گیاهان با سیلیکات و SiNP تاثیر مثبتی بر افزایش رشد گیاهان داشت و هم‌چنین تاثیر سیلیکات بهتر از SiNP بود (جدول ۱). وزن تر و خشک اندام هوایی و وزن تر ریشه تقریباً در تمام غلظت‌های به کار رفته سیلیکات سدیم افزایش یافته بود. ولی تنها در غلظت‌های ۲/۵ و ۱۰ میلی‌مولار SiNP وزن تر اندام هوایی (بترتیب ۰/۲۹ و ۰/۳۷ گرم) و وزن تر ریشه (۰/۴۱ و ۰/۴۵ گرم) بیشتر از

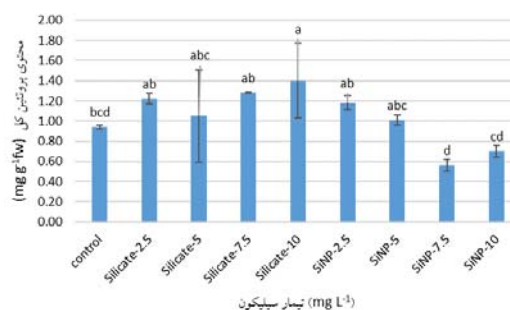
جدول ۱- مقایسه میانگین صفات ریخت‌شناسی و رشدی در گیاهان شاهد و تحت تیمار سیلیکات سدیم و SiNP.

تیمارها	وزن تر اندام هوایی (g)	وزن خشک اندام هوایی (g)	وزن تر ریشه (g)	وزن خشک ریشه (g)	طول اندام هوایی (cm)	طول ریشه (cm)
Control	۰/۲۳ ± ۰/۰۰ <sup>d</sup>	۰/۲۳۷ ± ۰/۰۰۱ <sup>c</sup>	۰/۳۶ ± ۰/۰۱ <sup>f</sup>	۰/۱۴ ± ۰/۰۰۱ <sup>a</sup>	۲۷/۸۰ ± ۲/۳۷ <sup>e</sup>	۲۰/۴۴ ± ۰/۸۹ <sup>bc</sup>
Silicate 2.5	۰/۳۸ ± ۰/۱۳ <sup>b</sup>	۰/۵۲ ± ۰/۰۲۲ <sup>a</sup>	۰/۳۸ ± ۰/۰۱ <sup>ef</sup>	۰/۰۱ ± ۰/۰۰ <sup>e</sup>	۴۸/۰۰ ± ۰/۸۹ <sup>bc</sup>	۱۶/۸۰ ± ۱/۱۵ <sup>de</sup>
Silicate 5	۰/۴۰ ± ۰/۰۱ <sup>b</sup>	۰/۵۲ ± ۰/۰۰ <sup>a</sup>	۰/۴۹ ± ۰/۰۱ <sup>b</sup>	۰/۱۲ ± ۰/۰۰ <sup>bcd</sup>	۴۹/۱۶ ± ۱/۶۳ <sup>b</sup>	۲۰/۹۲ ± ۰/۸۶ <sup>ab</sup>
Silicate 7.5	۰/۴۵ ± ۰/۰۲ <sup>a</sup>	۰/۴۶ ± ۰/۰۰ <sup>b</sup>	۰/۴۳ ± ۰/۰۲ <sup>cd</sup>	۰/۱۲ ± ۰/۰۰ <sup>abc</sup>	۴۸/۶۸ ± ۱/۱۵ <sup>b</sup>	۱۹/۷۴ ± ۰/۶۱ <sup>bc</sup>
Silicate 10	۰/۴۰ ± ۰/۰۱ <sup>b</sup>	۰/۵۵ ± ۰/۰۰ <sup>a</sup>	۰/۵۳ ± ۰/۰۱ <sup>a</sup>	۰/۱۳ ± ۰/۰۰ <sup>ab</sup>	۵۳/۸۰ ± ۱/۴۵ <sup>a</sup>	۲۳/۲۰ ± ۰/۹۸ <sup>a</sup>
SiNP 2.5	۰/۲۹ ± ۰/۰۱ <sup>c</sup>	۰/۳۵ ± ۰/۰۰ <sup>c</sup>	۰/۴۱ ± ۰/۰۱ <sup>de</sup>	۰/۱۲ ± ۰/۰۰ <sup>bcd</sup>	۴۴/۲۸ ± ۱/۱۰ <sup>c</sup>	۱۷/۹۰ ± ۱/۱۰ <sup>cd</sup>
SiNP 5	۰/۲۲ ± ۰/۰۱ <sup>d</sup>	۰/۲۹ ± ۰/۰۰ <sup>d</sup>	۰/۳۸ ± ۰/۰۱ <sup>ef</sup>	۰/۱۱ ± ۰/۰۰ <sup>de</sup>	۳۹/۵۶ ± ۰/۶۷ <sup>d</sup>	۱۴/۹۲ ± ۰/۵۵ <sup>e</sup>
SiNP 7.5	۰/۲۵ ± ۰/۰۱ <sup>d</sup>	۰/۳۶ ± ۰/۰۰ <sup>c</sup>	۰/۳۲ ± ۰/۰۲ <sup>g</sup>	۰/۱۲ ± ۰/۰۰ <sup>cd</sup>	۴۴/۴۶ ± ۱/۲۸ <sup>c</sup>	۱۸/۹۰ ± ۰/۸۶ <sup>bcd</sup>
SiNP 10	۰/۳۷ ± ۰/۰۱ <sup>b</sup>	۰/۴۵ ± ۰/۰۰ <sup>b</sup>	۰/۴۵ ± ۰/۰۱ <sup>c</sup>	۰/۱۳ ± ۰/۰۰ <sup>abc</sup>	۵۴/۵۶ ± ۱/۸۹ <sup>a</sup>	۱۹/۷۶ ± ۰/۸۸ <sup>bc</sup>

حروف مشترک بیانگر اختلاف غیرمعنی‌دار تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

تیمارهای سیلیکات و SiNP به طور کلی تاثیر چشم‌گیری بر طول ریشه گیاهان تحت تیمار نداشتند، به غیر از تیمار ۱۰ میلی‌مولار سیلیکات که ریشه بلندتری نسبت به گروه شاهد داشت، سایر تیمارها یا تفاوتی نسبت به گروه شاهد نداشتند یا ریشه آنها کوتاه‌تر بود. در این صفت نیز نتایج به دست آمده در گیاهان تحت تیمار سیلیکات سدیم بهتر از تیمارهای SiNP بودند.

**محتوی پروتئین:** بررسی محتوی پروتئین گیاهان نشان داد که به غیر از غلظت ۱۰ میلی‌مولار سیلیکات سدیم که



شکل ۱- محتوی پروتئین کل در گروه کنترل در گیاهان کنترل و تحت تیمار سیلیکات سدیم و SiNP. حروف مشترک بیانگر اختلاف غیر-معنی‌دار تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

میلی‌مولار سیلیکات‌سدیم، فعالیت آنزیم SOD نسبت به گروه شاهد وسایر تیمارها بیشتر بود. ولی فعالیت آن در تیمارهای ۲/۵ و ۱۰ میلی‌مولار سیلیکات و ۲/۵ میلی‌مولار SiNP کاهش نشان داد. غلظت‌های ۲/۵ و ۷/۵ میلی‌مولار سیلیکات دارای بیشترین فعالیت POD نسبت به گروه شاهد و سایر تیمارها بودند. گیاهان تحت تیمار بالاترین غلظت SiNP و سیلیکات‌سدیم دارای کمترین فعالیت آنزیم POD بودند و در سایرین تغییری در فعالیت این آنزیم مشاهده نشد. فعالیت آنزیم کاتالاز نیز در بیشتر تیمارها نسبت به گروه شاهد کاهش یافت، به غیر از غلظت‌های ۲/۵ و ۷/۵ میلی‌مولار سیلیکات که افزایش فعالیت این آنزیم را نشان دادند.

