اثرات کاربرد سیلیکون در بهبود رشد و کاهش تنش اکسیداتیو گیاه برنج تحت کمبود روی

زهرا سراجی، احمد عبدل زاده* و حمیدرضا صادقی‌پور

گرگان، دانشگاه گلستان، دانشکده علوم پایه، گروه زیست شناسی

تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۸ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱/۲۱

چکیده

روی یکی از عناصر کم مصرف مورد نیاز همه گیاهان است که کمبود آن در ایران شایع است. نقش سیلیکون در تخفیف کمبود و سمیت برخی عناصر معدنی در گیاهان گزارش شده است. به‌منظور بررسی تأثیر سیلیکون در تخفیف کمبود روی در گیاه برنج آزمایش‌هایی در اتاقک کشت و فضای آزاد اجرا شد. گیاهان در محیط کشت هیدروپونیک با دو سطح روی شامل ۱ و ۱۰ میکروگرم در لیتر (شاهد) و دو سطح سیلیکون شامل صفر و ۱/۵ میلی مولار کاشته شدند. نتایج نشان داد که وزن تر و خشک، طول ریشه و نسبت بخش هوایی به ریشه گیاهان تحت شرایط کمبود روی نسبت به شاهد کاهش یافت، در حالی‌که تغذیه سیلیکون وزن تر و خشک، طول ریشه و نسبت بخش هوایی به ریشه را تحت کمبود روی افزایش داد. کمبود روی سبب کاهش غلظت روی در گیاه شد، در نتیجه میزان پراکسید هیدروژن و پراکسیداسیون لیپید زیاد شد و مقدار کلروفیل و پروتئین محلول کاهش یافت. بعکس، تغذیه سیلیکون انباشتگی این عنصر را در شرایط کمبود روی زیاد کرد. به علاوه، کاهش میزان پراکسید هیدروژن با کاربرد سیلیکون در کمبود روی حاکی از کاهش تنش اکسیداتیو است. در نتیجه، میزان کلروفیل b و کاروتنوئیدها با کاربرد سیلیکون نسبت به شاهد افزایش یافت. سیلیکون توانست تحت کمبود روی فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز ریشه را افزایش دهد که احتمالاً نتیجه آن افزایش میزان لیگنین در کمبود روی بود. این نتایج نشان می‌دهد که سیلیکون احتمالاً با بهبود جذب روی، از شدت تنش اکسیداتیو و کمبود کلروفیل و پروتئین‌های محلول در گیاه کاسته و منجر به بهبود رشد گیاه برنج در شرایط کمبود روی شده است.

واژه‌های کلیدی: تغذیه روی، سیلیکون، برنج

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۱۷۳۲۲۴۵۹۶۴ ، پست الکترونیکی: ah_ab99@yahoo.com

مقدمه

برنج یکی از مهمترین محصولات زراعی در جهان است که غذای اصلی ۴۰٪ از مردم دنیا را تشکیل می‌دهد. روی به عنوان یک عنصر کم‌مصرف مورد نیاز همه گیاهان بوده و بعد از آهن دومین فلز انتقالی فراوان در گیاهان است (۱۱). روی بر خلاف عناصری مانند آهن و مس در گیاهان تنها به صورت Zn+2 حضور دارد و در واکنش‌های اکسید و احیایی شرکت نمی‌کند (۴۴). اعمال متابولیکی روی براساس تمایل شدید آن برای تشکیل کمپلکس‌های چهاروجهی با عناصری مثل O، N و به‌ویژه S در اسیدهای آمینه مانند سیستئین است، لذا روی در بسیاری از سیستم‌های آنزیمی گیاه مانند کربنیک انهیدراز و الکل دهیدروژناز نقش کاتالیزوری، فعال‌کنندگی و یا ساختمانی دارد. روی همچنین در ساخته‌شدن پروتئین‌ها دخالت دارد. کلید اثرات کمبود روی در گیاهان افزایش تنش اکسیداتیو است که از طریق کاهش سم‌زدایی رادیکال سوپراکسید با آنزیم سوپراکسیددیسمیوتاز و ایجاد بیشتر رادیکال‌های آزاد با افزایش فعالیت NAD(P)H اکسیداز به وجود می‌آید (۲۹ و ۴۰). به علاوه، روی به عنوان بخشی از ساختار

متالوآنزیم در چندین مولکول مربوط به سنتز DNA و RNA، مانند RNA پلی‌مراز، ترانس کریپتاز معکوس و عوامل رونویسی نقش دارد. مشخص‌ترین علائم قابل رؤیت کمبود روی، کوچک برگی (Rosetting) است، زیرا با کاهش روی در گیاه فعالیت اکسین اکسیداز افزایش یافته که منجر به تجزیه و کاهش اکسین در گیاه می‌گردد. در غلات زردی به صورت نوارهای زرد و قرمز در طول رگبرگ اصلی، با لکه‌های بی‌رنگ دیده می‌شود. مقدار روی در گیاهان بین ۴۰ تا ۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک و مقدار بحرانی آن ۱۵ تا ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک است (۲۹ و ۴۰). بیش از ۳۰ درصد خاک‌های مطالعه شده در دنیا دچار کمبود روی هستند و کمبود این عنصر در بسیاری کشورها گزارش شده است. در خاک‌هایی با اسیدیته بالا، خاک‌های آهکی، خاک‌های شنی، خاک‌های سدیک، خاک‌های غرقاب بدون تهویه و همچنین در خاک‌های بشدت آبشویی شده کمبود روی بیشتر است (۶ و ۴۰). با توجه به قلیایی بودن و فراوانی کربنات کلسیم در خاک‌های ایران، کمبود روی در بیشتر مناطق کشور از جمله شالیزارهای برنج عمومیت دارد (۴۰). محققان نشان داده‌اند که مقدار روی قابل استفاده حدود ۴۰ درصد از خاک‌های مورد مطالعه مزارع گندم از حد بحرانی این عنصر پایین‌تر است. در این تحقیق خاک استان‌های خراسان، خوزستان، ایلام، یزد و کردستان کمبود روی بیشتری داشت (۳ و ۴).

سیلیکون یکی از عناصر مفید است که نقش آن مربوط به حفاظت از گیاهان در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی می‌باشد (۲۷ و ۲۸). سیلیکون در خاک به صورت نامحلول فراوان است. میزان سیلیکون محلول در خاک تنها ۰/۶–۰/۱ میلی‌مولار می‌باشد (۱۴ و ۳۹). فرم محلول آن اسید سیلیسیک $Si(OH)_4$ است که توسط گیاهان قابل‌جذب می‌باشد. برنج به عنوان گیاه تجمع‌کننده سیلیکون بوده و سیلیکون ممکن است تا ۱۰ درصد از وزن خشک بخش هوایی گیاه را شامل شود، لذا میزان این عنصر در برنج اغلب بیشتر از عناصر پُرمصرف ضروری مثل نیتروژن، فسفر و پتاسیم می‌باشد (۲۷). افزایش سیلیکون در این گیاه به دلیل توانایی بالای ریشه برای جذب و انتقال فعال آن است (۳۱ و ۴۲). بیشترین تفاوت بین گیاه برنج شاهد و تیمار شده با سیلیکون در ساختمان دیواره سلولی اپیدرمی است. در دیواره سلولی گیاه برنج تیمار شده با سیلیکون دو لایه متمایز وجود دارد. یکی لایه سیلیکون خارجی و دیگری لایه سیلیکون داخلی که در میکروفیبریل‌های سلولزی جا گرفته است (۳۷). سیلیکون با ترکیبات دیواره سلولی مانند پلی ساکاریدها و پروتئین‌ها ارتباط دارد و بین لیگنین و کربوهیدرات‌ها پیوند برقرار می‌کند (۲۱ و ۲۲). با افزایش غلظت سیلیکون در محلول‌های غذایی، ضخامت لایه سیلیکون و سرعت ضخیم شدن لایه‌های سیلیکون دیواره‌های سلولی اپیدرمی افزایش می‌یابد (۳۷). از این رو سیلیکون در دیواره سلولی به صورت پلی‌مری از سیلیکای بی‌شکل هیدراته شده ته‌نشین می‌شود و به فرم لایه‌های دوتایی کوتیکول- سیلیکا می‌باشد (۳۶). دانه‌های سیلیسی در سلول‌های اپیدرمی گیاه برنج به فراوانی دیده می‌شود (۱). سیلیکون در گیاه برنج، انعطاف‌پذیری دیواره سلولی را در نواحی رشد افزایش می‌دهد، ولی در نواحی یقه‌ای منجر به کاهش انعطاف‌پذیری دیواره می‌شود (۱۹). ته‌نشینی سیلیکون در دیواره‌های سلولی سلول‌های آندودرمی ریشه به عنوان سد آپوپلاستی عمل کرده و بافت‌های گیاهی را از تنش فلزات سنگین محفوظ می‌دارد (۱۷ و ۲۶). بررسی انجام شده در گیاه خیار رشد کرده تحت شرایط کمبود آهن، روی و منگنز نشان داد که کاربرد سیلیکون بهبود رشد گیاه خیار را در شرایط کمبود روی سبب شد. با کاربرد سیلیکون غلظت سیترات ریشه در گیاهان محروم از روی زیاد شد، در حالی‌که غلظت سیترات برگ تغییر معنی‌داری نداشت (۹). مهربان و همکاران (۳۰) نشان دادند که کاربرد سیلیکون در شرایط کمبود روی رشد رویشی و زایشی گیاه برنج و غلظت برخی عناصر مانند فسفر و پتاسیم را افزایش می‌دهد. پاسکوال و همکاران گزارش

