اثرات تغذیه سیلیکون بر کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از شوری در گیاه آرابیدوپسیس تالیانا (*Arabidopsis thaliana*)

هادی شمس[۱]، احمد عبدلزاده[۱*]، حمیدرضا صادقی‌پور[۱]، پویان مهربان جوبنی[۲] و محمد باقر باقریه نجار[۱]

[۱] ایران، گرگان، دانشگاه گلستان، دانشکده علوم، گروه فیزیولوژی گیاهی

[۲] ایران، ساری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکده علوم دامی و شیلات، گروه علوم پایه

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱/۲۸

چکیده

در این پژوهش اثرات تغذیه سیلیکون در گیاه آرابیدوپسیس تحت تنش شوری در شرایط کشت هیدروپونیک مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایشات در قالب طرح کاملاً تصادفی و بصورت فاکتوریل انجام شد. فاکتور اول، شوری در سطوح ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار بصورت کلرید سدیم و فاکتور دوم، سیلیکون در سطوح ۰ و ۱/۵ میلی‌مولار بصورت سیلیکات سدیم بود. نتایج کشت گیاهان آشکار ساخت که در نتیجه تنش شوری تا تیمار ۱۵۰ میلی‌مولار میزان یون سدیم در گیاه افزایش و درصد آب نسبی و مقدار کلسیم، پتاسیم و منیزیم بترتیب در حدود ۲۷، ۴۹، ۶۶ و ۱۹ درصد نسبت به گیاه شاهد کاهش یافته است. این امر احتمالاً با القا تنش اکسیداتیو سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و مقدار فنل‌ها شد که منجر به کاهش رشد گیاهان تحت تنش شوری گردید. بعلاوه، تنش شوری قندهای محلول را افزایش و نشاسته را کاهش داد که احتمالاً تلاش گیاه برای تنظیم اسمزی ناکافی را آشکار می‌سازد. تغذیه سیلیکون همراه با افزایش مقدار پتاسیم و منیزیم و نیز افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از شوری را سبب شد. بعلاوه، افزایش مقدار قندهای احیایی، کاهش نشاسته و افزایش میزان آب نسبی با تغذیه سیلیکون در گیاهان تحت شوری بهبود وضعیت آب گیاهان را نشان می‌دهد. در نتیجه گیاهان تغذیه‌شده با سیلیکون تحت شوری نسبت به گیاهان بدون سیلیکون رشد بهتری داشتند. این نتایج نشان داد که سیلیکون با کاهش تنش اکسیداتیو و بهبود وضعیت آب، تنش شوری را در گیاه آرابیدوپسیس تخفیف می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سیلیکون، شوری، آرابیدوپسیس، کشت هیدروپونیک.

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۱۷-۳۲۲۴۵۸۸۲، پست الکترونیکی: ah_ab99@yahoo.com

مقدمه

تنش‌های محیطی هم رستنی‌های طبیعی و هم گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار داده و از رشد و بازده آن‌ها کم می‌کند. شوری یک عامل محدود کننده مهم در رشد و بازدهی محصولات است و از بین تنش‌های محیطی گیاهان، به جهت وسعت خاک‌های شور در دنیا از اهمیت زیادی برخوردار است (۳۳، ۳۶). اثرات اولیه تنش شوری شامل کمبود آب و عدم توازن میزان یون‌ها است. کاهش آب گیاه در اثر شوری مربوط به کاهش توان گیاه در جذب آب از خاک شور است (۱۴، ۱۵، ۳۶). علاوه بر این، تنش شوری رشد و نمو گیاهان را از طریق سمیت یونی تحت تأثیر قرار می‌دهد، اثرات صدمه‌زننده‌ای که ناشی از زیادی یون‌های Na^+ و Cl^- است. در این شرایط یون Na^+ دیگر قابلیت بخش‌بندی به داخل واکوئل‌های گیاه را ندارد. بعلاوه تنش شوری موجب بروز اختلالات تغذیه‌ای و کمبود عناصر معدنی مورد نیاز گیاهان شیرین‌رست می‌شود و سرانجام تمام این پیامدها منجر به مرگ گیاه می‌گردد (۷،

۳۳، ۳۶). معمولاً آستانه‌ای از غلظت نمک وجود دارد که بالاتر از آن شیرین‌رست‌ها علائم بازدارندگی رشد، زردی و سفیدی و کاهش وزن را نشان می‌دهند. اثرات ثانویه تنش شوری شامل کاهش رشد، کاهش فتوسنتز، ایجاد رادیکال‌های آزاد (ROS)، اختلال در عمل غشاها، کاهش فعالیت‌های متابولیسمی سلول و تقسیم سلولی است (۱۲، ۳۷). فرآیندهایی نظیر جوانه‌زنی بذر، رشد و نیرومندی جوانه، رشد رویشی، گل‌دهی و میوه‌دهی تحت تأثیر میزان بالای نمک کاهش می‌یابند و بطور گسترده‌ای سبب زیان‌های اقتصادی و تولیدی می‌شوند (۲۹، ۳۲، ۳۶).

سیلیکون بعنوان یک عنصر شبه ضروری، دومین عنصر ساختمانی بعد از اکسیژن در پوسته زمین و خاک می‌باشد (۲، ۶، ۲۳، ۲۶). سیلیکون بین ۰/۱ تا ۱۰ درصد وزن خشک گیاهان را تشکیل می‌دهد که این نشان‌دهنده هم‌ارزش بودن این عنصر با عناصر پر مصرف مانند کلسیم (٪ ۰/۶-۰/۱)، گوگرد (٪ ۱/۵-۰/۱)، منیزیم و فسفر در برخی گیاهان است (۲۳، ۲۶، ۳۹). به نظر می‌رسد توانایی گیاهان در جذب سیلیکون قدرت آن‌ها را برای بقاء افزایش می‌دهد. اثرات سودمند سیلیکون در گیاهان به رسوب مقادیر بالای سیلیکون در بافت‌های مختلف و سیلیکون محلول نسبت داده می‌شود (۲۶، ۳۸). این اثرات مربوط به محافظت گیاهان در برابر تنش‌های زیستی و غیر زیستی می‌باشد. فواید زیادی مانند افزایش مقاومت نسبت به آفات و عوامل بیماری‌زا، استقامت در مقابل خشکی و فلزات سنگین و بهبود کیفیت و بازده محصولات کشاورزی در انواع زیادی از گونه‌های گیاهی در ارتباط با سیلیکون گزارش شده است (۲، ۶، ۲۲، ۲۳، ۳۸). گزارشات متعددی مبنی بر تأثیر سیلیکون بر تخفیف تنش شوری در گیاهان مختلف مانند برنج (۳۷)، پوکسینلیا دیستنس (*Puccinellia distans*)(۱)، کلزا (۱۹) و گندم (۳۷) وجود دارد. گزارش شده است که تغذیه سیلیکون احتمالاً با کاهش تنش اکسیداتیو در گیاه علف برهنئی (*Festuca arundinacea*) (۵) و بهبود کارکرد غشاهای زیستی در یونجه (۴) منجر به افزایش رشد این گیاهان تحت تنش شوری شده است. با توجه به ساختار فیزیکی گیاه و شوررست یا شیرین‌رست بودن گیاه، برهم‌کنش شوری با سیلیکون اندکی متفاوت است و لذا نتایج بدست آمده از مطالعه یک گیاه بطور صد در صد قابل تعمیم به گیاهان دیگر نیست.

گیاه آرابیدوپسیس تالیانا (*Arabidopsis thaliana*) بعنوان گیاه مدل در مطالعات زیست‌شناسی مولکولی و ژنتیک استفاده می‌شود و شناسایی توالی ژنوم این گیاه کامل شده است (۳). اخیراً گزارش کردند که کاربرد سیلیکون سبب افزایش بیوسنتز سیتوکینین در گیاه آرابیدوپسیس تالیانا می‌شود که ممکن است اثرات زیان‌بار تنش‌های مختف را در صورت بروز کاهش دهد (۲۷). همچنین، تخفیف سمیت مس با کاربرد سیلیکون در گیاه گیاه آرابیدوپسیس تالیانا گزارش شده است (۲۲). بر این اساس، این پژوهش با هدف بررسی اثرات احتمالی کاربرد سیلیکون در کاهش اثرات زیان‌بار شوری در گیاه آرابیدوپسیس تحت شرایط کشت هیدروپونیک انجام شد. لذا گیاهان تحت شوری با و بدون سلیکون کشت شده و رشد، انباشتگی، برخی یون‌ها، فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و میزان برخی متابولیت‌ها مانند قندهای محلول، نشاسته و پروتئین اندازه‌گیری شد، تا درک بهتری از برهم‌کنش شوری و تغذیه سیلیکون در این گیاه بدست آید.