نسبت به گروه شاهد افزایش محتوی پروتئین را نشان داد، سایر گیاهان تحت تیمار نسبت به گروه شاهد تفاوتی نشان ندادند (شکل ۱). شیب کاهش محتوی پروتئین با افزایش غلظت SiNP و افزایش محتوی پروتئین با افزایش غلظت سیلیکات‌سدیم مشاهده شد. به نظر می‌رسد تاثیر سیلیکات‌سدیم نسبت به گروه شاهد پررنگ‌تر از SiNP بود.

**فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان:** تیمار گیاهان با هردو شکل سیلیکون، به غیر از چند استثنا یا تاثیری بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی POD و CAT نداشت و یا موجب کاهش فعالیت این آنزیم‌ها شد (جدول ۲). در گیاهان تیمار شده با غلظت ۵-۱۰ میلی‌مولار SiNP و غلظت ۵

جدول ۲- سنجش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان شاهد و تحت تیمار سیلیکات‌سدیم و SiNP.

تیمارها (mM)	SOD (U/g fw)	POD (U/g fw)	CAT (U/g fw)
Control	۴۹/۱۸ ± ۵/۱۷ <sup>cd</sup>	۱۶/۵۰ ± ۰/۷۵ <sup>b</sup>	۸/۱۰ ± ۰/۳۱ <sup>c</sup>
Silicate 2.5	۳۴/۶۶ ± ۱/۶۵ <sup>f</sup>	۲۲/۵۰ ± ۰/۷۵ <sup>a</sup>	۱۱/۴۶ ± ۰/۲۹ <sup>a</sup>
Silicate 5	۵۳/۲۶ ± ۰/۹۰ <sup>b</sup>	۱۴/۱۰ ± ۱/۵۶ <sup>bc</sup>	۷/۵۲ ± ۰/۲۷ <sup>d</sup>
Silicate 7.5	۴۸/۴۶ ± ۰/۴۲ <sup>d</sup>	۲۰/۱۷ ± ۱/۳۷ <sup>a</sup>	۹/۸۳ ± ۰/۱۶ <sup>b</sup>
Silicate 10	۳۷/۴۲ ± ۱/۵۸ <sup>f</sup>	۱۲/۰۰ ± ۰/۴۶ <sup>cd</sup>	۶/۳۷ ± ۰/۱۱ <sup>f</sup>
SiNP 2.5	۴۲/۳۳ ± ۱/۴۳ <sup>e</sup>	۱۶/۵۰ ± ۰/۴۰ <sup>b</sup>	۴/۵۳ ± ۰/۱۸ <sup>g</sup>
SiNP 5	۵۸/۸۹ ± ۱/۴۹ <sup>a</sup>	۹/۶۰ ± ۰/۴۶ <sup>d</sup>	۷/۲۳ ± ۰/۱۲ <sup>de</sup>
SiNP 7.5	۵۲/۴۵ ± ۰/۶۴ <sup>b</sup>	۱۳/۸۰ ± ۰/۲۳ <sup>bc</sup>	۶/۷۱ ± ۰/۲۶ <sup>ef</sup>
SiNP 10	۵۲/۷۶ ± ۰/۶۲ <sup>b</sup>	۱۲/۳۰ ± ۰/۶۴ <sup>cd</sup>	۶/۶۲ ± ۰/۲۶ <sup>ef</sup>

حروف مشترک بیانگر اختلاف غیرمعنی‌دار تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

یکسان بود و گیاهان تحت تیمار نسبت به گروه شاهد دارای دهانه آوندی ثانویه بزرگتری بودند. ضخامت دیواره سلولی در حضور سیلیکون نسبت به گروه شاهد افزایش یافت و این افزایش در گیاهان تحت تیمار SiNP چشم‌گیرتر بود.

نتایج بررسی سلول‌های غلاف آوندی نشان دادند که قطر این سلول‌ها در حضور سیلیکون تقریباً در تمام تیمارها افزایش یافته بود. تنها در غلظت ۵ میلی‌مولار سیلیکات‌سدیم، قطر سلول غلاف آوندی تفاوت معنی‌داری با گروه شاهد نداشت.

**بافت‌شناسی:** در بررسی برش‌های برگی (جدول ۳) مشخص شد که پهنای برگ در تمامی گیاهان تحت تیمار نسبت به گروه شاهد افزایش یافته بود و این افزایش در گیاهان تحت تیمار سیلیکات‌سدیم (شکل ۲، A-E) بیشتر از گیاهان تحت تیمار SiNP (شکل ۳، A-E) بود. بالاترین غلظت‌های به کار رفته در سیلیکات‌سدیم و SiNP (۱۰ میلی‌مولار) برگ پهن‌تری نسبت به سایر تیمارها داشتند. قطر دهانه آوندی اولیه نیز در تمام گیاهان تحت تیمار نسبت به گروه شاهد افزایش یافته بود. تاثیر هر دو نوع سیلیکون به کار رفته روی دهانه آوندی ثانویه تقریباً

در غلظت‌های پایین سیلیکات‌سدیم (۲/۵ و ۵ میلی‌مولار) اندازه سلول‌های حبابی نسبت به گروه شاهد افزایش یافت، ولی غلظت‌های بالای آن اندازه سلول‌های حبابی را کاهش داد. اندازه سلول‌های حبابی در گیاهان تحت تیمار SiNP

جدول ۳- مقایسه میانگین صفات تشریحی برگ در گیاهان شاهد و تحت تیمار سیلیکات‌سدیم و SiNP.