نمودند که تغذیه گیاه سویا با ۰/۵ میلی مولار سیلیکون عوامل رشد و غلظت روی در گیاه را در شرایط کمبود روی افزایش می‌دهد (۳۵). از آن‌جا که یکی از اثرات مفید سیلیکون افزایش مقاومت برخی از گیاهان در برابر کمبود عناصری مانند آهن است و در ارتباط با اثر سیلیکون در گیاه برنج تحت کمبود روی گزارشهای زیادی ارائه نشده است. هدف از انجام این تحقیق بررسی نقش سیلیکون در تخفیف احتمالی اثرات صدمه‌زننده کمبود روی بر روی پارامترهایی مانند میزان رشد، مقدار پروتئین‌ها، کلروفیل، لیگنین، پراکسید هیدروژن و مالون‌دیالدئید در گیاه برنج می‌باشد.

مواد و روشها

شرایط کشت: بذرهای برنج رقم فجر از مرکز تحقیقات برنج کشور واحد آمل تهیه شد. ابتدا بذرها به وسیله آب ژاول ۴۰ درصد استریل سطحی شده و پس از جوانه‌زنی در داخل حوله کاغذی مرطوب، به محیط کشت هیدروپونیک در اتاقک کشت و فضای آزاد منتقل شدند. در این پژوهش گیاه برنج در دو آزمایش جداگانه با محلول غذایی یوشیدا کشت شد (۴۵). محلول غذای یوشیدا شامل عناصر نیترات آمونیوم (۱۰۹/۷ میلی‌گرم در میلی‌لیتر)، فسفات مونو سدیک (۴۸/۴ میلی‌گرم در میلی لیتر)، سولفات پتاسیم (۸۵/۷ میلی‌گرم در میلی‌لیتر)، کلرید کلسیم (۱۰۶/۳ میلی‌گرم در میلی‌لیتر)، اسید بوریک (۱/۱ میلی‌گرم در میلی‌لیتر)، سولفات منیزیم ۸/ ۳۸۸ میلی‌گرم در میلی-لیتر)، کلرید منگنز (۱/۹ میلی‌گرم در میلی‌لیتر)، مولیبدات آمونیوم (۰۱/۰۹۳ میلی‌گرم در میلی‌لیتر)، سولفات روی (۰/۰۴۴ میلی‌گرم در میلی‌لیتر)، سولفات مس (۰/۰۳۹ میلی‌گرم در میلی‌لیتر)، اسید سیتریک (۲/۳۸ میلی‌گرم در میلی‌لیتر) و اسید سولفوریک (۰/۰۶ میلی لیتر) می‌باشد. در جریان کشت اول در اتاقک کشت میانگین دمای حداقل ۲۰ درجه و حداکثر ۲۵ درجه سانتی‌گراد، دوره نوری ۱۶ ساعت نور (روز) و ۸ ساعت تاریکی (شب) و شدت نور در حدود ۶۰ میکرومول فوتون بر مترمربع در ثانیه بود. طرح آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی و با ۵ تکرار بود. فاکتور اول روی در سطوح ۱ و ۱۰ میکروگرم در لیتر به صورت سولفات روی و فاکتور دوم سیلیکون در سطوح صفر و ۱/۵ میلی‌مولار به صورت سیلیکات سدیم بود. شروع تیماردهی از هفته دوم بعد از انتقال گیاهان به محیط کشت هیدروپونیک بود. بعد از ظهور علائمی همانند زردی در برگ ها و کاهش چشمگیر رشد در بخش هوایی و ریشه، گیاه برنج ۲۰ روز از شروع کاشت برداشت شد. سپس برخی صفات مانند وزن تر، خشک و وزن کل بخش هوایی و ریشه و نسبت بخش هوایی به ریشه، فعالیت برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، میزان کلروفیل و کاروتنوئیدها، پروتئین‌های محلول و لیگنین در آنها مورد سنجش قرار گرفتند. در کشت دوم در فضای آزاد میانگین رطوبت نسبی در دوره کاشت (خرداد تا تیر ۱۳۹۳) ۶۳ درصد، میانگین دمای حداقل ۲۴/۷ درجه سانتی‌گراد و دمای میانگین حداکثر ۲۷/۴ درجه سانتی‌گراد و ساعات آفتابی ۱۸۷ ساعت با ۱۱ روز بارانی بود. سایر شرایط مشابه آزمایش اول بود. با ظهور علائمی مانند کاهش رشد ریشه و بخش هوایی و زرد شدن برگ ها ۳۰ روز پس از کاشت، گیاهان برای سنجش میزان وزن تر و خشک و طول ریشه و بخش هوایی، تعداد پنجه، میزان عناصر، مقدار پراکسیداسیون لیپید و پراکسید هیدروژن برداشت شدند.

به‌منظور آنالیز و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها از نرم‌افزار Excel و SAS استفاده شد. ضمناً برای بررسی معنی‌دار بودن اختلاف میانگین داده‌ها از آزمون آنالیز واریانس و تست LSD استفاده شد.

سنجش میزان سیلیسیم و روی: استخراج عنصر روی به روش خاکستر خشک (۲۴) به این صورت انجام می شود که مقدار ۰/۰۵ گرم بافت خشک بخش‌هوایی و ریشه گیاهان در کوره در دمای ۵۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴

ساعت سوزانده شدند. خاکستر به دست آمده در ۱ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۶ نرمال حل شده و پس از صاف کردن با آب مقطر به حجم ۱۵ میلی لیتر رسانده شد. غلظت روی با دستگاه جذب اتمی Shimadzo مدل A ۷۰۰۰ اندازه‌گیری شد.

استخراج یون سیلیسیم به روش اینال و همکاران (۲۰) انجام شد. برای اندازه‌گیری یون سیلیسیم ۱/۵ میلی‌لیتر از عصاره نمونه‌های ریشه و یا بخش هوایی را با ۱/۵ میلی‌لیتر مخلوط اسید سولفوریک و مولیبدات آمونیوم مخلوط و ورتکس شد. بعد از گذشت ۵ دقیقه ۱/۵ میلی‌لیتر اسید تارتاریک و بعد از گذشت ۵ دقیقه دیگر ۱/۵ میلی‌لیتر اسید آسکوربیک به آن افزوده شد. پس از گذشت ۵ دقیقه میزان جذب نور کمپلکس ایجاد شده در طول موج ۸۱۱ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (ShimadzoUV-160A) سنجیده شد .

اندازه‌گیری پراکسید هیدروژن و پراکسیداسیون لیپید: عمل استخراج طبق روش سرگیو و همکاران (۳۸) در هاون چینی سرد انجام شد. به این صورت که مقدار ۰/۱ گرم از بافت تازه بخش‌هوایی با ۵۵۰ میکرولیتر تری‌کلرواستیک اسید ۰/۱ درصد وزنی حجمی هموژن و سانتریفیوژ شد. سوپرناتانت حاصل برای اندازه‌گیری مقدار پراکسید-هیدروژن با روش رنگ‌سنجی سرگیو و همکاران (۳۸) بر اساس واحد نانومول در گرم بافت تر استفاده شد. اندازه‌گیری پراکسیداسیون لیپید با اندازه‌گیری مقدار مالون‌دی‌آلدئید (MDA) به عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپید و طبق روش دو و براملیج (۱۳) انجام شد. مقدار ۰/۱ گرم از بافت تر بخش‌هوایی و یا ریشه را با ۲ میلی‌لیتر از اسید تری‌کلرواستیک ۰/۱ درصد عصاره‌گیری و سانتریفیوژ گردید. مقدار ۲۵۰ میکرولیتر از محلول بالایی به دست آمده با ۲ میلی‌لیتر از معرف اسید تیوباربیتوریک به اسید تری کلرو استیک شامل TBA ۰/۲۵ درصد در TCA ۱۰ درصد مخلوط و بعد در دمای ۹۵ درجه (۳۰ دقیقه) و بعد در ظرف یخ (۱۵ دقیقه) قرار گرفتند. محلول بالایی به دست آمده از سانتریفیوژ عصاره در مد فتومتریک و در ۳ طول موج ۴۴۰، ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر بر حسب واحد نانومول در گرم بافت تر خوانده شد. برای بلانک نیز از TCA ۰/۱ درصد به جای عصاره استفاده شد.