مواد و روشها

شرایط کشت: بذر گیاه آرابیدوپسیس تالیانا رقم Col-0، از مرکز استوک آرابیدوپسیس ناتینگهام تهیه شد. پس از نگهداری بذرها در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد بمنظور سرمادهی، به مدت ۲-۱ دقیقه با الکل ۷۰ درصد و سپس به مدت ۱۰ دقیقه با آب ژاول ۲۰ درصد استریل شدند. کشت گیاهان در شرایط هیدروپونیک با محلول غذایی هوگلند یک دوم تعدیل شده به روش کشت نشای گیاهچه در اتاقک کشت انجام شد (۳). دمای اتاقک کشت بین ۲۵-

۱۸ درجه سانتی‌گراد و دوره نوری ۱۶ ساعت نور و ۸ ساعت تاریکی، شدت نور در حدود ۲۰۰ میکرومول فوتون در متر مربع در ثانیه و رطوبت نسبی در حدود ۵۰ درصد بود. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی و بصورت فاکتوریل انجام شد. فاکتور اول، شوری در سطوح ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم و فاکتور دوم، سیلیکون در سطوح ۰ و ۱/۵ میلی مولار سیلیکات سدیم بود. تیمارهای شوری و سیلیکون پس از گذشت چهار هفته از شروع کشت بذرها آغاز گردید و بعد از دو هفته تیماردهی برداشت شدند. پس از برداشت گیاهان، ابتدا ریشه‌ها با آب مقطر شسته شده و سپس آب سطحی آن‌ها با دستمال کاغذی گرفته شد. با جدا نمودن دو بخش ریشه و بخش هوایی، وزن تر هر یک جداگانه اندازه‌گیری شد. برای وزن خشک، بخش هوایی در آون و در دمای ۷۵ درجه به مدت ۴۸ ساعت قرار داده و سپس اقدام به اندازه گیری وزن خشک گردید.

اندازه‌گیری عناصر: برای استخراج عنصر سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم مقدار ۰/۰۵ گرم از وزن خشک اندام هوایی گیاهان پودر شده را در داخل بوته چینی ریخته و بمنظور حذف ترکیبات آلی در داخل کوره در دمای ۵۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴ ساعت سوزانده شد. خاکستر بدست آمده در یک میلی لیتر اسید کلریدریک ۶ نرمال محلول و به مدت یک شبانه روز به حالت سکون رها شد. ترکیب بدست آمده با کاغذ صافی واتمن صاف و در نهایت بوسیله آب مقطر به حجم ۱۰ میلی‌لیتر رسانده شد. اندازه‌گیری مقدار سدیم و پتاسیم بوسیله دستگاه فلیم‌فتومتر Jeneway مدل PFP7 انجام شد. برای استاندارد سدیم از کلرید سدیم و همچنین برای استاندارد پتاسیم از کلریدپتاسیم استفاده شد. اندازه‌گیری کلسیم و منیزیم با دستگاه جذب اتمی Shimadzu مدل 7000AA انجام شد. برای رسم استاندارد کلسیم و منیزیم بترتیب از کربنات کلسیم و سولفات منیزیم استفاده شد.

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان: برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز محلول، پلی‌فنل اکسیداز و مقدار پروتئین‌های محلول، عصاره آنزیمی از بافت تر گیاهان با استفاده از بافر فسفات ۱۰۰ میلی‌مولار با اسیدیته ۶/۸ استخراج شد (۲۵) و برای اندازه‌گیری پراکسیداز دیواره‌ای، عصاره آنزیمی از رسوب باقی‌مانده، با استفاده از محلول کلرید سدیم یک مولار استخراج شد. فعالیت آنزیم‌ها از روش اسپکتروفتومتری و با دستگاه شیمادزو اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری آنزیم کاتالاز مخلوط واکنش شامل بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار با اسیدیته ۶/۸، آب اکسیژنه ۱۵ میلی‌مولار و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. عمل اندازه‌گیری در طول موج ۲۴۰ نانومتر انجام گرفت (۱۳). فعالیت آنزیم پراکسیداز با تهیه مخلوط واکنش شامل بافر فسفات ۲۵ میلی‌مولار، گایاکول ۲۰ میلی‌مولار، آب اکسیژنه ۴۰ میلی‌مولار و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی صورت گرفت. فعالیت این آنزیم در حالت سینتیک و در طول موج ۴۷۰ نانومتر اندازه گیری شد (۲۰). برای اندازه گیری آنزیم پلی فنل اکسیداز مخلوط واکنش شامل بافر فسفات ۲۵ میلی‌مولار با اسیدیته ۶/۸، پیروگالل ۱۰ میلی‌مولار و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی استفاده شد (۳۱).

پراکسید هیدروژن و برخی متابولیت‌ها: اندازه‌گیری پروتئین‌های محلول به روش برادفورد (۱۰) انجام شد. عمل استخراج پراکسید هیدروژن بوسیله ۵۵۰ میکرولیتر تری‌کلرواستیک اسید ۰/۱ درصد وزنی حجمی در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد انجام شد (۳۴). برای اندازه‌گیری پراکسید هیدروژن ۵۰۰ میکرولیتر عصاره با ۵۰۰ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰ میلی‌مولار مخلوط و سپس ۱ میلی‌لیتر مخلوط یدید پتاسیم ۱ مولار در بافر فسفات پتاسیم ۱۰ میلی‌مولار به آن افزوده شد و پس از گذشت ۱ ساعت در طول موج ۳۹۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. استخراج فنل و قندها بر اساس روش فوکودا و همکاران (۱۷) انجام شد.

در این روش عصاره حاصل از افزودن ۵ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد به ۰/۰۵ گرم بافت تر نمونه، به مدت ۱۰ دقیقه در بن‌ماری ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. پس از حذف اتانول موجود در محلول شفاف نهایی حاصل از سانتریفیوژ عصاره، بمنظور حذف ترکیبات رنگی با کلروفرم ترکیب و ورتکس گردید. عصاره نهایی برای اندازه‌گیری قندهای غیر احیایی (۱۸)، قندهای احیایی (۳۰) و فنل (۲۱) مورد استفاده قرار گرفت. استخراج و اندازه‌گیری نشاسته از رسوب حاصل از این مرحله به روش مک‌ردی و همکاران (۲۸) انجام شد.

تجزیه آماری: بمنظور آنالیز و تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم افزار Excel و SAS استفاده شد. برای بررسی معنی‌دار بودن اختلاف میانگین داده‌ها نیز از تست دانکن استفاده شد.

نتایج

تغییرات شکل ظاهری گیاهان: نتایج قابل مشاهده کشت آرابیدوپسیس در شرایط کشت هیدروپونیک، در اتاقک کشت آشکار ساخت که شوری موجب کاهش رشد این گیاه می‌شود، در حالی‌که، تیمار سیلیکون اثرات زیان‌بار ناشی از تنش شوری را تا حدودی کاهش می‌دهد. گیاهان دو هفته بعد از تیماردهی تا حدودی تفاوت در رشد را نشان دادند. سطوح مختلف شوری موجب سوختگی برگ‌ها گردید، به‌گونه‌ای که با افزایش شوری میزان سوختگی نیز بیش‌تر گردید. در شوری ۱۵۰ میلی‌مول در لیتر شدیدترین سوختگی برگ‌ها مشاهده گردید. علاوه بر این با افزایش شوری رشد ریشه نیز کاهش یافت و کم‌ترین طول ریشه در شوری ۱۵۰ میلی‌مولار مشاهده شد. با افزایش سطوح شوری تعداد برگ‌های هر گیاه نیز کاهش یافت، به‌گونه‌ای که کمترین تعداد برگ در تیمار ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم مشاهده گردید. سیلیکون تا حدودی با افزایش رشد بخش هوایی و ریشه و همچنین کاهش زرد شدن برگ‌ها سبب بهبود وضعیت رشد گیاهان گردید (شکل ۱).