تیمارها (mM)	پهنای برگ (mm)	قطر دهانه آوندی اولیه (μm)	قطر دهانه آوندی ثانویه (μm)	ضخامت نسبی دیواره آوند چوب (μm)	قطر سلول غلاف- آوندی (μm)	قطر سلول حبابی (μm)
Control	۴/۷۴ ± ۰/۲۴ <sup>f</sup>	۴/۱۷ ± ۰/۰۹ <sup>f</sup>	۱۸/۲۶ ± ۰/۳۶ <sup>f</sup>	۱/۷۲ ± ۰/۰۴ <sup>e</sup>	۳۸/۱۹ ± ۰/۹۴ <sup>cd</sup>	۵۰/۲۱ ± ۰/۶۴ <sup>bc</sup>
Silicate 2.5	۷/۴۶ ± ۰/۰۹ <sup>d</sup>	۱۰/۴۰ ± ۰/۸۴ <sup>a</sup>	۳۶/۶۴ ± ۰/۲۷ <sup>a</sup>	۲/۰۹ ± ۰/۰۹ <sup>d</sup>	۴۸/۰۶ ± ۱/۷۶ <sup>a</sup>	۶۱/۸۲ ± ۲/۵۸ <sup>a</sup>
Silicate 5	۷/۲۲ ± ۰/۰۶ <sup>d</sup>	۹/۹۹ ± ۰/۲۳ <sup>a</sup>	۳۴/۱۶ ± ۰/۸۹ <sup>bcd</sup>	۲/۵۸ ± ۰/۱۸ <sup>c</sup>	۳۶/۷۳ ± ۰/۶۹ <sup>d</sup>	۵۷/۷۴ ± ۰/۷۲ <sup>a</sup>
Silicate 7.5	۸/۷۰ ± ۰/۰۹ <sup>a</sup>	۱۰/۰۰ ± ۰/۴۴ <sup>a</sup>	۳۴/۶۳ ± ۰/۷۹ <sup>bc</sup>	۲/۴۹ ± ۰/۰۴ <sup>c</sup>	۴۸/۹۸ ± ۳/۷۳ <sup>a</sup>	۴۲/۷۹ ± ۲/۱۲ <sup>d</sup>
Silicate 10	۷/۹۹ ± ۰/۴۶ <sup>bc</sup>	۹/۱۹ ± ۰/۳۶ <sup>ab</sup>	۲۸/۵۹ ± ۰/۴۱ <sup>e</sup>	۲/۴۵ ± ۰/۰۳ <sup>c</sup>	۴۱/۷۲ ± ۰/۶۷ <sup>b</sup>	۴۴/۹۳ ± ۱/۲۳ <sup>d</sup>
SiNP 2.5	۶/۳۸ ± ۰/۰۸ <sup>e</sup>	۷/۰۸ ± ۰/۱۸ <sup>d</sup>	۳۲/۶۱ ± ۰/۴۱ <sup>d</sup>	۲/۳۷ ± ۰/۱۲ <sup>cd</sup>	۴۴/۷۸ ± ۰/۶۴ <sup>ab</sup>	۴۶/۴۵ ± ۰/۸۵ <sup>cd</sup>
SiNP 5	۷/۶۱ ± ۰/۰۵ <sup>cd</sup>	۸/۹۰ ± ۰/۱۷ <sup>bc</sup>	۳۶/۷۸ ± ۰/۲۶ <sup>a</sup>	۳/۴۸ ± ۰/۰۶ <sup>a</sup>	۴۵/۷۱ ± ۱/۲۴ <sup>ab</sup>	۶۱/۱۵ ± ۲/۱۲ <sup>a</sup>
SiNP 7.5	۶/۰۵ ± ۰/۰۵ <sup>e</sup>	۸/۱۵ ± ۰/۱۳ <sup>c</sup>	۳۳/۷۷ ± ۰/۲۱ <sup>cd</sup>	۳/۰۱ ± ۰/۱۲ <sup>b</sup>	۴۵/۱۳ ± ۰/۵۹ <sup>ab</sup>	۵۲/۲۲ ± ۰/۲۵ <sup>b</sup>
SiNP 10	۸/۰۸ ± ۰/۰۳ <sup>b</sup>	۵/۷۸ ± ۰/۱۹ <sup>e</sup>	۳۵/۵۲ ± ۰/۷۴ <sup>ab</sup>	۲/۹۴ ± ۰/۰۷ <sup>b</sup>	۴۷/۲۴ ± ۰/۴۶ <sup>a</sup>	۵۲/۳۰ ± ۱/۲۶ <sup>b</sup>

حروف مشترک بیانگر اختلاف غیرمعنی‌دار تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

جدول ۴- مقایسه میانگین صفات تشریحی میانگرمه در گیاهان شاهد و تحت تیمار سیلیکات‌سدیم و SiNP.

تیمارها (mM)	قطر میانگرمه (mm)	قطر دهانه آوندی اولیه (μm)	قطر دهانه آوندی ثانویه (μm)	ضخامت نسبی دیواره آوند چوب (μm)	تعداد قطب‌های آوندی
Control	۱/۱۷ ± ۰/۰۳ <sup>f</sup>	۱۰/۹۶ ± ۰/۵۱ <sup>a</sup>	۳۴/۵۰ ± ۰/۳۷ <sup>d</sup>	۲/۵۸ ± ۰/۱۸ <sup>c</sup>	۲۲/۳۳ ± ۱/۴۵ <sup>e</sup>
Silicate 2.5	۱/۸۵ ± ۰/۰۸ <sup>bcd</sup>	۹/۶۳ ± ۰/۰۸ <sup>bcd</sup>	۳۶/۹۵ ± ۰/۸۶ <sup>c</sup>	۲/۷۷ ± ۰/۰۹ <sup>bc</sup>	۲۲/۰۰ ± ۰/۵۸ <sup>e</sup>
Silicate 5	۲/۲۴ ± ۰/۱۴ <sup>a</sup>	۱۰/۶۶ ± ۰/۱۲ <sup>ab</sup>	۴۲/۳۹ ± ۰/۱۹ <sup>ab</sup>	۲/۹۳ ± ۰/۱۹ <sup>bc</sup>	۲۶/۶۷ ± ۰/۳۳ <sup>c</sup>
Silicate 7.5	۱/۴۵ ± ۰/۰۷ <sup>e</sup>	۷/۸۱ ± ۰/۲۶ <sup>ef</sup>	۳۸/۰۱ ± ۰/۵۴ <sup>c</sup>	۳/۱۹ ± ۰/۲۲ <sup>ab</sup>	۲۲/۳۳ ± ۰/۳۳ <sup>e</sup>
Silicate 10	۲/۰۸ ± ۰/۰۵ <sup>ab</sup>	۱۰/۰۶ ± ۰/۲۸ <sup>abc</sup>	۴۴/۰۰ ± ۰/۶۴ <sup>a</sup>	۳/۷۲ ± ۰/۱۰ <sup>a</sup>	۴۱/۰۰ ± ۰/۵۸ <sup>a</sup>
SiNP 2.5	۲/۱۷ ± ۰/۰۲ <sup>a</sup>	۸/۸۲ ± ۰/۶۳ <sup>de</sup>	۳۳/۶۲ ± ۰/۴۳ <sup>d</sup>	۲/۸۶ ± ۰/۱۳ <sup>bc</sup>	۳۴/۰۰ ± ۰/۵۸ <sup>b</sup>
SiNP 5	۱/۹۳ ± ۰/۰۴ <sup>bc</sup>	۱۰/۲۸ ± ۰/۶۳ <sup>abc</sup>	۴۲/۸۲ ± ۱/۰۲ <sup>ab</sup>	۲/۷۸ ± ۰/۰۷ <sup>bc</sup>	۲۴/۶۷ ± ۰/۳۳ <sup>d</sup>
SiNP 7.5	۱/۷۶ ± ۰/۰۷ <sup>cd</sup>	۹/۲۰ ± ۰/۰۸ <sup>cd</sup>	۴۱/۸۲ ± ۰/۵۰ <sup>b</sup>	۲/۸۹ ± ۰/۲۱ <sup>bc</sup>	۲۰/۶۷ ± ۰/۳۳ <sup>e</sup>
SiNP 10	۱/۶۲ ± ۰/۰۹ <sup>de</sup>	۷/۳۱ ± ۰/۲۹ <sup>f</sup>	۳۰/۲۴ ± ۰/۶۲ <sup>e</sup>	۳/۱۹ ± ۰/۲۷ <sup>ab</sup>	۲۴/۶۷ ± ۰/۳۳ <sup>ab</sup>

حروف مشترک بیانگر اختلاف غیرمعنی‌دار تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

یافت. تیمارهای ۷/۵ میلی‌مولار سیلیکات (شکل ۲- I) و ۱۰ میلی‌مولار SiNP (شکل ۳- J) با قطر تقریبی ۷ میکرومتر دارای کوچکترین دهانه آوندی اولیه بودند. اما قطر دهانه آوندی ثانویه در گیاهان تیمار شده با سیلیکون افزایش چشم‌گیری نسبت به گروه شاهد داشت و تنها غلظت ۱۰ میلی‌مولار SiNP دهانه آوند ثانویه‌ای کوچکتری

بررسی بافت‌شناسی میانگرمه نشان دهنده تاثیر معنی‌دار سیلیکون بر صفات بافتی آن بود (جدول ۴). قطر میانگرمه در همه گیاهان تحت تیمار افزایش یافته‌بود و این افزایش در تیمارهای سیلیکات‌سدیم (شکل ۲، F-J) به نظر بیشتر از تیمارهای SiNP بود. در حضور سیلیکون قطر دهانه آوندی اولیه در میانگرمه بدون تغییر باقی ماند یا کاهش

آوندی متعلق به غلظت ۱۰ میلی‌مولار سیلیکات‌سدیم بود (۴۱ عدد). به غیر از غلظت‌های ۲/۵ (شکل ۵) و ۷/۵ (شکل ۱۱) میلی‌مولار سیلیکات‌سدیم و غلظت ۷/۵ میلی‌مولار SiNP که تغییری نسبت به گروه شاهد نداشتند در سایر تیمارها تعداد قطب‌های آوندی افزایش یافته‌بود.