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، گایاکول پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز: عمل استخراج با استفاده از روش کار و میشرا (۲۳) و لیو و همکاران (۲۵) انجام شد. برای این کار مقدار ۰/۰۵ گرم از بافت ریشه و بخش هوایی را در هاون چینی سرد، با بافر فسفات ۰/۱ مولار با اسیدیته ۶/۸ هموژن و برای مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ گردید. فاز بالایی عصاره برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم های کاتالاز، گایاکول پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز مورد استفاده قرار گرفت. برای اندازه گیری فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز دیواره‌ای به رسوب حاصل از مرحله قبل ۲ میلی لیتر آب مقطر اضافه و مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ، عصاره بالایی دور ریخته شد. شستشوی رسوب چهار بار دیگر تکرار شد. به رسوب حاصل ۱ میلی‌لیتر محلول کلرید سدیم یک مولار اضافه و ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ، عصاره بالایی برای سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز دیواره‌ای استفاده شد. اندازه‌گیری فعالیت آنزیم های کاتالاز، پراکسیداز برحسب واحد میکرومول بر گرم وزن تر بر دقیقه با استفاده از روش چنس و مهلی (۱۲) در مد سینتیک و در طول موج ۲۴۰ نانومتر انجام شد. فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در طول موج ۴۷۰ نانومتر با کمک گایاکول به عنوان سوبسترا اندازه‌گیری شده که در حضور الکترون‌های ناشی از تجزیه H_2O_2 به وسیله آنزیم به تتراگایاکول تبدیل گردید. اندازه‌گیری فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز برحسب واحد میکرومول بر گرم وزن تر بر دقیقه و در طول موج ۴۲۰ نانومتر انجام شد و از پیروگالل به عنوان سوبسترا استفاده گردید.

اندازه‌گیری مقدار پروتئین های محلول ، لیگنین و

کلروفیل: اندازه‌گیری پروتئین‌های محلول به روش برادفورد (۱۰) انجام شد. مقدار ۰/۰۵ گرم از بافت ریشه و بخش هوایی را در هاون چینی سرد با بافر فسفات ۰/۱ مولار با اسیدیته ۶/۸ هموژن و ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. ۵۰ میکرولیتر از فاز بالایی عصاره را توسط آب مقطر به ۱۰۰ میکرولیتر رسانده و بعد به آن ۵ میلی لیتر محلول برادفورد اضافه و بعد از ۱۵ دقیقه ترکیب فوق با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر Shimadzo UV-160 و در طول موج ۵۹۵ نانومتر بر اساس واحد میلی گرم در گرم بافت تر خوانده شد. استخراج و اندازه‌گیری لیگنین به روش زایمر (۴۷) بر حسب واحد میلی گرم بر گرم بافت خشک و با استفاده از معرف فلوروگلوسینول (Phloroglucinol) بود. ابتدا مقدار ۰/۱ گرم پودر بافت خشک شده نمونه‌ها را با ۵ میلی لیتر متانول ۵۰٪ عصاره گیری و پس از دو بار سانتریفیوژ عصاره بالایی دور ریخته شد. باقیمانده نمونه‌ها در ۵ میلی‌لیتر هیدرو کلریک اسید اتانولی حل شده و ۳ ساعت در بن ماری جوش قرار داده، بعد از سرد شدن و سانتریفیوژ عصاره بالایی برای تعیین مقدار لیگنین به روش اسپکتروفتومتری در طول موج ۴۸۸ نانومتر خوانده شد. اندازه‌گیری کلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها با استفاده از روش آرنون (۷) انجام می شود، به این صورت که مقدار ۰/۰۵ گرم از بافت تر بخش هوایی گیاه با ۵ میلی‌لیتر استون ۱۰۰ درصد خرد، سپس یک گرم سولفات سدیم (Na_2SO_4) به مخلوط اضافه و با کاغذ صافی صاف شد. مخلوط به دست آمده سانتریفیوژ و در نهایت حجم آن به ۱۰ میلی‌لیتر رسید. اندازه‌گیری کلروفیل و کاروتنوئیدها با استفاده از روش اسپکتروفتومتری و در پنج طول موج بر حسب واحد میلی گرم در گرم بافت تر انجام گردید.

نتایج

بررسی پارامترهای رشد: مطابق جدول آنالیز واریانس (جدول ۱) اثرات روی و سیلیکون بر روی وزن تر و خشک ریشه و بخش هوایی، نسبت بخش هوایی به ریشه در سطح کمتر از ۰/۰۱ معنی‌دار بود. در حالی که اثر متقابل روی و سیلیکون تنها در وزن تر بخش‌هوایی در سطح کمتر از ۰/۰۵ معنی‌دار بود و در بقیه صفات رشد سنجش شده معنی‌دار نبود.

مقایسه میانگین نتایج رشد گیاهان در اتاقک کشت (آزمایش اول، جدول ۲) نشان داد که میزان وزن تر و خشک ریشه، بخش‌هوایی، وزن کل گیاه و نسبت بخش-هوایی به ریشه در تیمار ۱ میکروگرم در لیتر روی نسبت به شاهد کاهش یافت. در حالی که کاربرد سیلیکون تحت کمبود روی وزن تر ریشه را ۴۷ درصد، وزن تر بخش‌هوایی را ۶۴/۷ درصد و وزن تر کل گیاه را ۶۱/۵ درصد نسبت به گیاهان فاقد سیلیکون در همین تیمار افزایش داد. کاربرد سیلیکون در کمبود روی منجر به افزایش وزن خشک کل گیاهان به میزان ۶۱/۸ درصد و افزایش وزن خشک بخش هوایی شد (جدول ۲). نسبت بخش هوایی به ریشه در کمبود روی نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت و کاربرد سیلیکون منجر به افزایش معنی‌دار این نسبت به میزان ۳۴/۳ درصد نسبت به عدم حضور سیلیکون شد.

مطابق با جدول آنالیز واریانس (جدول ۳) اثرات روی بر وزن تر بخش هوایی و کل، وزن خشک ریشه و بخش هوایی و کل، طول بخش هوایی و تعداد پنجه در سطح کمتر از ۰/۰۱ معنی دار بود. وزن تر ریشه در سطح کمتر از ۰/۰۵ معنی دار بود. اما اثر معنی داری در طول ریشه نداشت. سیلیکون بر روی وزن تر و طول ریشه اثر معنی داری نداشته، در حالی که بر روی وزن تر بخش هوایی و وزن تر کل، وزن خشک ریشه، بخش هوایی و کل، طول بخش هوایی و تعداد پنجه در سطح کمتر از ۰/۰۱ معنی دار بود. برهم‌کنش روی و سیلیکون در هیچ یک از پارامترهای سنجش شده معنی دار نبود.

نتایج کشت گیاه برنج در فضای آزاد و محیط هیدروپونیک (جدولهای ۲ و ۴) نشان داد که وزن تر، خشک و وزن کل

ریشه و بخش هوایی، طول ریشه و تعداد پنجه در کمبود روی نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت ولی کاربرد سیلیکون وزن تر ریشه، بخش هوایی و کل و وزن خشک ریشه و کل و طول ریشه را افزایش داد.

این نتایج نشان می‌دهدکه در هر دو شرایط کشت استفاده شده کمبود روی منجر به کاهش وزن تر و خشک ریشه، بخش هوایی و کل گردید. همچنین، کاربرد سیلیکون در گیاهان تحت کمبود روی در هر دو شرایط کشت منجر به افزایش وزن تر و خشک ریشه و وزن خشک کل شد.

میزان یون‌های سیلیکون و روی: مطابق (شکل ۱) محتوای روی در گیاهان کشت شده در فضای آزاد تحت کمبود روی در ریشه و بخش‌هوایی نسبت به تیمار شاهد به صورت معنی‌داری کم بود. کاربرد سیلیکون سبب افزایش معنی‌دار میزان روی در گیاه شد. در گیاهان فاقد تیمار سیلیکون، میزان سیلیکون در تیمار ۱ میکروگرم در لیتر روی در ریشه و بخش هوایی نسبت به تیمار شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت، ولی با کاربرد سیلیکون مقدار آن در تیمارهای کمبود و شاهد در ریشه و بخش هوایی افزایش یافت (شکل ۱).

میزان پراکسید هیدروژن و پراکسیداسیون لیپید: میزان پراکسیداسیون لیپید ریشه (شکل ۲ الف) و بخش‌هوایی (شکل ۲ ب) در کمبود روی افزایش یافت. حضور سیلیکون اثر معنی‌داری در میزان پراکسیداسیون لیپید گیاهان چه در گیاهان شاهد و چه در گیاهان دارای کمبود روی نداشت، اما میزان پراکسیدهیدروژن ریشه (شکل ۲ پ) و بخش هوایی (شکل ۲ ت) در گیاهان کشت شده در فضای آزاد تحت کمبود روی افزایش یافت. کاربرد سیلیکون سبب کاهش معنی‌دار میزان پراکسید هیدروژن در ریشه و بخش‌هوایی در گیاهان دارای کمبود روی شد (شکل ۲).

فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی: مطابق جدول آنالیز واریانس (جدول ۵) روی و سیلیکون اثر معنی‌داری در فعالیت آنزیم کاتالاز ریشه نداشتند. در حالی‌که در بخش‌هوایی اثر روی بر فعالیت آنزیم کاتالاز در بخش‌هوایی در سطح کمتر از ۰/۰۱ معنی‌دار بود. اثر سیلیکون در بخش هوایی در سطح کمتر از ۰/۰۵ معنی دار بود. برهم کنش روی و سیلیکون بر فعالیت آنزیم معنی دار نبود. مطابق با جدول مقایسه میانگین (جدول ۶) فعالیت آنزیم کاتالاز در بخش‌هوایی تحت کمبود روی نسبت به شاهد کاهش یافت. اما کاربرد سیلیکون اثر معنی‌داری در فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط کمبود روی در بخش‌هوایی نداشت، در حالی که در تیمار شاهد فعالیت آنزیم را کاهش داد. مطابق جدول آنالیز واریانس (جدول ۵) اثرات روی و برهم کنش روی و سیلیکون بر فعالیت گایاکول پراکسیداز محلول در ریشه در کمتر از ۰/۰۱ معنی دار بود. ولی اثر روی در ریشه معنی دار نبود. همچنین در بخش هوایی اثر روی و سیلیکون در سطح کمتر از ۰۱/ ۰معنی دار بود ولی برهم‌کنش روی و سیلیکون معنی دار نبود. بر اساس جدول مقایسه میانگین (جدول ۶) فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز محلول در ریشه تحت کمبود روی نسبت به شاهد کاهش یافت. کاربرد سیلیکون اثر معنی‌داری در فعالیت آنزیم پراکسیداز محلول تحت کمبود روی در ریشه و بخش‌هوایی نداشت. فعالیت پراکسیداز دیواره‌ای ریشه تحت تیمارهای روی، سیلیکون و برهم‌کنش روی و سیلیکون در سطح کمتر از ۰/۰۱ معنی دار بود. در بخش هوایی اثر روی در سطح کمتر از ۰/۰۵ و سیلیکون در کمتر از ۰/۰۱ معنی‌دار بود. همچنین برهم‌کنش روی و سیلیکون معنی دار نبود (جدول ۵). براساس جدول مقایسه میانگین (جدول ۶) کمبود روی فعالیت آنزیم پراکسیداز دیواره‌ای را در ریشه نسبت به تیمار شاهد کاهش داد، در حالی‌که در بخش هوایی فعالیت این آنزیم نسبت به شاهد افزایش پیدا کرد. در حضور سیلیکون فعالیت آنزیم پراکسیداز دیواره‌ای هم در ریشه و هم در بخش‌هوایی کاهش پیدا کرد. بر اساس (جدول ۵) اثر روی و سیلیکون در ریشه در سطح کمتر از ۰/۰۱ معنی دار بود. در بخش هوایی اثر سیلیکون در سطح کمتر از ۰/۰۱ درصد معنی دار بود.

جدول ۱- تجزیه واریانس برخی از صفات رشد تحت تأثیر تیمارهای روی و سیلیکون و تأثیر متقابل آنها بر یکدیگر در بخش‌های مختلف گیاه در اتاقک رشد

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن تر بخش هوایی	وزن تر ریشه	وزن تر کل	وزن خشک بخش هوایی	وزن خشک ریشه	وزن خشک کل	نسبت بخش‌هوایی به ریشه
روی	۳	**۶/۶۵	**۳/۱۱	**۱۸/۷۰	**۰/۱۱۹	**۰/۰۱۹	**۰/۲۲۶	**۰/۱۵۵
سیلیکون	۱	**۱۵/۸۷	**۳/۹۸	**۳۵/۷۲	**۰/۲۹۱	**۰/۰۲۷	**۰/۴۹۳	**۰/۵۴۳
روی× سیلیکون	۳	*۱/۷۰	ns۰/۸۹	ns۴/۹۵	ns۰/۰۲۶	ns۰/۰۰۰۸	ns۰/۰۲۶	ns۰/۱۱۳
خطا	۳۱	۰/۳۸۱	۰/۵۸۱	۱/۸۴۴	۰/۰۱۴	۰/۰۰۲	۰/۰۱۵	۰/۰۳۳
کل	۳۸							

** در سطح کمتر از ۱ درصد معنی‌دار است،* در سطح کمتر از ۵ درصد معنی‌دار است، ns نشان‌دهنده معنی‌دار نبودن داده‌ها می‌باشد.

جدول ۲- مقایسه میانگین برخی از صفات رشد گیاه برنج تحت تأثیر تیمارهای روی (میکروگرم در لیتر) و سیلیکون (میلی مولار) کشت شده در اتاق کشت

صفات / تیمار	۱۰ روی		۱ روی	
	صفر سیلیکون	۱/۵سیلیکون	صفر سیلیکون	۱/۵سیلیکون
وزن تر (گرم)				
بخش هوایی	۳/۴۸ ab	۳/۸۶a	۱/۰۴c	۳/۱۳ab
ریشه	۲/۸۰a	۲/۷a	۱/۲۱bc	۲/۲۸a
کل	۶/۲۸a	۶/۵۳a	۲/۲۵b	۵/۴۱a
وزن خشک (گرم)				
بخش هوایی	۰/۴۴a	۰/۴۸a	۰/۱۲b	۰/۳۷a
ریشه	۰/۱۶b	۰/۲۳a	۰/۰۷c	۰/۱۴bc
کل	۰/۵۹a	۰/۷۱a	۰/۱۹b	۰/۵۱a
نسبت بخش هوایی به	۱/۲۵ab	۱/۴۵a	۰/۹۱c	۱/۳۹a

میانگین‌ها در هر ستون که حداقل در یک حرف با یکدیگر با هم مشترک باشند، با آزمون LSD در سطح ۵ درصد معنی‌دار نیستند.

جدول ۳- تجزیه واریانس برخی از صفات رشد تحت تأثیر تیمارهای روی، سیلیکون و تأثیر متقابل آن ها بر یکدیگر در بخش های مختلف گیاه در فضای آزاد

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن تر ریشه	وزن تر بخش هوایی	وزن تر کل	وزن خشک ریشه	وزن خشک بخش هوایی	وزن خشک کل	طول ریشه	طول بخش هوایی	تعداد پنجه
روی	۴	۳/۵۹۳ *	۱۰/۶۵۱ **	۲۶/۴۰۶	۰/۱۳۸ **	۰/۳۱۴ **	۰/۵۴۱ **	ns ۱۲/۰۸۸	۵۸/۶۲۵ **	۳/۳۳۸ **
سیلیکون	۱	ns ۲/۳۶۱	۲۵/۲۶۵ **	۴۳/۰۷۷	۰/۰۴۳ **	۰/۶۱۰ **	۰/۹۸۹ **	ns۲۰/۳۰۶	۱۶۶/۰۵۶ **	۱۱/۰۲۵ **
روی× سیلیکون	۴	ns ۰/۶۴۶	ns ۰/۷۲۶	ns ۲/۰۸۶	ns ۰/۰۱۹	ns ۰/۰۰۹	ns ۰/۰۲۴	ns۵/۷۷۵	ns ۶/۲۷۵	ns ۰/۵۸۸
خطا	۳۰	۱/۰۰۳	۱/۸۵۵	۵/۲۳۲	۰/۰۰۵	۰/۰۶۰	۰/۰۹۱	۵/۳۹۰	۱۳/۳۶۵	۰/۶۷۵
کل	۳۹									

** در سطح کمتر از ۱ درصد معنی‌دار است،* در سطح کمتر از ۵ درصد معنی‌دار است، ns نشان‌دهنده معنی‌دار نبودن داده‌ها می‌باشد.

جدول۴ - مقایسه میانگین برخی از صفات رشد گیاه برنج تحت تأثیر تیمارهای روی (میکروگرم در لیتر) و سیلیکون (میلی مولار) کشت شده در فضای آزاد

تیمار	۱۰ روی		۱ روی	
صفات	صفر سیلیکون	۱/۵سیلیکون	صفر سیلیکون	۱/۵ سلیکون
وزن تر (گرم)				
بخش هوایی	۸/۲۰b	۱۰/۵۲a	۴/۱۵c	۶/۶۰b
ریشه	۵/۵۹b	۶/۵۶a	۲/۷۰d	۴/۸۹c
کل	۱۳/۵۷b	۱۶/۹۵a	۶/۸۵c	۱۲/۱۹b
وزن خشک (گرم)				
بخش هوایی	۱/۳۶ab	۱/۶۹a	۰/۸۳c	۱/۱۷۳bc
ریشه	۰/۴۶b	۰/۵۸a	۰/۲۲c	۰/۴۱۳b
کل	۱/۸۲b	۲/۲۷a	۰/۸۶c	۱/۵۹b
طول (سانتی‌متر)				
بخش هوایی	۴۳/۵bc	۵۰/۳۰a	۳۷/۵c	۴۲/۷۵bc
ریشه	۲۰/۷۵a	۲۱/۵۰a	۱۵/۸۸b	۲۰/۲۵a
تعداد پنجه	۶bc	۷/۵۰a	۵c	۵/۵۰c

میانگین‌ها در هر ستون که حداقل در یک حرف با یکدیگر با هم مشترک باشند، با آزمون LSD در سطح ۵ درصد معنی‌دار نیستند.