شکل ۱- مقایسه گیاهان *آرابیدوپسیس تالیانا* رشدیافته تحت تیمارهای مختلف در شرایط کشت هیدروپونیک. بترتیب از راست به چپ عبارتند از: ۱- بدون شوری، ۱/۵ میلی‌مولار سیلیکات سدیم. ۲- بدون شوری، فاقد سیلیکات سدیم. ۳- ۵۰ میلی‌مولار NaCl، ۱/۵ میلی‌مولار سیلیکات سدیم. ۴- ۵۰ میلی‌مولار NaCl، فاقد سیلیکات سدیم. ۵- ۱۰۰ میلی‌مولار NaCl، ۱/۵ میلی‌مولار سیلیکات سدیم. ۶- ۱۰۰ میلی‌مولار NaCl، فاقد سیلیکات سدیم. ۷- ۱۵۰ میلی‌مولار NaCl، ۱/۵ میلی‌مولار سیلیکات سدیم. ۸- ۱۵۰ میلی‌مولار NaCl، فاقد سیلیکات سدیم.

اندازه‌گیری صفات رشد: جدول مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین میزان وزن تر ریشه، بخش هوایی و کل گیاه در تیمار شاهد (بدون شوری) مشاهده شد. افزایش میزان شوری منجر به کاهش معنی‌دار وزن تر ریشه، بخش هوایی و کل گیاه شد. همچنین شوری منجر به کاهش معنی‌دار وزن خشک بخش هوایی و میزان آب نسبی گیاه شد. با افزایش شوری نسبت وزنی بخش هوایی به ریشه نیز کاهش یافت و این کاهش در تیمار ۱۵۰ میلی‌مولار شوری معنی‌دار بود. بالاترین وزن خشک بخش هوایی، میزان آب نسبی، نسبت وزنی بخش هوایی به ریشه در تیمار شاهد شوری و کمترین میزان آن، در تیمار ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم مشاهده شد. کاربرد سیلیکون در تمامی تیمارها تا حدودی سبب افزایش وزن تر بخش هوایی، ریشه و کل شده است، هرچند که این مقدار افزایش معنی‌دار نبود.

همچنین تغذیه گیاهان با سیلیکون منجر به افزایش وزن خشک بخش هوایی شد به نحوی که این افزایش در تیمارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار شوری معنی‌دار شد. بیش‌ترین میزان درصد آب نسبی در تیمار شاهد دارای سیلیکون مشاهده شد. کاربرد سیلیکون در تیمار ۱۵۰ میلی‌مولار موجب افزایش مقدار درصد آب نسبی شد.

کاربرد سیلیکون اثر محسوسی بر نسبت وزن تر بخش هوایی به ریشه نداشت. افزایش میزان شوری منجر به کاهش معنی‌دار طول ریشه گیاه شد. کاربرد سیلیکون علی‌رغم افزایش نسبی وزن ریشه، سبب افزایش طول ریشه نگردید (جدول ۱).

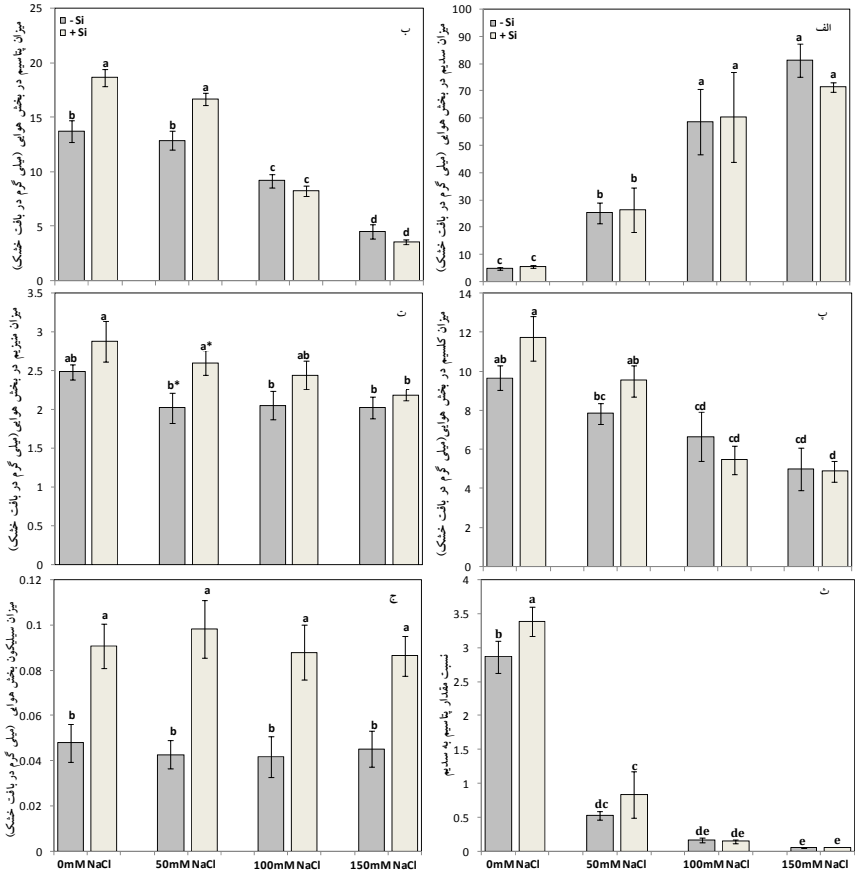
جدول ۱- مقایسه میانگین برخی صفات رشد تحت تأثیر تیمارهای شوری و سیلیکون در گیاه *آرابیدوپسیس تالیانا*

	۰ و ۱/۵ میلی‌مولارسیلیکون	سطوح شوری (میلی‌مولار)			
		۰ (شاهد)	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
وزن تر بخش هوایی (گرم)	-	۰/۶۹۵ ± ۰/۰۳۱^{a}	۰/۳۵۶ ± ۰/۰۲۰^{b}	۰/۱۴۸ ± ۰/۰۱۲^{c}	۰/۰۲۲ ± ۰/۰۰۱^{e}
	+	۰/۷۱۵ ± ۰/۰۲۶^{a}	۰/۳۶۹ ± ۰/۰۱۶^{b}	۰/۱۵۴ ± ۰/۰۲۵^{c}	۰/۰۵۴ ± ۰/۰۰۹^{d}
وزن تر ریشه (گرم)	-	۰/۱۶۹ ± ۰/۰۰۶^{a}	۰/۰۹۴ ± ۰/۰۰۹^{b}	۰/۰۳۳ ± ۰/۰۰۴^{c}	۰/۰۱۵ ± ۰/۰۰۲^{d}
	+	۰/۱۶۸ ± ۰/۰۱۷^{a}	۰/۰۹۴ ± ۰/۰۰۵^{b}	۰/۰۳۷ ± ۰/۰۰۶^{c}	۰/۰۲۴ ± ۰/۰۰۳^{c}
وزن تر کل (گرم)	-	۰/۸۶۳ ± ۰/۰۳۴^{a}	۰/۴۵۰ ± ۰/۰۲۶^{b}	۰/۱۸۲ ± ۰/۰۱۵^{c}	۰/۰۳۶ ± ۰/۰۰۳^{d}
	+	۰/۸۸۳ ± ۰/۰۳۶^{a}	۰/۴۶۲ ± ۰/۰۱۷^{b}	۰/۱۹۱ ± ۰/۰۳۰^{c}	۰/۰۷۸ ± ۰/۰۱۱^{e}
وزن خشک بخش هوایی (گرم)	-	۰/۰۵۷ ± ۰/۰۰۳^{a}	۰/۰۳۰ ± ۰/۰۰۲^{c}	۰/۰۱۸ ± ۰/۰۰۱^{e}	۰/۰۰۹ ± ۰/۰۰۱^{f*}
	+	۰/۰۵۴ ± ۰/۰۰۲^{a}	۰/۰۳۶ ± ۰/۰۰۲^{b}	۰/۰۲۳ ± ۰/۰۰۲^{d}	۰/۰۱۴ ± ۰/۰۰۲^{e*}
نسبت وزن بخش هوایی به ریشه	-	۴/۱۴۱ ± ۰/۱۶۱^{a}	۴/۰۰۹ ± ۰/۳۳۷^{a}	۴/۸۶۹ ± ۰/۴۲۹^{a}	۱/۸۵۷ ± ۰/۳۷۹^{b}
	+	۴/۶۵۲ ± ۰/۴۶۱^{a}	۴/۰۶۳ ± ۰/۳۲۱^{a}	۴/۶۱۱ ± ۰/۶۱۳^{a}	۲/۳۵۶ ± ۰/۳۳۷^{b}
طول ریشه (سانتی‌متر)	-	۱۷/۸۵ ± ۱/۲۱۸^{a}	۱۱/۷۵ ± ۱/۳۹^{c}	۹/۴۰ ± ۰/۵۱^{de}	۷/۸۵۰ ± ۰/۳۰۸^{e}
	+	۱۵/۱۰ ± ۰/۷۹۲^{b}	۱۱/۴۵ ± ۰/۳۶^{cd}	۸/۸۰ ± ۰/۵۶^{e}	۷/۸۰۰ ± ۰/۶۰۲^{e}
درصد آب نسبی	-	۹۱/۵۹ ± ۰/۶۳^{ab}	۹۰/۹۲ ± ۰/۶۶۸^{ab}	۸۶/۷۳ ± ۰/۴۲۶^{c}	۶۷/۳۴۴ ± ۰/۹۷^{e}
	+	۹۲/۳۹۲ ± ۰/۵۱ ^{a}	۹۰/۲۱ ± ۰/۳۹۴^{b}	۸۶/۴۱ ± ۰/۸۱۲^{c}	۷۳/۱۳۸ ± ۰/۶۳^{d}