داشت. تمام گیاهان تحت تیمار سیلیکون در هر دو شکل آن، دارای دیواره آوندی ضخیم‌تری نسبت به گروه شاهد بودند و غلظت‌های بالای سیلیکات‌سدیم (۷/۵ و ۱۰ میلی‌مولار) و غلظت ۱۰ میلی‌مولار SiNP بیشترین ضخامت دیواره آوند چوب را داشتند. بیشترین تعداد قطب

جدول ۵- مقایسه میانگین صفات تشریحی ریشه در گیاهان شاهد و تحت تیمار سیلیکات‌سدیم و SiNP.

تیمارها (mM)	قطر ریشه (mm)	قطر دهانه آوندی اولیه ( $\mu\text{m}$ )	قطر دهانه آوندی ثانویه ( $\mu\text{m}$ )	ضخامت نسبی دیواره آوند چوب ( $\mu\text{m}$ )
Control	$0.25 \pm 461/70$	$30.3 \pm 14/13$	$31.6 \pm 63/11$	$0.16 \pm 2/53$
Silicate 2.5	$14/81 \pm 574/39$	$0.56 \pm 18/31$	$0.46 \pm 72/19$	$0.33 \pm 3/05$
Silicate 5	$5/10 \pm 368/39$	$0.36 \pm 12/73$	$0.86 \pm 36/79$	$0.12 \pm 1/79$
Silicate 7.5	$2/80 \pm 385/38$	$0.64 \pm 12/44$	$0.27 \pm 46/40$	$0.11 \pm 2/26$
Silicate 10	$9/70 \pm 552/27$	$0.41 \pm 21/28$	$0.50 \pm 54/50$	$0.15 \pm 2/72$
SiNP 2.5	$3/36 \pm 633/96$	$0.82 \pm 17/85$	$0.37 \pm 59/84$	$0.08 \pm 3/27$
SiNP 5	$4/98 \pm 381/45$	$0.14 \pm 9/13$	$0.35 \pm 39/46$	$0.24 \pm 1/94$
SiNP 7.5	$1/82 \pm 398/02$	$0.38 \pm 12/62$	$0.15 \pm 43/99$	$0.13 \pm 1/82$
SiNP 10	$0.31 \pm 381/19$	$0.22 \pm 13/12$	$0.19 \pm 43/91$	$0.18 \pm 2/76$

حروف مشترک بیانگر اختلاف غیرمعنی‌دار تیمارها براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

جودوسر نداشت و حتی تعدادی از صفات اندازه‌گیری شده در این پژوهش در حضور SiNP نسبت به گروه شاهد افزایش نشان دادند. ولی مقایسه این نتایج با گیاهان تیمار شده با سیلیکات‌سدیم نشان داد که سیلیکات‌سدیم اثری به مراتب بهتر از SiNP‌ها روی رشد گیاهان دارد. مقایسه وزن تر و خشک اندام هوایی و همچنین محتوی پروتئین کل نشان داد که گیاهان تحت تیمار سیلیکات‌سدیم علاوه بر افزایش محتوی آب، میزان ماده سازی نیز در آنها افزایش یافته‌است. ولی با وجود افزایش طول اندام هوایی، وزن اندام هوایی در گیاهان تیمار شده با SiNP تغییری نکرد. این امر را شاید بتوان به مقدار کربوهیدرات‌های ساختمانی و غیرساختمانی نسبت داد (۹).

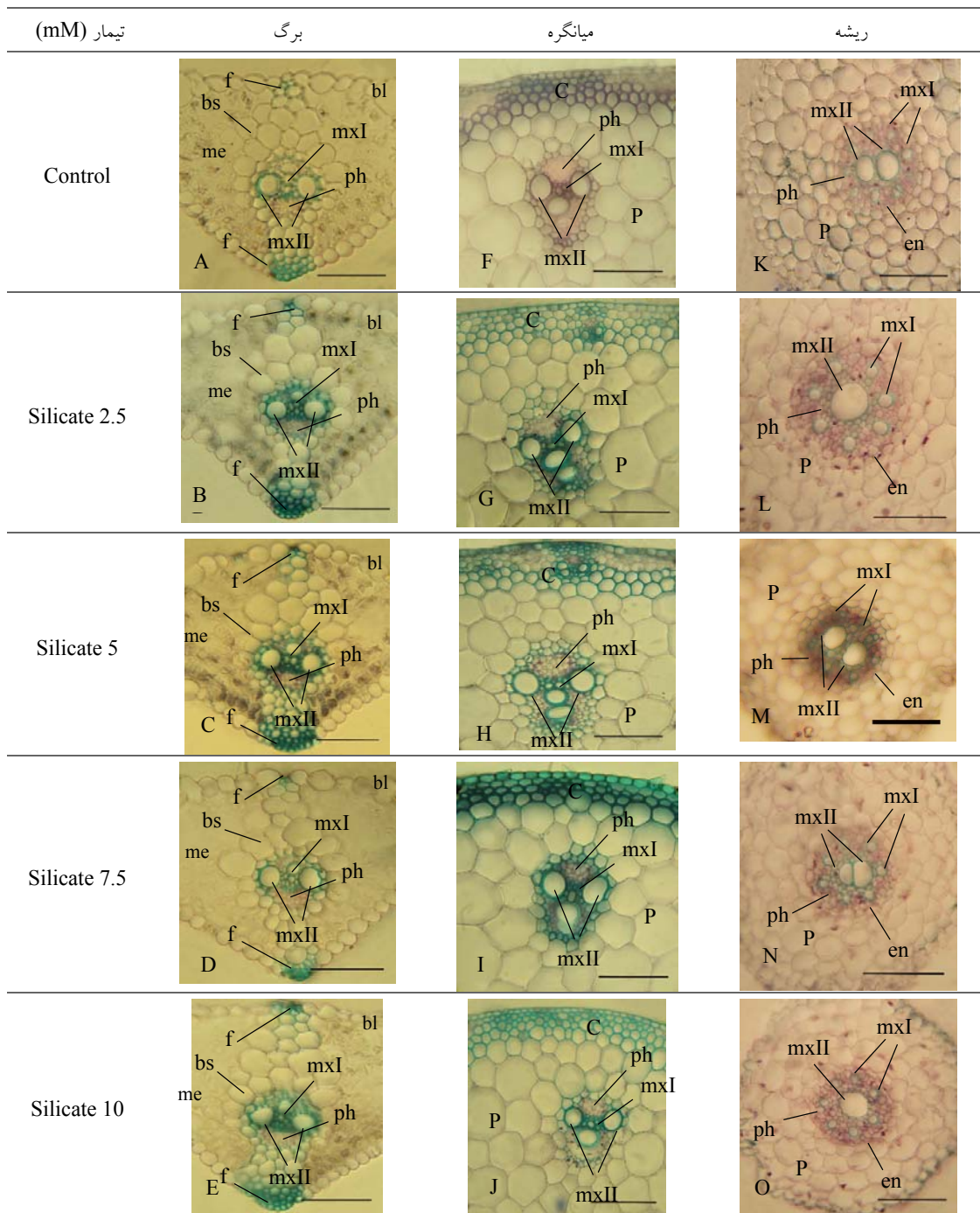
توسعه سلول‌ها خصوصا در برگ معمولا با افزایش کربوهیدرات ساختمانی همراه است، در حالی که افزایش وزن برگ با افزایش کربوهیدرات ساختمانی و غیر ساختمانی همراه است (۹) بنابراین ممکن است عدم