جدول ۵- تجزیه واریانس آنزیم‌های مرتبط با تنش تحت تأثیر تیمارهای روی، سیلیکون و تأثیر متقابل آنها بر یکدیگر در بخشهای مختلف گیاه

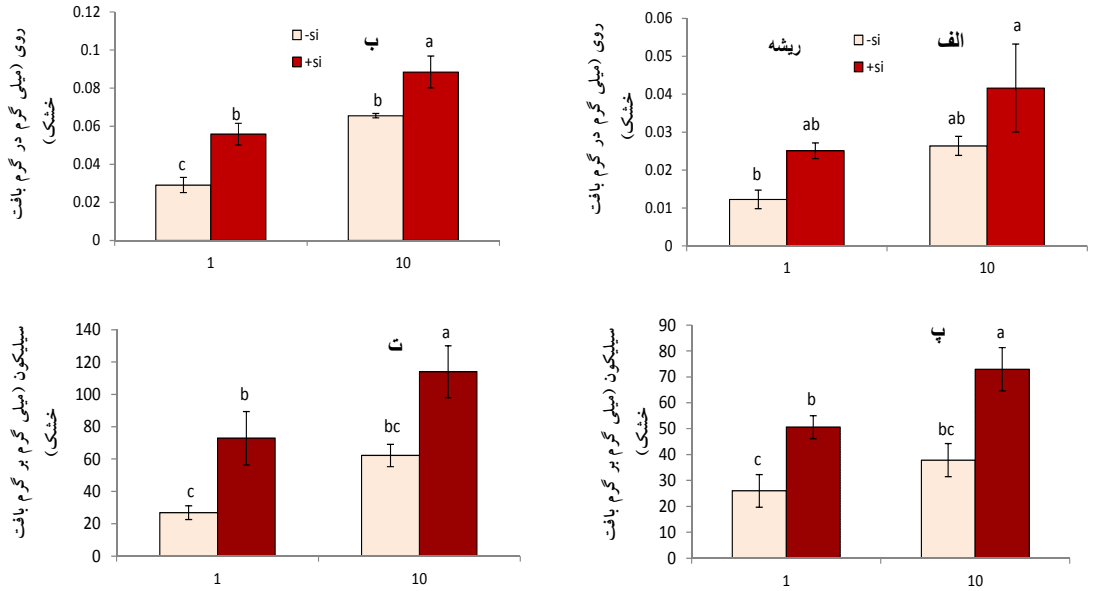
منابع تغییرات	درجه آزادی	کاتالاز		گایاکول پراکسیداز محلول		گایاکول پراکسیداز دیواره ای		پلی فنل اکسیداز	
		ریشه	بخش‌هوایی	ریشه	بخش‌هوایی	ریشه	بخش‌هوایی	ریشه	بخش‌هوایی
روی	۳	ns ۰/۰۰۰۷	**۱۷/۳۵	**۱۶۴۵۴/۴۹	**۴۷/۷۶	**۱۶۹/۳۸	*۵/۷۹	** ۰/۰۰۰۰۵	ns ۰/۰۰۰۰۴
سیلیکون	۱	ns۰/۰۰۰۰۴	*۳/۸۹	ns۲۲/۹۱	**۳۱۴/۲۲	**۱۹۷۹/۴۴	ns۱/۳۲	**۰/۰۰۰۲	**۰/۰۰۰۳
روی× سیلیکون	۳	ns۰/۰۰۰۵	ns۲/۰۷	**۶۶۲۹/۴۴	ns۴/۸۸	**۲۰۴/۵۹	**۱۹/۹۶	* ۰/۰۰۰۰۲	*۰/۰۰۰۱
خطا	۱۶	۰/۰۰۰۴	۰/۶۹	۱۳۸/۴۹	۷/۷۲	۶/۳۱	۱/۳۱	۰/۰۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۲
کل	۲۳								

** در سطح کمتر از ۱ درصد معنی‌دار است،* در سطح کمتر از ۵ درصد معنی‌دار است، ns نشان‌دهنده معنی‌دار نبودن داده‌ها می‌باشد.

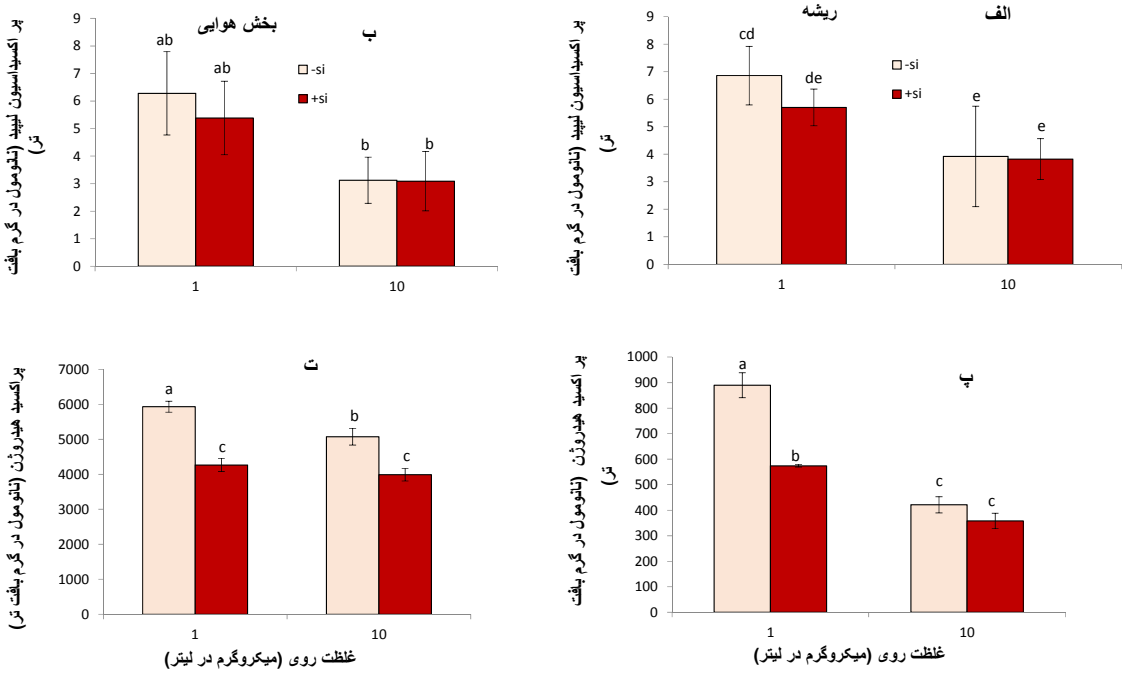
جدول ۶- مقایسه میانگین آنزیم‌های مرتبط با تنش تحت تأثیر تیمارهای روی و سیلیکون در بخش‌های مختلف گیاه

صفات \ تیمار	۱۰ روی		۱ روی	
	صفرسیلیکون	۱/۵ سیلیکون	صفر سیلیکون	۱/۵ سیلیکون
کاتالاز (نانومول بر دقیقه بر گرم بافت تر)				
بخش‌هوایی	۷۵۴۰a	۵۶۰۰b	۳۱۴۰c	۲۸۸۰c
ریشه	۵۳/۳۳a	۲۳/۳۳a	۳۳/۳۳a	۴۳/۳۳a
پراکسیداز محلول (میکرومول بر دقیقه بر گرم بافت تر)				
بخش‌هوایی	۴۴/۸۹a	۳۷/۱۴bc	۴۱/۲۰ab	۳۳/۷۶cd
ریشه	۱۳۰/۳۸c	۱۳۵/۴۹bc	۳۳/۹۸e	۵۰/۶۸e
پراکسیداز دیواره‌ای (میکرومول بر دقیقه بر گرم بافت تر)				
بخش‌هوایی	۵/۸۶c	۹/۴۲ab	۱۰/۸۸a	۶/۱۸c
ریشه	۴۰/۱۵a	۱۲/۰۸c	۲۰/۱۲b	۱۳/۸۲c
پلی فنل اکسیداز (نانومول بر دقیقه بر گرم بافت تر)				
بخش‌هوایی	۲۶/۶۶bc	۳۰abc	۳۳/۳۳ab	۲۶/۶۶bc
ریشه	۱۰b	۲۰a	۱۰b	۱۶/۶۶a

میانگین‌ها در هر ستون که حداقل در یک حرف با یکدیگر با هم مشترک باشند، با آزمون LSD در سطح ۵ درصد معنی‌دار نیستند.



شکل ۱- مقایسه تأثیر تیمارهای روی و سیلیکون بر میزان روی الف- ریشه، ب- بخش هوایی و میزان سیلیکون پ- ریشه و ت- بخش‌هوایی. نقاط دارای حداقل یک حرف مشترک با آزمون LSD در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.