- و + بترتیب نشان‌دهنده عدم وجود یا وجود سیلیکون ۱/۵ میلی‌مولار در تیمارها است. میانگین‌ها در هر ردیف که حداقل در یک حرف با یکدیگر با هم مشترک هستند با آزمون دانکن در سطح ۵ درصد معنی‌دار (* در سطح ۱۰ درصد) نیستند.

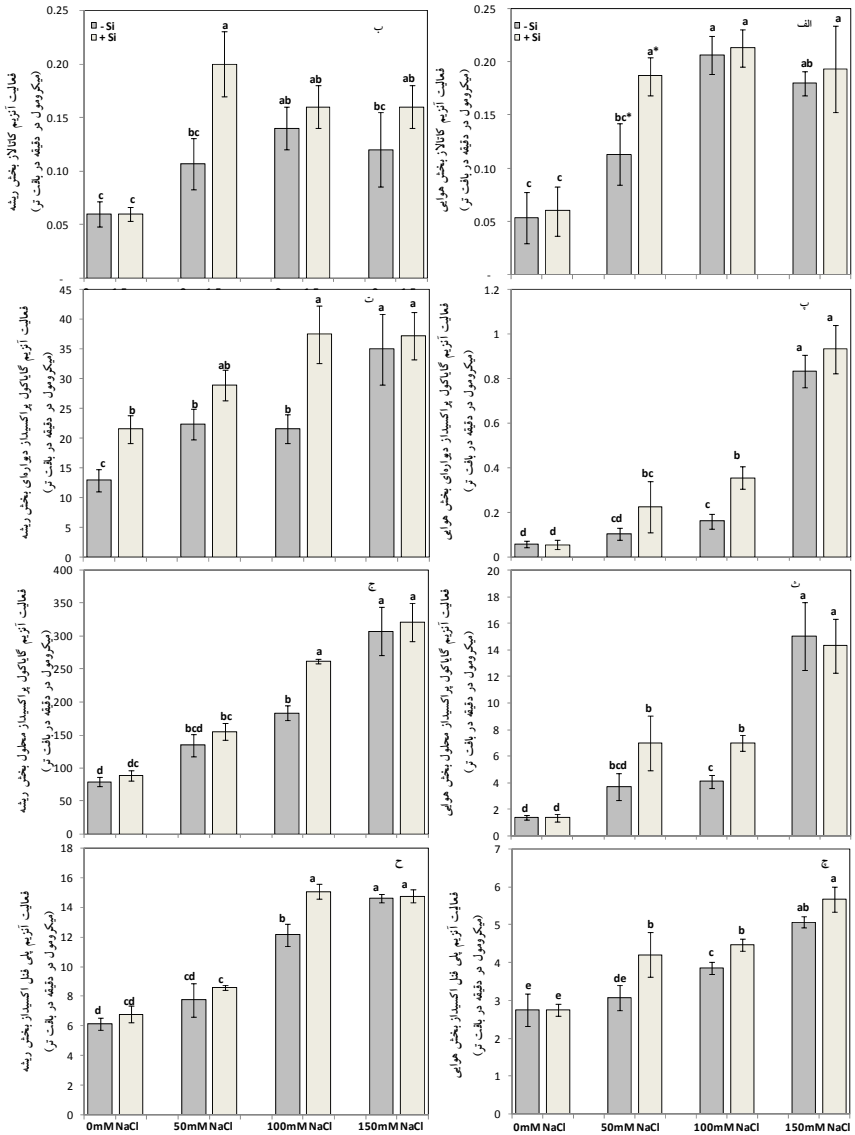
انباشتگی یون‌های سدیم، پتاسیم، سیلیکون، کلسیم و منیزیم: برهم‌کنش شوری و سیلیکون نشان داد که با افزایش شوری، غلظت یون سدیم نیز زیاد می‌شود، به‌گونه‌ای که تیمار ۱۵۰ میلی‌مولار شوری بالاترین غلظت سدیم را داشت. کاربرد سیلیکون تأثیری بر میزان یون سدیم گیاهان تحت شوری نداشت (شکل ۲ الف). تیمارهای شوری باعث کاهش معنی‌دار غلظت پتاسیم در گیاه شدند. بالاترین غلظت یون پتاسیم در تیمار شاهد و ۵۰ میلی‌مولار شوری و کمترین میزان آن در تیمار ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم مشاهده شد. کاربرد سیلیکون در

تیمار ۰ و ۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم موجب افزایش غلظت پتاسیم شد (شکل ۲ ب). با افزایش شوری، نسبت یون پتاسیم به سدیم کاهش معنی‌دار یافت که نشان از افزایش یون سدیم و کاهش یون پتاسیم به موازات افزایش غلظت شوری است. بالاترین نسبت غلظت یون پتاسیم به سدیم در تیمار شاهد مشاهده شد. کم‌ترین نسبت غلظت یون پتاسیم به سدیم در تیمار ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم مشاهده شد. کاربرد سیلیکون موجب افزایش این نسبت در تیمار ۰ و ۵۰ میلی‌مولار شوری شد، به‌گونه‌ای که در تیمار شاهد افزایش معنی‌دار شد (شکل ۲ ث). اثر متقابل شوری و سیلیکون نشان داد که با افزایش شوری غلظت یون کلسیم، کم شد به‌گونه‌ای که این مقدار کاهش در تمامی سطوح شوری بجز تیمار ۵۰ میلی‌مولار شوری در مقایسه با تیمار شاهد معنی‌دار شد. حضور سیلیکون نیز علی‌رغم افزایش غلظت کلسیم گیاه، باعث افزایش معنی‌دار آن نشد (شکل ۲ پ). بالاترین و کم‌ترین غلظت یون منیزیم بترتیب در تیمار شاهد و ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم مشاهده شد. کاربرد سیلیکون موجب افزایش معنی‌دار غلظت یون منیزیم تحت تنش شوری شد. بر هم‌کنش شوری و سیلیکون نشان داد که در تمامی تیمارها، سیلیکون موجب افزایش منیزیم شد، که این افزایش در تیمار ۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم معنی‌دار بود (شکل ۲ ت). نتایج نشان داد که افزایش شوری تأثیری بر میزان سیلیکون بخش هوایی ندارد. کاربرد سیلیکون موجب افزایش معنی‌دار غلظت سیلیکون شد ولی بین تیمارهای مختلف دارای سیلیکون، افزایش معنی‌دار نبود (شکل ۲ ج).