ساختار بافت‌شناسی ریشه در حضور سیلیکون چندان افزایش نیافت (جدول ۵، شکل‌های ۲ و ۳-K-O). قطر ریشه تنها در غلظت ۲/۵ و ۱۰ میلی‌مولار سیلیکات و ۷/۵ میلی‌مولار SiNP (شکل ۳-L) افزایش داشت و در سایر تیمارها نسبت به شاهد کاهش یافته‌بود. قطر دهانه آوندی اولیه نیز مانند قطر ریشه تنها در سه غلظت اشاره شده افزایش نشان داد و در سایر غلظت‌ها بدون تغییر باقی مانده یا کوچکتر از گروه شاهد بود. دهانه آوند ثانویه در غلظت ۲/۵ میلی‌مولار سیلیکات‌سدیم بزرگتر از گروه شاهد بود و در سایر تیمارها اندازه آن کاهش یافت. ضخامت دیواره در گیاهان تحت تیمار ۲/۵ میلی‌مولار SiNP بیشتر از گروه شاهد بود. ولی سایر تیمارها بدون تغییر باقی مانده یا کاهش یافته‌بودند.

### بحث و نتیجه‌گیری

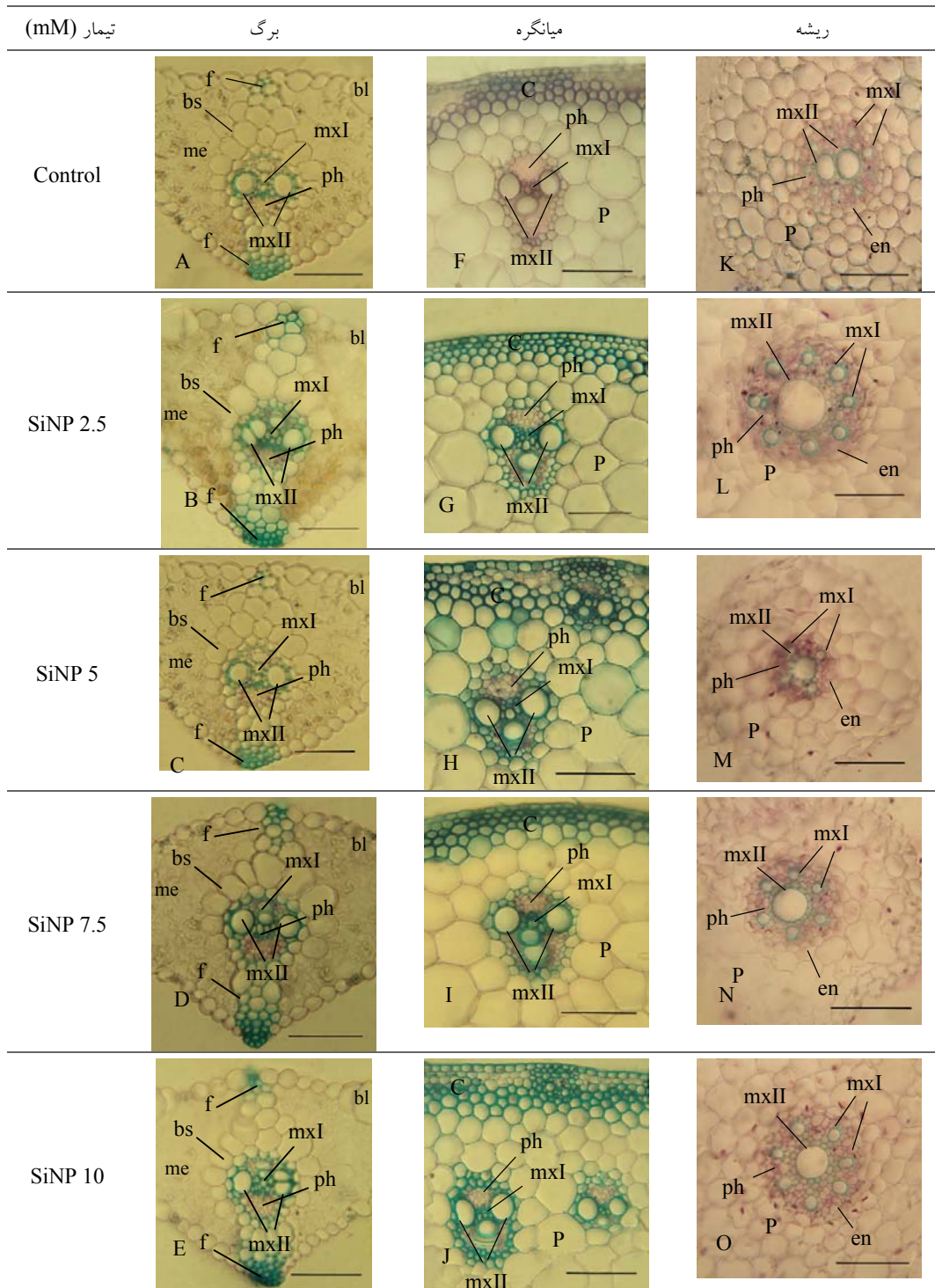
نتایج پژوهش حاضر نشان دادند که تیمار کوتاه مدت گیاهان با غلظت‌های مختلف SiNP اثرات سمی روی گیاه

افزایش وزن گیاهان تحت تیمار SiNP را بتوان به کاهش کربوهیدرات‌های غیر ساختمانی در این گیاهان نسبت داد.



شکل ۲- برش عرضی از برگ، میانگره و ریشه گیاهان شاهد و تحت تیمار سیلیکات سدیم. bs = غلاف آوندی؛ en = اندودرم؛ me = مزوفیل؛ f = فیبر؛ mxI = متاکزیلم اولیه؛ mxII = متاکزیلم ثانویه؛ p = پارانشیم؛ ph = فلوئم و c = کلانشیم. نوار مقیاس: ۱۰۰ میکرومتر.





شکل ۳- برش عرضی از برگ (تصاویر A-E)، میانگره (F-J) و ریشه (K-O) گیاهان شاهد و تحت تیمار SiNP. bs=غلاف‌آوندی؛ en=اندودرم؛ me=مزوفیل؛ f=فیبر؛ mxI=متاکزیلم اولیه؛ mxII=متاکزیلم ثانویه؛ p=پارانسیم؛ ph=فلوئم و C=کلانشیم. نوار مقیاس: ۱۰۰ میکرومتر.