شکل ۲- مقایسه تأثیر تیمارهای روی و سیلیکون بر میزان پراکسیداسیون لیپید الف- ریشه، ب- بخش هوایی و پر اکسید هیدروژن پ- ریشه و ت- بخش‌هوایی. نقاط دارای حداقل یک حرف مشترک با آزمون LSD در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

اثر روی بر فعالیت این آنزیم بی معنی بود. برهم‌کنش روی و سیلیکون هم در ریشه و هم در بخش هوایی در سطح کمتر از ۰/۰۵ معنی دار بود. مطابق با جدول مقایسه میانگین (جدول ۶) تحت تیماردهی روی فعالیت آنزیم

پلی‌فنل‌اکسیداز ریشه و بخش‌هوایی اختلاف معنی‌داری نشان ندادند، در حالی‌که با کاربرد سیلیکون فعالیت آنزیم در ریشه، تحت کمبود روی و در تیمار شاهد افزایش پیدا کرد. اما این تغییرات در بخش هوایی معنی‌دار نبود (جدول ۶).

مقدار لیگنین، کلروفیل و پروتئین‌های محلول: نتایج بررسی انجام شده در اتاق کشت نشان داد که تحت شرایط کمبود روی میزان کلروفیل a و کلروفیل b نسبت به تیمار ۱۰ میکروگرم در لیتر روی (شاهد) تغییری نشان نداد، در حالی‌که میزان کاروتنوئیدها نسبت به تیمار شاهد کم شد. کاربرد سیلیکون منجر به افزایش معنی‌دار میزان کلروفیل b شد. به علاوه، کاربرد سیلیکون میزان کاروتنوئیدها را در تیمار ۱ میکروگرم در لیتر ۳۷/۶ درصد افزایش داد (شکل ۳).

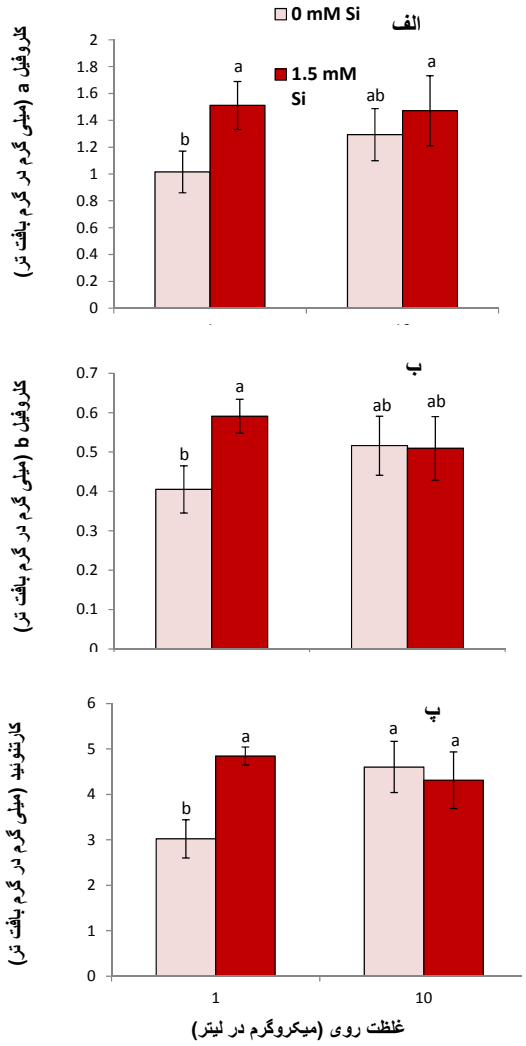
کاهش میزان روی در محیط کشت سبب کاهش معنی‌دار مقدار پروتئین‌های ریشه (شکل ۴ الف) و بخش‌هوایی (شکل ۴ ب) گیاه شد، به طوری که مقدار پروتئین‌های محلول تحت کمبود روی در بخش هوایی نسبت به تیمار شاهد ۱۰/۲ و در ریشه ۵/۲ درصد کاهش یافت.

حضور سیلیکون منجر به افزایش معنی‌دار میزان پروتئین‌های محلول در تیمار ۱ میکروگرم در لیتر به میزان ۱۵/۳ درصد در بخش‌هوایی شد (شکل ۴ ب).

تحت تیمارهای روی میزان لیگنین در ریشه (شکل ۴ پ) و بخش هوایی (شکل ۴ ت) در تیمار ۱ میکروگرم در لیتر نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. در حالی‌که کاربرد سیلیکون مقدار لیگنین را هم در ریشه و هم در بخش-هوایی افزایش داد (شکل ۴ پ و ت).

بحث و نتیجه‌گیری کلی

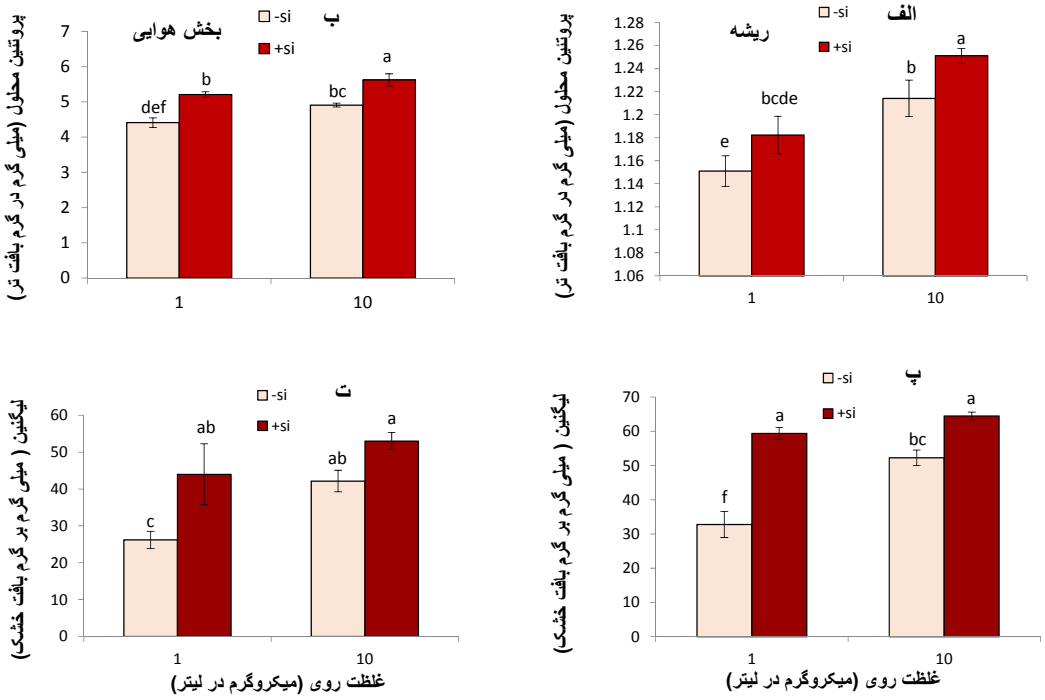
روی از جمله عناصر موردنیاز برای رشد مطلوب گیاه است. بر اساس نتایج حاصل از کشت گیاه برنج در اتاقک کشت و در فضای آزاد کمبود روی سبب ظهور لکه‌های نکروزی قهوه‌ای روی برگ‌ها و کاهش وزن تر و خشک و طول ریشه و نسبت بخش هوایی به ریشه گیاه نسبت به تیمار شاهد شد (جدولهای ۲ و ۴) که توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است (۱۶).



شکل ۳- مقایسه میانگین تیمارهای روی و سیلیکون بر میزان الف- کلروفیل a، ب- کلروفیل b و پ- کاروتنوئیدها و گزانتوفیل‌ها. نقاط دارای حداقل یک حرف مشترک با آزمون LSD در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

کاهش شدید رشد ریشه در گیاهان دارای کمبود روی در گیاهان مختلف گزارش شده است (۱۵ و ۳۳ و ۳۶). احتمالاً این امر به کاهش صدور قندها از طریق آوند آبکش به ریشه مربوط می‌شود (۲۹)، هرچند در کمبود روی رشد

بخش هوایی معمولاً بیش از رشد ریشه مهار می‌شود و رشد ریشه حتی ممکن است در مقابل هزینه کاهش رشد بخش هوایی زیاد شود (۴۶). این امر در کاهش نسبت بخش‌هوایی به ریشه گیاهان مشاهده شده در این پژوهش نیز منعکس است. لذا، نسبت وزنی بخش هوایی به ریشه حساس‌ترین عامل ارزیابی مقاومت گیاهان به تنش کمبود روی است (۴۱).