شکل ۲- مقایسه تأثیر تیمارهای شوری و سیلیکون (میلی‌مولار) بر میزان عناصر بخش هوایی گیاه *آرابیدوپسیس تالیانا* الف) سدیم ب) پتاسیم پ) کلسیم ت) منیزیم ث) نسبت مقدار پتاسیم به سدیم ج) سیلیکون. ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک با آزمون دانکن در سطح ۵ درصد (* در سطح ۱۰ درصد) تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

فعالیت آنزیم‌های مرتبط با تنش: با توجه به شکل ۳ مشخص شد که تنش شوری در ریشه و بخش هوایی موجب افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز شد. علاوه بر این مشخص شد که با دادن تیمار شوری، میزان فعالیت آنزیم کاتالاز بخش هوایی در مقایسه با ریشه افزایش بیشتری داشت. بیش‌ترین میزان فعالیت این آنزیم در تیمار ۱۰۰ میلی‌مولار شوری بخش هوایی بود. برهم‌کنش شوری و سیلیکون نشان داد که کاربرد سیلیکون در ریشه منجر به افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در همه تیمارهای کلرید سدیم شد. بطوری‌که فعالیت این آنزیم در تیمار ۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم با حضور ۱/۵ میلی‌مولار سیلیکون نسبت به عدم حضور آن حدود ۲ برابر افزایش داشت. در بخش هوایی نیز، گیاهان تیمار شده با سیلیکون نسبت به گیاهان فاقد آن در تیمارهای شوری فعالیت کاتالاز بیشتری را نشان دادند که این افزایش فعالیت، در تیمار ۵۰ میلی‌مولار شوری معنی‌دار بود (شکل ۳ الف و ب).



شکل ۳- مقایسه تأثیر تیمارهای شوری و سیلیکون (میلی‌مولار) بر میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گیاه *آرابیدوپسیس تالیانا*. ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک با آزمون دانکن در سطح ۵ درصد (* در سطح ۱۰ درصد) تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

نتایج نشان داد که فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز دیواره‌ای در ریشه بسیار بالاتر از بخش هوایی بود. شوری باعث افزایش چشمگیر فعالیت این آنزیم در هر دو قسمت ریشه و بخش هوایی گردید به نحوی که بالاترین فعالیت این آنزیم در تیمار ۱۵۰ میلی‌مولار شوری مشاهده شد. کاربرد سیلیکون در هر دو بخش ریشه و بخش هوایی سبب افزایش معنی‌دار فعالیت این آنزیم شد. بر هم کنش شوری و سیلیکون نشان داد که کاربرد سیلیکون هم در بخش هوایی و هم در ریشه منجر به افزایش فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز دیواره‌ای شد، به‌گونه‌ای که افزایش در تیمار ۱۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم بخش هوایی و ریشه معنی‌دار بود (شکل ۳ پ و ت).

با توجه به شکل ۳ مشخص شد که تنش شوری در ریشه و بخش هوایی، سبب افزایش فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز محلول شد. به گونه‌ای که در هر دو بخش، با افزایش غلظت شوری، میزان فعالیت آنزیم نیز افزایش یافت. در هر دو بخش گیاه، بیش‌ترین فعالیت آنزیم در تیمار ۱۵۰ میلی‌مولار شوری مشاهده شد. میزان فعالیت این آنزیم در بخش ریشه بسیار بالاتر از بخش هوایی بود. برهم‌کنش شوری و سیلیکون نشان داد که کاربرد سیلیکون هم در بخش هوایی و هم در ریشه منجر به افزایش فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز محلول شد، به‌نحوی که افزایش در تیمار ۱۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم بخش هوایی و ریشه معنی‌دار بود (شکل ۳ ث و ج).

نتایج نشان داد که فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز در ریشه بالاتر از بخش هوایی شد. شوری باعث افزایش چشمگیر فعالیت این آنزیم در هر دو قسمت ریشه و بخش هوایی گردید به نحوی که بالاترین فعالیت این آنزیم در تیمار ۱۵۰ میلی‌مولار شوری مشاهده شد. کاربرد سیلیکون در هر دو بخش ریشه و بخش هوایی سبب افزایش معنی‌دار فعالیت این آنزیم شد. برهم‌کنش شوری و سیلیکون نشان داد که کاربرد سیلیکون سبب افزایش فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز در ریشه و بخش هوایی شد، بطوری که این افزایش با حضور ۱/۵ میلی‌مولار سیلیکون نسبت به عدم حضور آن در تیمار ۱۰۰ میلی‌مولار بخش ریشه و در تیمارهای ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم بخش هوایی معنی‌دار شد (شکل ۳ چ و ح).

صفات بیوشیمیایی: جدول مقایسه میانگین (جدول ۲) نشان داد که میزان پروتئین محلول در بخش هوایی بسیار بیشتر از ریشه بود. تیمار ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم در بخش هوایی و ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار شوری در ریشه سبب افزایش معنی‌دار میزان پروتئین محلول شد. در حضور سیلیکون میزان پروتئین‌های محلول ریشه و بخش هوایی نسبت به عدم حضور آن افزایش معنی‌داری را نشان دادند. برهم‌کنش شوری و سیلیکون نشان داد که کاربرد سیلیکون در تیمارهای ۰، ۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم، سبب افزایش معنی‌دار میزان پروتئین‌های محلول ریشه شد. در بخش هوایی حضور سیلیکون افزایش میزان پروتیئن‌های محلول را در تیمارهای شوری بجزء در تیمار ۱۰۰ میلی‌مولار باعث شد، به‌نحوی که افزایش در تیمار ۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم معنی‌دار شد.

نتایج نشان داد که میزان پراکسید هیدرژن در بخش هوایی بیشتر از ریشه بود. تنش شوری در بخش هوایی سبب افزایش معنی‌دار میزان پراکسید هیدروژن شد. بر هم کنش شوری و سیلیکون نشان داد که در بخش هوایی، حضور سیلیکون در تیمار شاهد موجب کاهش معنی‌دار پراکسید هیدروژن شد (جدول ۲).

جدول مقایسه میانگین نشان داد که تنش شوری در بخش هوایی سبب افزایش میزان قند غیراحیایی، قند احیایی و فنل شد. با افزایش شوری مقدار قند غیراحیایی، قند احیایی و فنل نیز زیاد شد به گونه‌ای که بالاترین میزان این عوامل در سطح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم مشاهده شد. علاوه بر این، شوری سبب کاهش میزان نشاسته در بخش هوایی شد به نحوی که این کاهش معنی‌دار شد. حضور

سیلیکون، سبب افزایش معنی‌دار قند احیایی و فنل و کاهش نشاسته در بخش هوایی شد. برهم‌کنش شوری و سیلیکون در بخش هوایی نشان داد که با حضور سیلیکون میزان قند غیراحیایی بیش‌تر می‌شود، به‌گونه‌ای که در تیمار شاهد تفاوت معنی‌دار شد. علاوه بر این میزان قند احیایی نیز با حضور سیلیکون افزوده شد، به‌نحوی‌که میزان افزایش در تیمارهای ۰ و ۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم معنی‌دار شد. با حضور سیلیکون، میزان نشاسته کم شد، به‌نحوی‌که کاهش در تیمار شاهد و ۱۰۰ میلی‌مولار بخش هوایی معنی‌دار بود (جدول ۲).

جدول ۲- مقایسه میانگین برخی فاکتورهای شیمیایی تحت تأثیر تیمارهای شوری و سیلیکون در گیاه *آرابیدوپسیس تالیانا*