از طرفی دانه گیاه نیز پیش از جوانه‌زنی دارای ذخایر سیلیکون می‌باشد که این خود می‌تواند هنگام جوانه‌زنی تاثیر مثبتی بر دانه رست داشته باشد و به همین دلیل تفاوتی میان وزن خشک گیاه شاهد و غلظت‌های کمتر از ۱۰ میلی‌مولار SiNP دیده نشد. نظرعلیان و همکاران (۲۹) در پژوهش خود کاهش وزن خشک گیاه شنبلیله را در حضور سیلیکات‌سدیم و SiNP گزارش کردند که با نتایج پژوهش حاضر همسویی نداشت. افزایش محتوی آب گیاه و بهینه‌شدن مصرف آن در حضور سیلیکون در نوشتارهای پیشین نیز گزارش شده‌است (۱۸) که نتایج پژوهش حاضر نیز همین اثر SiNP را بر گیاهان تحت تیمار نشان دادند. یکی از دلایل مهم افزایش محتوی آب گیاه جلوگیری از هدر رفت آب از سطح برگ با تشکیل لایه دوگانه سیلیکون- کوتیکول است که مانند یک عایق از تبخیر سطحی آب برگ جلوگیری می‌کند (۲۶ و ۴۲).

برخلاف اندام هوایی، طول ریشه و وزن خشک آن در حضور سیلیکون بدون تغییر باقی مانده یا کاهش پیدا کرد. ممکن است دلیل این کاهش را بتوان به بهینه‌شدن جذب آب و حفظ آن در گیاهان تحت تیمار نسبت داد، به شکلی که با همین مقدار حجم ریشه گیاه قادر به جذب حداکثری آب و املاح می‌باشد و نیازی به صرف انرژی و ماده بیشتر برای افزایش حجم ریشه نیست.

یکی از مکانیزم‌های دفاعی گیاهان در برابر تنش‌های محیطی افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌باشد. در منابع بسیاری به افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در حضور سیلیکون اشاره شده‌است، خواه گیاه تحت تنش باشد یا خیر، به طوری که در شرایط بهینه نیز حضور سیلیکون موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌گردد (۱۲ و ۳۶). هم چنین SOD و POD در لیگنین شدن نیز دخالت می‌کنند (۱۶ و ۳۷). این ارتباط به خوبی در پژوهشی بر روی گیاه برنج به اثبات رسیده است (۱۰). لیگنین به عنوان ترکیب پیچیده‌ای از ترکیبات فنولی،

عنصری ضروری در ساختار دیواره سلولی آوند چوب بوده، از گیاه بصورت مکانیکی حمایت کرده و به انتقال دور برد آب و املاح کمک می‌نماید (۷). علاوه بر آن این ترکیب می‌تواند به عنوان سد دفاعی در برابر حمله پاتوژن‌ها عمل کند (۶). Cai و همکاران (۱۰) نشان دادند که سیلیکون موجب افزایش فعالیت آنزیم POD در گیاهان برنج شد. ولی در پژوهش حاضر که سیلیکون تنها در دوران جوانه‌زنی گیاه اعمال شد، در برخی غلظت‌ها فعالیت این آنزیم‌ها را کاهش داد. افزایش فعالیت SOD بیشتر در حضور SiNP مشاهده شد و در این تیمارها، ضخیم‌ترین دیواره سلولی نیز مشاهده شد که به خوبی ارتباط این آنزیم و سنتز لیگنین را نشان می‌دهد. فعالیت آنزیم‌های POD و CAT در حضور سیلیکات‌سدیم بیشتر بود. شاید دلیل این الگوی تغییرات فعالیت آنزیمی به دلیل تیمار کوتاه مدت این گیاهان و متفاوت بودن اثرگذاری سیلیکات‌سدیم و SiNP باشد. البته دیواره سلولی آوندها از ترکیبات گوناگون دیگری به غیر از لیگنین نیز تشکیل شده است (۱۵) و بنابراین تمام تغییرات ایجاد شده در دیواره را نمی‌توان به سنتز لیگنین نسبت داد و شاید افزایش قطر دیواره با وجود کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در تیمارهای دیگر مربوط به افزایش سنتز سایر مواد تشکیل دهنده دیواره باشد. در هر صورت در تمامی تیمارهای سیلیکون نسبت به گروه شاهد، دیواره سلولی آوند چوب ضخامت بیشتری داشت که این از نظر مقاومت در برابر عوامل محیطی برای گیاه از اهمیت بالایی برخوردار است.

از اثرات سیلیکون در گیاهان بهبود عملکرد فتوسنتزی گیاه است (۴) که به یقین یکی از دلایل این اثر ایجاد تغییرات بافتی و ساختاری برگ می‌باشد. پژوهش‌های پیشین نشان دادند که سیلیکون با رسوب در قاعده برگ، ایستایی برگ در برابر نور را افزایش می‌دهد (۲۱). در این پژوهش نیز در ساختار برگ‌های گیاهان تحت تیمار سیلیکون تغییرات مثبتی مشاهده شد. افزایش پهنای برگ در تمام گیاهان تحت تیمار، سطح دریافت نور و توان فتوسنتزی گیاه را افزایش

فتوستتزی و مقاومت گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیر زیستی می‌باشند که پیش‌تر به آن اشاره شد. افزایش حجم این ساختارها هم‌چنین می‌تواند دلیل دیگری بر افزایش محتوی آب اندام هوایی گیاه باشد.

افزایش اندازه سلول‌های حبابی در گیاهان تحت تیمار سیلیکون ممکن است موجب باز شدن بیشتر برگ‌ها، جذب حداکثری نور و هم‌چنین افزایش ذخیره آب شود. این سلول‌ها که سلول‌های موتور نیز نامیده می‌شوند، تقریباً در تمام تک‌لپه‌ای‌ها وجود دارند (۵) و نقش‌های متعددی از جمله ذخیره آب (۱۳ و ۴۱)، دخالت در باز شدن برگ‌های جوان (۴۱) و کمک به ورود نور به مزوفیل بازی می‌کنند (۱۱). در گیاهان تیمار شده با سیلیکون در هر دو شکل آن، خصوصیات بافت شناختی ساقه، کم و بیش بهبود یافته‌بود. این گیاهان دارای میانگرم قطورتر و قطب‌های آوندی بیشتری نسبت به گروه شاهد بودند، که در کنار افزایش دهانه آوندی ثانویه در هردو نوع ترکیب سیلیکون، نشان دهنده افزایش انتقال آب و متابولیت‌ها می‌باشد. شاید کاهش قطر دهانه آوندهای اولیه را بتوان به افزایش چوبی شدن دیواره آنها نسبت داد. به غیر از تعداد محدودی از غلظت‌ها، در هردو شکل سیلیکون به کار رفته، صفات بافتی اندازه‌گیری شده در ریشه افزایش چشم‌گیری را نشان ندادند. تغییرات مشاهده شده می‌تواند نشان دهنده القای ژن‌های متعدد درگیر در رشد و گسترش گیاه توسط سیلیکون در همان ابتدای جوانه‌زنی باشد که آثار به جا مانده از فعالیت آنها تا هفته چهارم رشد دیده می‌شود. شاید این اثر القایی، بلندمدت است و یا اینکه سیلیکون آبشارهای رونویسی را راه‌اندازی می‌کند که در نهایت تا هفته چهارم یا حتی بیشتر ادامه می‌یابد. حقیقی و همکاران (۱۹) در پژوهشی روی گیاه گوجه‌فرنگی افزایش طول ریشه در حضور غلظت های ۱-۲ میلی‌مولار SiNP (بمدت ۱۰ روز) را گزارش کردند. شاید این اختلاف در نتایج به دلیل اختلاف در مدت زمان تیمار گیاهان با SiNP و هم‌چنین غلظت‌های به کار رفته باشد. ولی با در نظر

می‌دهد. هم‌چنین افزایش دهانه آوندی موجب افزایش دریافت آب و املاح مورد نیاز از ریشه می‌گردد.