شکل ۴- مقایسه میانگین تیمارهای روی و سیلیکون بر میزان پروتئین الف- ریشه، ب- بخش هوایی و لیگنین پ- ریشه و ت- بخش‌هوایی. نقاط دارای حداقل یک حرف مشترک با آزمون LSD در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

در شرایط طبیعی پراکسید هیدروژن و رادیکال‌های آزاد اکسیژن در بخش‌های مختلف سلول‌های گیاهان ایجاد می‌شود. هر چند در شرایط متداول سوپراکسیددیسموتاز رادیکال آزاد را از بین می‌برد و کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز به سادگی پراکسیدهیدروژن را تجزیه می‌کنند (۸). بخش زیادی از صدمات تنش کمبود روی ناشی از تشدید تنش اکسیداتیو است. این امر به دلیل زایش بیشتر رادیکال‌های آزاد با جایگزینی آهن به جای روی در ساختار پروتئین‌ها و افزایش فعالیت NAD(P)H اکسیداز و نیز کاهش حذف این رادیکال‌های آزاد با آنزیم‌هایی مانند سوپراکسیددیسموتاز است (۲۹ و ۴۳). پراکسیداسیون لیپید در شرایط کمبود روی زیاد شد، هر چند که افزایش آن معنی‌دار نبود. در این بررسی در تیمار ۱ میکروگرم در لیتر، میزان پراکسید هیدروژن به ویژه در ریشه زیاد شد (شکل ۲)، این امر حاکی از آن است که کمبود روی با کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز بخش‌هوایی، آنزیم گایاکول‌پراکسیداز محلول و دیواره‌ای ریشه همراه بود (جدول ۶)، که نشان دهنده کاهش سم‌زدایی پراکسید هیدروژن با این آنزیم‌ها و احتمالاً دلیل افزایش غلظت پراکسید هیدروژن است (شکل ۲). در نتیجه در کمبود روی پراکسیداسیون لیپید در بخش-هوایی افزایش یافت که حاکی از تشدید تنش اکسیداتیو است. میو و همکاران (۳۲) نیز نشان دادند که سیلیکون با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت و کاهش میزان پراکسیدهیدروژن سبب بهبود برخی از اثرات ناشی از کمبود پتاسیم در گیاه سویا شد. کاهش مقدار کلروفیل و کاروتنوئیدهای مشاهده شده در گیاهان دارای کمبود روی

احتمالاً نتیجه این امر است (۲۹). بخشی از کاهش میزان پروتئین‌ها نیز می بایست به تجزیه آنها با تشدید تنش اکسیداتیو مربوط باشد (۲۹)، هرچند که در اثر کمبود روی سنتز پروتئین‌ها نیز کاهش می‌یابد و اسیدهای آمینه انباشته می‌شوند. علت این امر کاهش انتقال اسیدهای آمینه و همچنین افزایش تجزیه و تخریب RNA است. در اثر کمبود روی فعالیت آنزیم RNAase افزایش می‌یابد که این امر موجب تخریب RNA و کاهش سنتز پروتئین می‌گردد. نتایج آزمایش‌های ما نیز نشان داد که کمبود روی با کاهش لیگنین در گیاه همراه بود که محتمل است به کاهش فعالیت آنزیم‌های دخیل در سنتز آن مثل پلی فنل اکسیداز مربوط باشد (شکل‌های ۳ و ۴). این نتایج آشکار می‌کند که کمبود روی با تشدید تنش اکسیداتیو، کاهش پروتئین‌ها، رنگیزه‌های گیاه و احتمالاً کاهش افراشتگی گیاه با کاهش لیگنین سبب کاهش رشد گیاه شده است.

بر اساس نتایج آزمایشهای ما، کاربرد سیلیکون تحت کمبود روی (۱ میکروگرم در لیتر) در اتاق کشت نشان داد که وزن تر و خشک بخش‌هوایی، وزن کل گیاه و نسبت بخش‌هوایی به ریشه در مقایسه با تیمار فاقد سیلیکون افزایش یافت (جدول ۲). کشت گیاه برنج در فضای آزاد نیز نشان داد که کاربرد سیلیکون تحت کمبود روی، وزن تر و خشک ریشه و بخش‌هوایی و طول ریشه را افزایش داد (جدول ۲). این نتایج نشان می‌دهد که سیلیکون اثرات زیان‌بار کمبود روی را در کاهش رشد گیاه تخفیف می‌دهد. بیتیوت‌اسکی و همکاران (۹) با کاربرد سیلیکون در گیاه خیار رشد کرده تحت شرایط کمبود آهن، روی و منگنز نشان دادند که سیلیکون رشد گیاه خیار را در شرایط کمبود روی بهبود می‌بخشد. بررسی میزان انباشتگی روی نشان داد که تغذیه سیلیکون توانست میزان انباشتگی این یون را هم در ریشه و هم در بخش هوایی گیاه افزایش دهد. مهربان و همکاران (۳۰) نشان دادند که کاربرد سیلیکون در شرایط کمبود روی غلظت برخی عناصر مانند فسفر و پتاسیم را در گیاه افزایش داده و رشد گیاه برنج را افزایش می‌دهد. آنها این امر را به کارکرد بهتر غشاهای زیستی با تغذیه سیلیکون نسبت دادند. مالمیر و رودی (۲) گزارش کردند که سیلیکون، تجمع پتاسیم را در ریشه و برگ های دو رقم از برنج ایران افزایش می‌دهد (۲). بنابراین به نظر می‌رسد که بخش زیادی از اثرات سیلیکون در تخفیف کمبود روی مربوط به افزایش انباشتگی این عنصر باشد (۳۰).

سیلیکون توانست تحت کمبود روی در تیمار ۱ میکروگرم در لیتر فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز ریشه (جدول ۳) را افزایش دهد. پلی‌فنل اکسیداز اکسیداسیون فنلیک‌ها را به عنوان پیش‌ساز لیگنین کاتالیزوری می‌کند (۱۸). فعالیت آنزیم در نتیجه حضور سیلیکون منجر به افزایش میزان لیگنین در تیمار ۱ میکروگرم در لیتر شد (شکل ۴). الکساندر و همکاران (۵) نیز نشان دادند که سیلیکون منجر به افزایش لیگنینی شدن ریشه برنج می‌شود. احتمالاً افزایش لیگنین در بخش‌هوایی گیاه موجب بهبود افراشتگی و افزایش سطح فتوسنتزی و جذب بهتر نور توسط گیاه می‌گردد.

نتایج این پژوهش آشکار کرد که کاربرد سیلیکون احتمالاً با افزایش رنگیزه‌ها و پروتئین ها در بهبود رشد نسبت به فقدان سیلیکون در شرایط کمبود روی در اتاقک رشد مؤثر بوده است. در فضای آزاد نیز بهبود رشد گیاهان با کاربرد سیلیکون نسبت به فقدان آن در شرایط کمبود روی احتمالاً با کاهش تنش اکسیداتیو و افزایش میزان جذب روی مرتبط بوده است.

منابع

۱- اسمعیلی کناری، س.، حسین زاده تمین، م.،کیارستمی، خ. و فلاح، ا. ۱۳۹۴. بررسی اثرات دگرآسیبی علف هرز سوروف (*Echinochola cruss- galli* L.) بر روی برخی صفات تشریحی برنج (*Oryza sativa* L.) رقم زراعی طارم محلی در

مراحل گلدهی و رسیدن دانه. مجله پژوهش های گیاهی، دوره ۲۸، ش ۴، ص ۶۹۵ تا ۷۱۱.

۲- مالمیر، ح. ع.، و رودی، س. ۱۳۹۳. اثر سیلیکون روی میزان فیتوکلات، کربوهیدرات غیرساختمانی و K در دو رقم برنج ایران *Oriza sativa*. مجله پژوهش های گیاهی، دوره ۲۷، ش ۵، ص ۹۳۷ تا ۹۴۸.

۳- ملکوتی، م. ج.، و همایی، م. ۱۳۷۳. حاصلخیزی خاک‌های مناطق خشک و مشکلات و راه‌حل‌ها. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، چاپ اول. ص ۵۷ تا ۵۹.

۴- ملکوتی، م. ج.، ۱۳۷۵. کشاورزی پایدار و افزایش عملکرد با بهینه‌سازی مصرف کود در ایران. انتشارات سازمان تحقیقات و آموزش و ترویج کشاورزی.

5- Alexander, T.F., Thandar, N., Cornelia, R., Frank, S., Marc, Z., Manfred, K.S. 2011. Silicon enhances suberization and liagnification in roots of rice (*Oryza sativa*). Experimental Botany. 6: 2001-2011.

6- Alloway, B. J. 2008. Zinc in Soils and Crop. Nutrition International Fertilizer Industry Association. 28 rue Marbeuf 75008 Paris, France.

7- Arnon, D.I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. poly phenol oxidase in *Beta Vulgaris*. Plant Physiology. 24: 1-15.

8- Arora, A., Sairam, RK., Srivastava, G.C. 2002. Oxidative stress and antioxdative system in plants. Current Science., 82,1227-1338.

9- Bityutskii, N., Pavlovic, J., Yakkonen, K., Maksimovic, V., Nikolic, M. 2014. Contrasting effect of silicon on iron, zinc and manganese status and accumulation of metal-mobilizing compounds in micronutrient-deficient cucumber. Plant physiology and Biochemistry. 74: 20-211.