	۰ و ۱/۵ میلی‌مولارسیلیکون	شوری (میلی مولار)			
		۰ (شاهد)	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
پروتئین محلول بخش هوایی (میکروگرم‌در بافت‌تر)	−	۴۶۶/۶ ± ۵۷/۶۴^{c}	۴۷۳/۱ ± ۲۳/۷۷^{c}	۴۷۷/۱ ± ۲۳/۵۸^{c}	۵۸۵/۱ ± ۱۵/۵۸^{b}
	+	۵۶۹/۶ ± ۱۷/۵۱^{b}	۴۹۶/۳ ± ۲۱/۳۴^{bc}	۴۶۶/۱ ± ۲۱/۹۹^{c}	۶۷۸/۲ ± ۲۹/۸۷^{a}
پروتئین محلول ریشه (میکروگرم در بافت تر)	−	۲۳۴/۱ ± ۳۰/۸۲^{c*}	۲۱۷/۴ ± ۴۹/۹۳^{c}	۳۱۷/۱ ± ۱۰/۸۴^{ab}	۳۱۱/۷ ± ۱۱/۳۵^{ab}
	+	۳۱۲/۸ ± ۱۶/۹۰^{ab*}	۳۲۷/۱ ± ۲۵/۳۴^{ab}	۳۱۷/۳ ± ۱۱/۱۱^{ab}	۳۹۱/۴ ± ۳۸/۷۵^{a}
پراکسیدهیدروژن‌بخش‌هوایی (نانومول‌درگرم‌بافت تر)	−	۲۰۲/۱ ± ۴/۲۰^{b}	۲۴۷/۵ ± ۱۸/۵۰^{a}	۲۴۶/۱۲ ± ۹/۹۵^{a}	−$^{\bullet}$
	+	۱۶۶/۸ ± ۶/۶۶^{c}	۲۴۲/۱ ± ۱۵/۱۴^{ab}	۲۲۹/۶ ± ۱۶/۷۳^{ab}	−
میلی‌گرم قند احیایی در بافت تر بخش هوایی	−	۲/۵۲ ± ۰/۲۳^{c*}	۲/۵۵ ± ۰/۱۲^{c}	۳/۰۲ ± ۰/۳۵^{bc}	−
	+	۳/۱۷ ± ۰/۱۵^{ab*}	۳/۷۵ ± ۰/۲۱^{a}	۳/۶۶ ± ۰/۰۸^{ab}	−
میلی‌گرم قند غیراحیایی در بافت تر بخش‌هوایی	−	۰/۲۶ ± ۰/۰۴^{d}	۰/۸۱ ± ۰/۰۳^{b}	۰/۹۸ ± ۰/۰۶^{a}	−
	+	۰/۵۴ ± ۰/۰۴^{c}	۰/۹۳ ± ۰/۰۵^{ab}	۱/۰۷ ± ۰/۰۶^{a}	−
میلی‌گرم نشاسته در بافت تر بخش هوایی	−	۱/۲۰ ± ۰/۱۱^{a}	۰/۷۱ ± ۰/۰۴^{bc}	۰/۷۲ ± ۰/۰۳^{bc*}	−
	+	۰/۸۶ ± ۰/۰۴^{b}	۰/۷۹ ± ۰/۰۸^{b}	۰/۵۵ ± ۰/۰۷^{d*}	−
میلی‌گرم فنل در گرم بافت تر بخش هوایی	−	۰/۲۱ ± ۰/۰۶^{b}	۰/۳۸ ± ۰/۱۱^{ab}	۰/۵۱ ± ۰/۰۹^{a}	−
	+	۰/۱۹ ± ۰/۰۷^{b}	۰/۲۵ ± ۰/۰۱^{b}	۰/۳۲ ± ۰/۰۵^{ab}	−

− و + بترتیب نشان دهنده عدم وجود یا وجود سیلیکون ۱/۵ میلی‌مولار در تیمارهاست. میانگین‌ها در هر ستون که حداقل در یک حرف با یکدیگر با هم مشترک هستند با آزمون دانکن در سطح ۵ درصد معنی‌دار (* در سطح ۱۰ درصد) نیستند. $^{\bullet}$ در تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار بدلیل کاهش شدید وزن توده گیاه اندازه‌گیری صفات مشخص شده میسر نشد.

بحث

نتایج حاصل نشان داد که شوری موجب کاهش رشد گیاهان شد (شکل ۱، جدول ۱). کاهش رشد گیاه تحت شوری را می‌توان بدلیل کاهش جذب آب ناشی از کاهش پتانسیل اسمزی خاک و سمیت ناشی از املاح سدیم و کلر (۳۳، ۳۵) و مداخله با جذب عناصر معدنی خصوصاً پتاسیم دانست که گیاه را دچار تنش می‌کند. وقتی که پتانسیل آب سلول با انباشتگی مواد حل شده منفی‌تر شود، رشد سلول نیز کند خواهد شد (۱۴، ۳۳). کاهش پتانسیل اسمزی تحت تنش شوری منجر به کاهش جذب آب و در

نتیجه کاهش فشار تورژسانس می‌گردد، که به نوبه خود منجر به کاهش حجم سلول می‌شود (۳۶). تیمار شوری موجب افزایش یون سدیم و کاهش یون‌های پتاسیم، کلسیم، منیزیم و نسبت پتاسیم به سدیم در بخش هوایی گیاه گردید (شکل ۲). این نتایج نشان می‌دهد که احتمالاً بخشی از کاهش رشد گیاهان آرابیدوپسیس تحت شوری بدلیل سمیت یون سدیم و عدم توازن یونی بوده است. ملک‌جانی و همکاران (۷) و هاشمی و همکاران (۱۹) نیز بطور مشابه گزارش کرده‌اند که شوری سبب افزایش غلظت یون‌های سدیم و کلر، کاهش غلظت پتاسیم و کاهش رشد گیاه کلزا می‌گردد. طبق بررسی‌های وانگ و هان (۳۸) بر روی دو رقم از گیاه یونجه شامل Zhongmu (مقاوم به شوری زیاد) و Defer (مقاوم در شوری کم) نشان داده شد که شوری سبب افزایش غلظت یون سدیم، کاهش میزان پتاسیم، منیزیم و کلسیم و در نتیجه کاهش وزن خشک گیاه گردید. کلسیم بعنوان یک عنصر ضروری در ساختار سلول‌ها و بعنوان انتقال‌دهنده شیمیایی، مسیرهای بیوشیمیایی را جهت می‌دهد. کاهش جذب این عنصر از اثرات بسیار مضر شوری تلقی می‌شود. در غلظت زیاد نمک، سدیم در غشای پلاسمایی تارهای کشنده می‌تواند جایگزین کلسیم شود و تغییراتی در نفوذپذیری غشای پلاسمایی ایجاد شود. در نتیجه این تغییرات پتاسیم به محلول اطراف نشت می‌کند و باعث ناپایداری غشا می‌شود (۱۲). از طرف دیگر، کاهش میزان آب نسبی گیاهان تحت شوری حاکی از اثرات اسمزی شوری است که این امر نیز محتملاً در کاهش رشد گیاه تأثیر داشته است. در این راستا شوری باعث افزایش قندهای غیراحیایی و همچنین کاهش نشاسته شد (جدول ۲) که احتمالاً تنظیم اسمزی گیاه برای حفظ جذب آب توسط گیاه در شرایط شور را نشان می‌دهد.

تنش شوری تولید اکسیژن فعال مولکولی و رادیکال‌های آزاد (ROS) را تشدید می‌کند که سبب آسیب به ترکیبات سلولی و لیپیدهای غشایی می‌شود (۹). افزایش میزان آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان معمولاً بعنوان یک پاسخ دفاعی جهت خنثی کردن این ترکیبات محسوب می‌شود. تنش شوری سبب افزایش سطح فعالیت آنزیم‌های پالاینده اکسیژن فعال شامل کاتالاز، گایاکول پراکسیداز دیواره‌ای و گایاکول پراکسیداز محلول در بخش هوایی و ریشه شد (شکل ۳ الف، ب، پ، ت، ث و ج). آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو کاتالاز و پراکسیداز در گیاه آفتابگردان در مواجهه با تنش شوری فعالیت بیشتری را نشان می‌دهند (۳۲). آنزیم پراکسیداز دیواره‌ای بخش هوایی در گیاه کلزا، در برخورد با شوری فعالیت بیشتری نشان می‌دهد (۱۹). افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز تحت تنش شوری در گیاهان نشان‌دهنده ارتباط سطح این آنزیم و تحمل شوری است (۲۹). فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز بعنوان مکانیسم تحمل به تنش سرما در جوانه‌های هلو (۳۵) و تنش شوری در *Cassia angustifolia* (۸) مطالعه شد. در بررسی ما نیز شوری، فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز ریشه و بخش هوایی را افزایش داد (شکل ۳ چ و ح). راه دیگر مقابله با تنش اکسیداتیو ناشی از شوری، تجمع مواد آنتی‌اکسیدان است که یکی از این مواد فنل‌ها هستند. فنل‌ها سلول را از آسیب اکسیداتیو حفظ می‌کند و باعث افزایش پایداری غشای سلول می‌شود (۱۱). از طرف دیگر هاشمی و همکاران (۱۹) افزایش میزان فنل‌ها در گیاه کلزا با افزایش شوری را گزارش کردند. در مطالعه حاضر، شوری سبب افزایش میزان فنل در بخش هوایی گیاه آرابیدوپسیس شد (جدول ۲). نتایج نشان داد که افزایش شوری در محیط کشت منجر به ازدیاد میزان پراکسیدهیدروژن در بخش هوایی گیاه آرابیدوپسیس شد (جدول ۲). این امر نشان می‌دهد که افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و نیز پالایش غیرآنزیمی با فنل‌ها، برای غلبه بر اثرات نامطلوب تنش کافی نبود و این اثرات نامطلوب با افزایش میزان پراکسیدهیدروژن بعنوان شاخص گونه‌های خطرناک اکسیژن فعال و عامل مرگ سلولی در گیاهان نشان داده شد. در این بررسی شوری منجر به افزایش مقدار