دیواره سلولی نقش مهمی در استحکام سلول‌ها و هم‌چنین استحکام و ایستایی برگ‌ها بازی می‌کند. افزایش قطر دیواره سلولی آوندهای چوبی در گیاهان تحت تیمار می‌تواند ایستایی برگ و مقاومت آن در برابر پاتوژن‌ها را افزایش دهد که این نیز همراستا با افزایش کارایی برگ می‌باشد. این افزایش قطر دیواره سلولی آوند چوبی در گیاه سنبله نیز گزارش شده است (۲۹).

سلول‌های غلاف آوندی سلول‌های پارانشیمی بزرگی حاوی کلروفیل و نشاسته هستند که دستجات آوندی را احاطه کرده و رابط بین آنها و سلول‌های مزوفیل می‌باشند (۱۵). این سلول‌ها جریان مواد به داخل برگ را بویژه در زمان تکوین برگ و جریان مواد به بیرون برگ را طی فتوستتزی آسان می‌کنند. سلول‌های غلاف آوندی در گیاهانی مانند جودوسر یکپارچگی هیدرولیکی را برای جلوگیری از ورود هوا به گزیم حفظ می‌کنند و با ذخیره آب جریان‌های تنفسی معمول در آب و هوای خشک مناطق گرمسیری را متعادل می‌نمایند (۲۴ و ۳۴). هم‌چنین در این گیاهان سلول‌هایی شبیه به سلول‌های غلاف آوندی تا اپیدرم گسترش می‌یابند که به آنها گستره‌های غلاف آوندی گفته می‌شود. این سلول‌ها از انتشار جانبی گازها به درون مزوفیل جلوگیری کرده، در هدایت مواد دخالت داشته، ساختارهایی سازگار برای ذخیره آب بوده، به عنوان ساختار حمایتی عمل کرده (زیرا این گیاهان بیشتر دارای برگ‌های نازکی هستند که در برابر باد آسیب پذیر می‌باشند) (۳۲ و ۳۴) و در نهایت به عنوان پنجره‌هایی عمل می‌کنند که نفوذ نور به لایه‌های داخلی مزوفیل را فراهم می‌کنند (۳۰). با توجه به توضیحات بالا می‌توان گفت افزایش حجم سلول‌های غلاف آوندی و گستره‌های غلاف آوندی در گیاهان تحت تیمار سیلیکون مزیت‌های متعددی برای گیاهان داشته و یکی از دلایل افزایش توان

برای مدت زمان کوتاهی در معرض تیمارهای نانوسیلیکون و سیلیکات قرار گرفتند، نتایج این مطالعه قابل تعمیم به وضعیت گیاه در طبیعت نمی‌باشد. چرا که ممکن است در طبیعت یک گیاه در تمام طول دوره چرخه زندگی خود به طور دائم در معرض غلظت‌های خاصی از این مواد قرار گرفته و یا حتی ممکن است با گذشت زمان توسط اثرات افزایشی این مواد نیز تحت تاثیر قرار گیرد. از این رو پیشنهاد می‌شود تا زمان بررسی‌های دقیق‌تر اثر این ذرات در طیف وسیعی از گیاهان و موجودات دیگر و در دوره‌های زمانی طولانی‌تر در استفاده از آنها احتیاط لازم به عمل آید.

گرفتن وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه و حجم آب انتقال یافته به گیاه می‌توان گفت آب و املاح به میزان کافی به گیاه رسیده‌است و در نتیجه این حجم از ریشه کافی بوده و بنابراین گیاه نیازی به صرف انرژی و ماده بیشتر برای گسترش ریشه‌های خود نداشته‌است.

در جمع بندی نهایی می‌توان گفت SiNP نه تنها تاثیر منفی بر گیاه جودوسر نداشت بلکه در بسیاری موارد اثرات مثبتی نیز برجای گذاشت و هم‌چنین اثر آن تقریباً مشابه اثر سیلیکون توده‌ای روی گیاه جودوسر بود. ولی در صفات بسیاری بویژه صفات مربوط به برگ و هم‌چنین فاکتورهای رشد گیاه، سیلیکات‌سدیم اثری به مراتب بهتر از شکل نانو برجای گذاشت. با توجه به اینکه در این آزمایش بذرها

## منابع

- ۱- سراجی، ز.، عبدل زاده، ا. و صادقی‌پور، ح. ۱۳۹۷. اثرات کاربرد سیلیکون در بهبود رشد و کاهش تنش اکسیداتیو گیاهان برنج تحت کمبود روی. مجله پژوهش‌های گیاهی. ۳۱ (۲): ۳۴۶-۳۵۸
- ۲- شمس، ه.، عبدل زاده، ا.، صادقی‌پور، ح.، مهربان جوبنی، پ. و باقریه نجار، م. ب. ۱۳۹۷. اثرات تغذیه سیلیکون بر کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از شوری در گیاه آرابیدوپسیس تالیانا (*Arabidopsis thaliana*). مجله پژوهش‌های گیاهی.
- 3- Aebi, H. 1984. Catalase in vitro. Methods in enzymology, 105, 121-126.
- 4- Ali, S., Farooq, M.A., Yasmeen, T., Hussain, S., Arif, M.S., Abbas, F., Bharwana, S.A. and Zhang, G. ۲۰۱۳. The influence of silicon on barley growth, photosynthesis and ultra-structure under chromium stress. Ecotoxicology and environmental safety, 89, 66-72.
- 5- Alvarez, J.M., Rocha, J.F. and Machado, S.R. 2008. Bulliform cells in *Loudetiopsis chrysothrix* (Nees) Conert and *Tristachya leiostachya* Nees (Poaceae): structure in relation to function. Brazilian Archives of Biology and Technology, 51, 113-119.
- 6- Bhuiyan, N.H., Selvaraj, G., Wei, Y. and King, J. 2009. Role of lignification in plant defense. Plant signaling & behavior, 4. 158-159.
- 7- Boerjan, W., Ralph, J. and Baucher, M. 2003. Lignin biosynthesis. Annual review of plant biology, 54, 519-546.
- 8- Bradford, M.M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analytical biochemistry, 72, 248-254.
- 9- Bryant, J.P., Chapin III, F.S. and Klein, D.R. 1983. Carbon/nutrient balance of boreal plants in relation to vertebrate herbivory. Oikos 357-368.
- 10- Cai, K., Gao, D., Luo, S., Zeng, R., Yang, J. and Zhu, X. 2008. Physiological and cytological mechanisms of silicon-induced resistance in rice against blast disease. Physiologia Plantarum, 134: 324-333.
- 11- Clayton, W.D. and Renvoize, S.A. 1986. Genera graminum. Grasses of the World. Genera graminum. Grasses of the World., 13: 389-417.
- 12- De Gara, L., de Pinto, M.C. and Tommasi, F. 2003. The antioxidant systems vis-à-vis reactive oxygen species during plant-pathogen interaction. Plant Physiology and Biochemistry, 41: 863-870.
- 13- Eleftheriou, E. and Noitsakis, B. 1978. Phytion; annales rei botanicae, Vol. 19.
- 14- Epstein, E. 1999. Silicon. Annual review of plant biology, 50: 641-664.