10- Bradford, 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.

11- Broadley, M.R,, White, P.J., Bryson R.J., Meacham, M.C., Bowen, H.C., Johnson., S.E., Hawkesford, M.J., McGrath, S.P., Zhao, F.J., Breward, N., Harriman, M., Tucker, M. 2006. Biofortification of UK food crops –Cocker, K.M., Evans.

12- Chance, B. and Maehly, C. 1955. Assay of catalase and peroxidases. Methods in Enzymology. 2: 764-775

13- Du, Z., and Bramlage, W.J. 1992. Modified thiobarbituric acid assay for measuring lipid oxidation in sugar–rich plant tissue extracts. Journal of Agriculture Food Chemistry, 40: 1566–1570

14- Epstein, E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. Review. Proceedings of the National Academy of Sciences USA. 91: 11-17

15- Gang, X.M., L.D. Chu, L.J. Mei1, Q.D. Zhu, K.Yagi, and Y. Hosen. 2008. Effects of organic manure application with chemical fertilizers on nutrient absorption and yield of rice in hunan of southern China. Agri. Sci. in China. 7-(10):1245-1252.

16- Guo, W., Hou, Y.L., Wang, S.G., Zhu, Y.G. 2005. Effect of silicate on the growth and arsenate uptake by rice (*Oryza Sativa L.*) seedling in solution cultivare. Plant Soil . 272: 173-181

17- Hattori, T., Inanaga, S., Araki, H., An, P., Morita, S., Luxova, M., Lux, A. 2005. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. Physiologia Plantarum. 123 :459-466

18- Hernandez-Romero, D., Solano, F., Sanchez-Amat, A. 2005. Polyphenol Oxidase Activity Expression in Ralstonia solanacearum. Applied and Environmental Microbiology., 71: 6808-6815

19- Hossain, M.T., Mori, R., Wakabayashi, K .S. K . 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

20- Inal, A., Pilbeam, D.J. and Gunes, A. 2009. Silicon increases tolerance to boron toxicity and reduces oxidative damage in barley. Plant Nutrition. 32: 112–128

21- Inanaga, S. Okasaka, A .1995 .Calcium and silicon binding compounds in cell walls of rice shoots. Soil Science and Plant Nutrition. 41:103-110

22- Inanaga, S., Okasaka, A., Tanaka, S .1995 .Does silicon exist in association with organic

compounds in rice plant? Soil Science and Plant Nutrition. 41 :111-117

23- Kar, M. and Mishra, D. 1976. Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence .Plant Physiology .57: 315-319

24- Khoshgoftar manesh, A.H. 2007. Evaluation of Plant Nutrition Status and Optimum Fertilizer Management. Isfahan University of Technology Press. 158p. (In Persian)

25- Liu, X. and Huang, B. 2000. Heat stress injury in relation to membrane lipid peroxidation in creeping. Crop Science. 40: 503-510

26- Lux, A., Luxova, M., Hattori, T., Inanaga, S., Sugimoto, Y. 2002. Silicification in sorghum (Sorghum bicolor) cultivars Ma, J. F., Yamaji, N. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. Trends Plant Sci. 11: 392-397

27- Ma, J.F. Takahashi, E. 2002b. Functions of silicon in plant growth. In: Ma, J. F., Takahashi, E (eds) Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan, 1st edn. Elsevier Science Amsterdam The Netherlands. Pp: 107–180

28- Ma, K., Yamaji, N., Mitani, N., Konishi, S., Katsuhara, M., Ishiguro, M., Murata, Y., Yano, M. 2006. A Silicon transporter in rice. Nature. 440: 688-691

29- Marschner, P. 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 3rd Ed. Academic Press, London, altham, San Diego.

30- Mehrabanjoubani, P., Abdolzadeh, A., Sadeghipour, H.R., Aghdasi, M. 2014. Impacts of silicon nutrition on growth and nutrient status of rice plants grown under varying zinc regimes. Theoretical and Experimental Plant

Physiology. 27: 19-29

31- Menzies, J.G., Bowen, P.A., Ethret, D.L., Glass, A.M.D. 1992. Foliar applications of potassium silicate reduce severity of powdery mildew on cucumber, muskmelon, and zucchini squash. Journal of the American Society for Horticultural Science. 117: 902-905

32- Miao, B.H., Han, X.G., Zhang. W.H. 2010. The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. Annals of Botany. 105: 967-973

33- Natesan, A. and Senthil Kumar, 2001. Studies on zinc use efficiency in wheat genotypes. Division of Plant Physiology, IARI, New Delh

34- Paivoke, A. 1983. The long term effect of zinc on growth and development, chlorophyll content and nitrogen fixation in the garden pea. Annales Botanici Fennici 20: 205-213.

35- Pascual, MB1., Echevarria, V2., Gonzalo, MJ3., Hernández-Apaolaza, L4. 2016. Silicon addition to soybean (Glycine max L.) plants alleviate zinc deficiency.Plant Physiol Biochem. 11;108:132-138.

36- Prychid, C.J., Rudall, P.J., Gregory, M .2004 . Systematics and biology of silica bodies in monocotyledons. Botanical Review. 69 :377-440

37- Sang, G.K., Ki, W.K., Eun, W.P., Diol, C .2002 . Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves: A possible cellular mechanism of enhanced host resistant to blast . Biosciense and Biotechnology Taejon. 30-333

38- Sergiev, I., Alexieva, V. and Karanov, E. 1997. Effect of spermine, atrazine and combination between them on some endogeneus protective systems and stress markers in plants. Comptes Rendus de Academie Bulgare des Sciences. 51: 121-124

39- Sommer, M., Kaczorek, D., Kuzyakov, Y., Breuer, J. 2006. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes – a review. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 169: 310-329

40- Story, J.B. 2007. Zink. In: Handbook of Plant Nutrition, edited by Allen V. Barker and David J. Pilbeam. Taylor & Francis Group, LLC

41- Sudhalakshmi C., Krishnasamy R., and A. Rajarajan. 2007. Influence of Zinc Deficiency on Shoot / Root Dry Weight Ratio of Rice Genotypes. Research Journal of Agriculture and Biological Sciences, 3(4): 295-298.

42- Takahashi, E., Ma, J.F. and Miyake, Y. 1990. The possibility of silicon as an essential element for higher plants. Comments on Agricultural and Food Chemistry. 2: 99-122

43- Tiryakioglu, M., Eker, S., Ozkutlu, F., Husted, S., Cakmak, I. 2006. Antioxidant defense system and cadmium uptake in barley genotypes differing in cadmium tolerance. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. 20: 181–189

44- Vallee, B.L., and Auld,D.S. 1990. Zinc coordination, function and structure of zinc enzymes and other proteins. Biochemistry 29: 5647-5659

45- Yoshida, S., Forno, D.A., Cock, J.H., Gomez, K.A. 1976. Laboratory manual forphysiological

studies of rice. Los Baños (Philippines) International Rice Research Institute

46- Zhang, F., Romheld, V. and Marschner, H. 1991. Release of zinc mobilizing root exudates in different plant species as affected by zinc nutritional status. Journal of Plant Nutrition. 14: 675-686.

47- Zimmer, M. 1999. Combined methods for the determination of lignin and cellulose in leaf litter. Sciences of Soils. 4: 20-32

Effects of silicon application on growth improvement and oxidative stress reduction rice plants grown under Zn deficiency

Seraji Z., Abdolzadeh A. and Sadeghipour H.R.

Biology Dept., Faculty of Science, Golestan University, Gorgan, I.R. of Iran

Abstract

Zinc is one essential micronutrient in all plants that its deficiency is widespread in Iran. Effects of silicon on alleviation of deficiency or toxicity of some minerals have been reported. In order to evaluation of effects of silicon on mitigation of Zn deficiency on rice plants, experiments carried out in growth chamber or outdoor. Plants cultivated in hydroponics culture with two levels of Zn treatments including 1 and 10 μgL^{-1} Zn and two levels of Si including 0, 1.5 mM. The results indicated that fresh and dry weights, root lengths of plants and shoot to root ratios decreased Zn deficiency compared to controls; however, Si application increased fresh and dry weights, root lengths and shoot to root ratios of plants in Zn-deficient treatment. Zn deficiency imposed decreased of Zn accumulation in plants that led to increase of H_2O_2 level and lipid peroxidation and decrease of chlorophyll and soluble proteins in plants. On the contrary, Si application increased Zn accumulation in Zn - deficient plants. In addition, reduction of H_2O_2 level following Si application in plants grown under Zn deficiency may indicated decrease of oxidative stress in plants. As a results, chlorophyll b, carotenoids and xanthophylls, soluble proteins increased in shoot of Zn-deficient plants due to Si nutrition. The Si nutrition increased poly phenol oxidase activity in roots that probably led to increase of lignin in Zn - deficient plants. The results indicated Si application could reduce oxidative stress and chlorophyll and soluble protein depletion of plants grown under Zn deficiency by increase of Zn content that led to better growth of rice plants.

Key words: Zn nutrition, Silicon, Rice