پروتئین‌های محلول ریشه (۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم) و بخش هوایی (۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم) شد (جدول ۲). ال-باز و همکاران (۱۵) افزایش برخی از پروتئین‌های محلول در دو رقم خیار (Dott و Alphabet) تحت تنش شوری را نشان دادند. همچنین دمیرال و ترکان (۱۴) نشان دادند که مقدار پروتئین محلول کل، تحمل به شوری را در برنج نشان می‌دهد. این نتایج نشان داد که شوری با افزایش یون سدیم و کاهش عناصر ضروری پتاسیم، کلسیم و منیزیم سبب ایجاد سمیت و عدم توزان یونی در گیاه آرابیدوپسیس شد که تنش اکسیداتیو را در گیاه افزایش داد و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و آنتی‌اکسیدان غیرآنزیمی فنل نتوانست آن را خنثی کند که در میزان بالای پر اکسید هیدروژن منعکس است، از این رو منجر به کاهش رشد گیاه گردید. از طرف دیگر افزایش قندهای محلول و کاهش نشاسته تلاش گیاه برای تنظیم اسمزی را نشان می‌دهد که با توجه به کاهش مقدار آب نسبی این تنظیم ناکافی بود و این امر نیز ممکن است کاهش رشد گیاه را باعث شده باشد.

کاربرد سیلیکون تا حدودی زرد شدگی رنگ برگ‌های آرابیدوپسیس را کاهش داد (شکل ۱) و سبب افزایش وزن تر ریشه، بخش هوایی و کل، وزن خشک بخش هوایی و درصد آب نسبی گیاه گردید (جدول ۱). این نتایج نشان داد که کاربرد سیلیکون توانست تا حدودی اثرات زیانبار شوری در رشد گیاه را تخفیف دهد. در تحقیقات مشابه نقش مفید سیلیکون در رشد گیاهان تحت شوری تأیید شده است. سیلیکون باعث افزایش وزن خشک کلزا و پوکسینلیا دیستنس (Puccinellia distans) در تنش شوری شد (۱، ۱۷). اثرات تخفیفی سیلیکون بر تنش شوری در گیاهان مختلفی مانند برنج (۳۹۷)، یونجه (۴)، علف بره نئی (۵) و جو (۲۵) گزارش شده است. برخلاف اکثر گزارشات ارائه شده مبنی بر نقش مثبت سیلیکون در کاهش غلظت سدیم، این امر در گیاه آرابیدوپسیس مشاهده نشد، ولی در عوض سیلیکون در غلظت‌های کم شوری، سبب افزایش میزان یون پتاسیم و منیزیم شد (شکل ۲). بررسی‌های وانگ و هان (۳۸) بر روی دو رقم از گیاه یونجه شامل Zhongmu و Defer نشان داد که سیلیکون می‌تواند با تغییر توزیع یون سدیم و تعدادی از یون‌های غذایی در ریشه، ساقه و برگ‌های گیاهان موجب بهبود مقاومت گیاه در شرایط شوری شود. تیمار سیلیکون موجب کاهش معنی‌دار تجمع سدیم در بخش ریشه این دو گیاه و افزایش میزان پتاسیم در بخش ریشه رقم Defor و ساقه و برگ رقم Zhongmu گردید. استفاده از سیلیکون در گیاه گندم، و یونجه سبب افزایش میزان پتاسیم در گیاهان تحت تیمار شوری شد که بهبود رشد را باعث گردید (۳۷، ۳۸). همچنین، در تغذیه سیلیکون در گیاهان برنج تحت شوری افزایش جذب پتاسیم و کاهش جذب سدیم را باعث شد (۱۶) در گیاهان جو تحت شوری نیز کاربرد سیلیکون با کاهش یون‌های رشدگیاه را بهبود بخشید (۲۴). از طرف دیگر کاربرد سیلیکون تحت شوری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان از جمله کاتالاز، گایاکول پراکسیداز دیواره‌ای و محلول و پلی‌فنل‌اکسیداز را افزایش داد که به نظر می‌رسد نقش مهمی در تخفیف بیشتر تنش اکسیداتیو ناشی از شوری داشته است (شکل ۳). گزارشات دیگر هم حاکی از این مطلب است که تیمار سیلیکون در گیاهان تحت شوری مسیرهای متابولیکی پالاینده رادیکال‌های آزاد اکسیژن را فعال می‌کنند. افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در کلزا، یونجه و علف بره نئی تحت شوری گزارش شده است (۴، ۵). بعلاوه افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و کاهش پراکسیداسیون لیپید در گیاهان جو تحت شوری با کاربرد سیلیکون گزارش شده است (۲۴). از طرف دیگر گزارش شده است که کاربرد سیلیکون سبب افزایش بیوسنتز سیتوکینین در گیاه آرابیدوپسیس تالیانا می‌شود که ممکن است در کاهش تنش در نقش داشته باشد (۲۷). افزایش پروتئین‌های محلول و قندهای احیایی و همچنین کاهش نشاسته تحت تأثیر تیمار سیلیکون نسبت به فقدان آن تحت شوری حاکی از کاهش میزان آب نسبی

ناشی از تنش شوری است (جدول ۲). افزایش پروتئین‌های محلول و رنگیزه‌های برگ در گیاه علف بره‌ئی تحت شوری با کاربرد سیلیکون گزارش شده است (۵).

این نتایج آشکار ساخت که تغذیه سیلیکون با افزایش جذب پتاسیم و منیزیم و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، موجب کاهش تنش اکسیداتیو و با افزایش قندهای احیایی و پروتئین‌های محلول و کاهش نشاسته بهبود وضعیت آب گیاه را سبب شد که در نتیجه رشد گیاه آرابیدوپسیس تحت شوری افزایش یافت. بنابراین، تغذیه سیلیکون می‌تواند اثرات شوری در گیاه آرابیدوپسیس را تخفیف دهد.

منابع

۱- بندانی، م. و عبدل‌زاده، ا. ۱۳۸۶. اثر تغذیه سیلیکون در تحمل به شوری گیاه پوکسینلیا دیستنس. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۳: ۷-۱۶

۲- سراجی، ز.، عبدل‌زاده ا. و صادقی‌پور، ح. ۱۳۹۶. اثرات کاربرد سیلیکون در بهبود رشد و کاهش تنش اکسیداتیو گیاهان برنج تحت کمبود روی. مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست شناسی ایران)، انتشار آنلاین

۳- شمس، ه.، و باقریه‌نجار، م. ۱۳۹۳. مشکلات روش‌های موجود و ارائه دو روش جدید کشت هیدروپونیک گیاه آرابیدوپسیس تالیانا. مجله علوم و فنون کشت گلخانه‌ای، ۱۷: ۹۸-۸۵

۴- عزیزی، م.، عبدل‌زاده، ا.، صادقی‌پور، ح.ر. و مهربان جوبنی، پ. ۱۳۹۳. بررسی تاثیر سیلیس بر بهبود تحمل به تنش شوری کلرید سدیم در یونجه یک‌ساله *Medicago scutellata* L. پژوهش‌های زراعی ایران. ۱۴ (۱): ۱۳۳-۱۴۳

۵- عزیزی، م.، عبدل‌زاده، ا.، مهربان جوبنی، پ. و صادقی‌پور، ح.ر. ۱۳۹۴. اثر کاربرد سیلیسیم در افزایش مقاومت به شوری با کاهش تنش اکسیداتیو در گیاه علف بره‌ئی *Festuca arundinacea*. نشریهٔ علمی پژوهشی مرتع، ۹ (۱): ۴۳-۵۴

۶-مالمیر، ح. و رودی، س. ۱۳۹۳. اثر سیلیکون روی میزان فیتوکلات، کربوهیدرات غیر ساختمانی و K در دو رقم برنج *Oriza sativa* ایرانی. مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست شناسی ایران)، ۲۷ (۵): ۹۳۷-۹۴۸

۷- ملک‌جانی، ز.، عبدل‌زاده، ا.، گالشی، س. و یغمایی، ف. ۱۳۸۵. بررسی توأم شوری و تغذیه نیتروژن بر رشد گیاه کلزا. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۱۳: ۲۹-۴۴

8- Agarwal, S. and Pandey, V. 2004. Antioxidant enzyme responses to NaCl stress in *Cassia angustifolia*. Biologia Plantarum, 48: 555–560.