- 15- Esau, K. 1965. Plant anatomy. Plant Anatomy., 2nd ed, pp. 625.
- 16- Fleck, A.T., Nye, T., Repenning, C., Stahl, F., Zahn, M. and Schenk, M.K. 2010. Silicon enhances suberization and lignification in roots of rice (*Oryza sativa*). Journal of Experimental Botany, 62: 2001-2011.
- 17- Giannopolitis, C.N. and Ries, S.K. 1977. Superoxide dismutases I. Occurrence in higher plants. Plant Physiology, 59: 309-314.
- 18- Haghghi, M. and Pessaraki, M. 2013. Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. Scientia Horticulturae, 161: 111-117.
- 19- Haghghi, M., Afifipour, Z. and Mozafarian, M. 2012. The effect of N-Si on tomato seed germination under salinity levels. J Biol Environ Sci, 6: 87-90.
- 20- Hewitt, E.J. and Bureaux, C.A. 1966. Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition. 2ed. Cambridge Univ Press.
- 21- Hossain, M.T., Mori, R., Soga, K., Wakabayashi, K., Kamisaka, S., Fujii, S., Yamamoto, R. and Hoson, T. 2002. Growth promotion and an increase in cell wall extensibility by silicon in rice and some other Poaceae seedlings. Journal of Plant Research, 115: 23-27.
- 22- Kar, R. and Choudhuri, M. 1987. Possible mechanisms of light-induced chlorophyll degradation in senescing leaves of *Hydrilla verticillata*. Physiologia Plantarum, 70: 729-734.
- 23- Le, V.N., Rui, Y., Gui, X., Li, X., Liu, S. and Han, Y. 2014. Uptake, transport, distribution and bio-effects of SiO<sub>2</sub> nanoparticles in Bt-transgenic cotton. Journal of nanobiotechnology, 12: 50.
- 24- Leegood, R.C. 2008. Roles of the bundle sheath cells in leaves of C<sub>3</sub> plants. Journal of Experimental Botany, 59: 1663-1673.
- 25- Lindgren, F. 2010. Silicon as Negative Electrode Material for Lithium-ion Batteries.
- 26- Ma, J.F. and Yamaji, N. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. Trends in plant science, 11: 392-397.
- 27- Monica, R.C. and Cremonini, R. 2009. Nanoparticles and higher plants. Caryologia, 62: 161-165.
- 28- Nair, R., Poulouse, A.C., Nagaoka, Y., Yoshida, Y., Maekawa, T. and Kumar, D.S. 2011. Uptake of FITC labeled silica nanoparticles and quantum dots by rice seedlings: effects on seed germination and their potential as biolabels for plants. Journal of fluorescence. 21: 2057.
- 29- Nazarian, S., Majd, A., Irian, S., Najafi, F., Ghahremaninejad, F., Landberg, T. and Greger, M. 2017. Comparison of silicon nanoparticles and silicate treatments in fenugreek. Plant Physiology and Biochemistry, 115: 25-33.
- 30- Nikolopoulos, D., Liakopoulos, G., Drossopoulos, I. and Karabourniotis, G. 2002. The relationship between anatomy and photosynthetic performance of heterobaric leaves. Plant Physiology, 129: 235-243.
- 31- Nowack, B. and Bucheli, T.D. 2007. Occurrence, behavior and effects of nanoparticles in the environment. Environmental pollution, 150: 5-22.
- 32- Pieruschka, R., Schurr, U., Jensen, M., Wolff, W.F. and Jahnke, S. 2006. Lateral diffusion of CO<sub>2</sub> from shaded to illuminated leaf parts affects photosynthesis inside homobaric leaves. New Phytologist, 169: 779-788.
- 33- Roth-Nebelsick, A., Uhl, D., Mosbrugger, V. and Kerp, H. 2001. Evolution and function of leaf venation architecture: a review. Annals of Botany, 87: 553-566.
- 34- Sage, R. 2001. Environmental and evolutionary preconditions for the origin and diversification of the C<sub>4</sub> photosynthetic syndrome. Plant Biology, 3: 202-213.
- 35- Siddiqui, M.H. and Al-Whaibi, M.H. 2014. Role of nano-SiO<sub>2</sub> in germination of tomato (*Lycopersicon esculentum* seeds Mill.). Saudi journal of biological sciences, 21: 13-17.
- 36- Siddiqui, M.H., Al-Whaibi, M.H., Faisal, M. and Al Sahli, A.A. 2014. Nano-silicon dioxide mitigates the adverse effects of salt stress on *Cucurbita pepo* L. Environmental toxicology and chemistry, 33: 2429-2437.
- 37- Soundararajan, P., Manivannan, A., Park, Y.G., Muneer, S. and Jeong, B.R. 2015. Silicon alleviates salt stress by modulating antioxidant enzyme activities in *Dianthus caryophyllus* 'Tula'. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 56: 233-239.
- 38- Sun, D., Hussain, H.I., Yi, Z., Siegele, R., Cresswell, T., Kong, L. and Cahill, D.M. 2014. Cahill, Uptake and cellular distribution, in four plant species, of fluorescently labeled mesoporous silica nanoparticles, Plant cell reports, 33: 1389-1402.

- 39- Tripathi, D.K., Singh, V.P., Prasad, S.M., Chauhan, D.K. and Dubey, N.K. 2015. Silicon nanoparticles (SiNp) alleviate chromium (VI) phytotoxicity in *Pisum sativum* (L.) seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 96: 189-198.
- 40- Van Hoecke, K., De Schampelaere, K.A., Van der Meeren, P., Lucas, S. and Janssen, C.R. 2008. Ecotoxicity of silica nanoparticles to the green alga *Pseudokirchneriella subcapitata*: importance of surface area. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27: 1948-1957.
- 41- Vecchia, F.D., El Asmar, T., Calamassi, R., Rascio, N. and Vazzana, C. 1998. Morphological and ultrastructural aspects of dehydration and rehydration in leaves of *Sporobolus stapfianus*. *Plant Growth Regulation*, 24: 219-228.
- 42- Yoshida, S., Ohnishi, Y. and Kitagishi, K. 1962. Histochemistry of silicon in rice plant: III. The presence of cuticle-silica double layer in the epidermal tissue. *Soil Science and Plant Nutrition*, 8: 1-5.

## Short-term effects of nano silicon on some physiological and histological characteristics of *Avean sativa* L. and its comparison with sodium silicate

Asgari F., Majd A., Jonoubi P. and Najafi F.

Dept. of Plant Sciences, Kharazmi University, Tehran, I.R. of Iran

### Abstract

The rapid expansion of the use of nanomaterials, including nano silicon (SiNP), in industry, medicine and agriculture has increased the risk of their introduction into the environment, and evaluation of their potential effects on organisms, including plant species, is essential. In this study, the effects of SiNP on growth factors, antioxidant enzymes and anatomy of *Avean sativa* L. were compared with sodium silicate. The experiments were conducted in laboratory with four concentrations of 2.5, 5, 7.5 and 10 mM sodium silicate and SiNP, and the plants received only silicon treatments only 7 days at the germination stage. The results showed that SiNPs didn't have toxic effect on the growth and tissue structure of treated plants and also had a positive effect on many measured parameters. Both forms of silicon increased the growth of leaves, especially the vascular sheath cells, the diameter of the meta-xylem openings and the thickness of vascular cell wall, as well as the diameter of the stem, the vascular poles and the meta-xylem openings II. Unlike the leaf and shoot, both forms of silicon had no positive effects on the most measured-parameters of roots. The activity of superoxide dismutase increased in the presence of SiNP that accompanied with significant increase in vascular cell wall thickness compared to the other treatments. These changes can be due to the expression of genes that have been induced in germination phase. In general, the positive effect of sodium silicate on growth and anatomical factors was far greater than that of SiNP.

**Key words:** Silicon, nano-silicon, antioxidant enzymes, oat