9- Ashraf, M. 2009. Biotechnological approach of improving plant salt tolerance using antioxidants as markers. Biotechnology Advances, 27: 84-93.

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- Burguieres, E., Mc CXue, P., Kwon, Y. and Shetty, K. 2007. Effect of vitamin C and folic acid on seed vigour response and phenolic linked antioxidant activity. Bioresource Technology, 98: 1393-1404.

12- Cabot, C., Sibole, J. V., Barcelo, J. and Poschenrieder, C. 2009. Abscisic acid decreases leaf Na^+ exclution in salt-treated *Phaseolus vulgaris* L. Journal of Plant Regulation, 28: 187–192.

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

14- Demiral, T. and Turkan, I. 2006. Exogenous glycinebetaine affects growth and proline accumulation and retards senescence in two rice cultivars under NaCl stress. Environmental and Experimental Botany, 56: 72-79.

15- El-Baz, F. K., Mohamed, A. A. and Aly, A. A. 2003. Development of biochemical markers for salt stress tolerance in cucumber plants. Pakistan Journal of Biological Sciences, 6: 16-22.

16- Farooq, M. A., Saqib, Z. A., Akhtar, J., Bakhat, H. F., Pasala, R. K., Dietz, K. J. 2015. Protective role of silicon (Si) against combined stress of salinity and boron (B) toxicity by improving antioxidant enzymes activity in rice. Silicon, DOI 10.1007/s12633-015-9346-z

17- Fukoda, T., Ito, H. and Yoshida, T. 2003. Antioxidative polyphenols from Walnuts

(*Juglans regia* L.). Phytochemistry, 63: 795-801.

18- Handel, E. V. 1968. Direct microdetermination of sucrose. Analytical Biochemistry, 22: 280-283.

19- Hashemi, A., Abdolzadeh, A. and Sadeghipour, H. R. 2010. Benefical effects of silicon nutrition in alleviation salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L., plants. Soil Science and Plant Nutrition, 56: 244-253.

20- Kar, M. and Mishra, D. 1976. Catalase, Peroxidase and polyphenolxidase activities during rice leaf senescence. Plant Phsiology, 57: 315-319.

21- Lavid, N., Schwartz, A., Yarden, O. and Tel Or, E. 2001. The involvement of polyphenols and peroxidase activities in heavy-metal accumulation by epidermal glands of the water lily (Nymphaeaceae). Planta, 212: 323-331.

22- Li, J., Leisner, S. M., Frantz, J. 2017. Alleviation of copper toxicity in *Arabidopsis thaliana* by silicon addition to hydroponic solutions. Journal of the American Society for Horticultural Science, 133: 670-677

23- Liang, Y. C., Sun, W., Zhu, Y. G. and Christie, P. 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. Environmental Pollution, 147: 422-428.

24- Liang, Y. C., Zhang, W. H., Chen, Q. and Ding, R. X. 2005. Effects of silicon on tonoplast H^+-ATPase and H^+-PPase activity, fatty acid composition and fluidity in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). Environmental and Experimental Botany, 53: 29-37.

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

26- Ma, J. F. and Yamaji, N. 2008. Function and transport of silicon in plant. Cellular and Molecular Life Science, 65: 3049-3057.

27- Markovich, O., Steiner, E., Kouřil, Š., Tarkowski, P., Aharoni, A., Elbaum, R. 2017. Silicon promotes cytokinin biosynthesis and delays senescence in *Arabidopsis* and *Sorghum*. Plant Cell and Environment, 40: 1189–1196

28- Mc Cready, R. M., Guggolz, J., Silviera, V. and Owens, H. S. 1950. Determination of starch and amylase in vegetables. Analytical chemistry, 22: 1156-1158.

29- Mittova, V., Tal, M., Volokita, M. and Guy, M. 2003. Up-regulation of the leaf mitochondrial and peroxisomal antioxidative systems in response to salt-induced oxidative stress in the wild salt-tolerant tomato species *Lycopersicon pennellii*. Plant Cell and Environment, 26: 845-856.

30- Prado, D. E., Gonzalea, J. A., Boero, C. and Sampietro, A. R. 1998. A simple and sensitive method for determining reducing sugars in plant tissues.Application to quantify the sugar contant in Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seedlings. Phytochemical Analysis, 9: 58-63.

31- Resende, M. L. V., Nojosa, G. B. A., Cavalcant, L. S., Aguilar, M. A. G., Silva, L. H. C. P., Perez, J. O., Andrade, G. C. G., Carvalho, G. A. and Castro, R. M. 2002. Induction of resistance in cocoa against *Crinipellis perniciosa* and *Verticillium dahliae* by acibenzolar-S-methyl (ASM). Plant Pathology, 51: 621-628.

32- Rios-Gonzalez, K., Erdei, L. and Herman Lips, S. 2002. The activity of antioxidant enzymes in maize and sunflower seedlings as affected by salinity and different nitrogen sources. Plant Science, 162: 923-930.

33- Sairam, R. K. and Tyagi, A. 2004. Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. Current Science, 86: 407-421.

34- Sergive, 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 l'Academie bulgare des Sciences, 51: 121-124.

35- Szalay, L., Hegedus, A. and Stefanovitis-Banyai, E. 2005. Presumable protective role of peroxidase and polyphenol oxidase enzymes against freezing stress in peach (*Prunus persica* L. Batsch). Acta Biologica Szegediensis, 49(1-2):121-122.

36- Tester, M. and Davenport, R. 2003. Na^+ tolerance Na^+ transport in higher plants. Annals of Botany, 91: 503-527.

37- Tuna, A. L., Kaya, C., Higgs, D. E. B., Murillo-Amador, B., Aydemir, S. and Girgin, A. R. 2008, Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. Environmental and Experimental Botany, 62(1): 10-16.

38- Wang, X. S. and Han, J. G. 2007. Effects of NaCl and silicon on ion distribution in the roots, shoots and leaves of two alfalfa cultivars with different salt tolerance. Soil Science and Plant Nutrition, 53: 278-285.

39- Yeo, A. R., Flowers, S. A., Rao, G., Welfare, K., Senanayake, N. and Flowers, T. J. 1999. Silicon

reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpirational bypass flow. Plant, Cell and Environment, 22: 559-565.

Effects of Silicon Nutrition on the Alleviation of Salinity Induced Oxidative Stress in *Arabidopsis thaliana*

Shams H.[1], Abdolzadeh A.[1], Sadeghipour H.R.[1], MehrabanJoubani P.[2] and Bagherieh Najar M.B.[1]

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

[2] Basic Sciences Dept., Faculty of Animal Science and Fisheries, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, I.R. of Iran

Abstract

In the present study, the effects of silicon nutrition under salinity stress have been investigated on *Arabidopsis thaliana* plants grown on hydroponic culture. The experiments were conducted in a completely randomized design in factorial form. The first factor was salinity including 0, 50, 100 and 150 mM NaCl and the second factor was silicon including 0 and 1.5 mM sodium silicate. The results indicated that salinity increased concentration of Na^+ and decreased relative water content and concentration of Ca^{2+}, K^+ and Mg^{2+} about 27, 49, 66 and 19 percent respectively. Consequently, plants were faced with oxidative stress that caused enhancement of antioxidant enzyme activities as well as phenols. In addition, salinity stress increased soluble sugars and decreased starch content that probably indicated plant acclimation for insufficient osmotic adjustment. Silicon nutrition alleviated the oxidative stress caused by salinity that may associated to the increasing K^+ and Mg^{2+} content and raising antioxidant enzymes activity. Beside, increase of reducing sugars, decrease of starch and enhancement of relative water content following silicon application indicated improvement of plant water status. As a result, silicon fed plants indicated greater growth compared to non silicon fed ones under salinity. The results indicated that silicon could mitigate salinity stress in *Arabidopsis thaliana* plants through minimizing oxidative stress and improvement of water status.

Key words: Silicon, Salinity, *Arabidopsis thaliana*, Hydroponic culture.