

مقایسه اثر سیلیکون معدنی و نانوسیلیکون بر برخی صفات بیوشیمیایی و فتوسنتزی در گیاه ذرت *Zea mays L.* تحت تنش شوری

محبوبه زراوشان^۱، احمد عبدالزاده^{۱*}، حمیدرضا صادقی پور^۱، پویان مهربان جوبنی^۲

^۱گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

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

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۱/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۹/۲/۲۳

چکیده

تنش شوری یکی از عواملی است که رشد و عملکرد ذرت را تهدید می‌کند. اثرات کاربرد سیلیکون معدنی و یا نانوسیلیکون در تخفیف شوری در برخی گیاهان گزارش شده است. به این منظور اثرات تغذیه برگه سیلیکون معدنی و نانو در تخفیف اثرات تنش شوری در رشد و برخی عوامل بیوشیمیایی و فتوسنتزی در گیاه ذرت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. آزمایشات در قالب طرح کاملاً تصادفی و در قالب فاکتوریل به صورت کشت گلخانه‌ای انجام شد. فاکتور اول شوری در دو سطح ۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم و سیلیکون در سطوح شاهد (بدون سیلیکون)، ۲ میلی‌مولار سیلیکات پتاسیم و ۲ میلی‌مولار نانوسیلیکون SiO_2 بود. تحت تنش شوری، میزان وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه، میزان کلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها و میزان پروتئین‌های محلول نسبت به شاهد به صورت معنی‌داری کاهش و در مقابل میزان پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدهید این گیاهان افزایش یافت. همچنین، تنش شوری میزان فتوسنتز و کارایی مصرف آب گیاهان را کاهش داد. کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون رشد گیاهان تحت شوری را بهبود بخشید و موجب افزایش شدت فتوسنتز و میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی در آنها شد. به علاوه، کاهش شدید تعرق با کاربرد سیلیکون نسبت به نانوسیلیکون سبب افزایش بیشتر راندمان مصرف آب در این تیمار شد. همچنین کاربرد سیلیکون فعالیت آنزیم پراکسیداز محلول را در گیاهان تحت شوری افزایش داد که با کاربرد نانوسیلیکون مشاهده نشد. این امر کاهش بیشتر پراکسید هیدروژن و پراکسیداسیون لیپید گیاهان تحت شوری با تیمار سیلیکون نسبت به نانوسیلیکون را به دنبال داشت که کاهش بیشتر تنش اکسیداتیو در این تیمار را به نمایش گذاشت این نتایج نشان داد که تخفیف تنش و افزایش رشد گیاهان تحت شوری با کاربرد سیلیکون نسبت به نانوسیلیکون بیشتر بود که احتمالاً به کاهش بیشتر تنش اکسیداتیو در این تیمار مربوط است.

واژه‌های کلیدی: تنش کلرید سدیم، سیلیکون، فتوسنتز، تنش اکسیداتیو

مقدمه

دام نقش اساسی دارد (Hussain et al., 2010). تنش‌های مختلف محیطی بر میزان رشد و محصول دهی ذرت تاثیرگذار است. شوری، یکی از شایع‌ترین تنش‌هایی است که تولید محصولات زراعی را در زمین‌های خشک و نیمه خشک تهدید می‌کند. تنش شوری در ابتدا، با کاهش جذب آب ناشی از

ذرت با نام علمی *Zea mays L.* یکی از غلات گرمسیری از خانواده گندمیان و پرمحصول‌ترین غله دنیا به شمار می‌آید. امروزه، این گیاه در تغذیه انسان

*نویسنده مسئول: a.abdolzadeh@gu.ac.ir

افزایش تعرق می‌شود، ولی با ورود بیشتر دی اکسید کربن سرعت فتوسنتز بالا می‌رود. گزارشات متعددی از اثرات تنش شوری در گیاه ذرت نشان داد که شوری موجب کاهش شاخص رشد ریشه و اندام هوایی، ارتفاع گیاه، میزان رنگیزه‌های کلروفیل (Nematpour et al., 2015; Hasanpour et al., 2015) و کاروتنوئیدها، پروتئین و پتاسیم شد (Zare et al., 2015). همچنین میزان پرولین، پراکسید هیدروژن و مالون دی آلدهید (Moussa, 2006)، آنتوسیانین، قندهای محلول و فعالیت آنزیم کاتالاز (Zare et al., 2015; Poorakbar and Maghsoumi, 2015) در گیاه ذرت تحت شوری افزایش یافت.

سیلیکون دومین عنصر فراوان در پوسته زمین و از عناصر غیرضروری در چرخه زندگی اکثر گیاهان عالی است، با این وجود در رشد و نمو بهینه برخی از گونه‌ها مانند گیاهان تیره گندم از جمله ذرت نقش مهمی دارد. در این گیاهان، سیلیکون در ساختار دیواره سلولی در ساقه و برگ‌ها وارد می‌شود و موجب استحکام فیزیکی آنها می‌گردد. کاربرد سیلیکون سبب جذب بهتر فسفات در جو (Guntzer et al., 2012)، بهبود فعالیت پمپ هیدروژنی و جذب بهتر پتاسیم در لوبیا چشم بلبلی (Guntzer et al., 2012) و تاخیر در پیری با تحریک تولید سیتوکینین در گیاه سورگوم (Markovich, 2017) شد. استفاده از کودهای نانو سیلیکون (nano-SiO_2) نیز به علت انتشار کنترل شده و آرام آن مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در ذرت تیمار با نانوذرات سیلیکون جوانه‌زنی دانه را بهبود بخشید و موجب تولید بیشتر پروتئین، میزان کلروفیل و ترکیبات فنلی شد (Karunakaran et al., 2013). همچنین در ذرت، کاربرد نانو سیلیکون به صورت پودر و مخلوط با خاک گلدان باعث افزایش درصد جوانه‌زنی، ضریب بهره‌وری آب و میزان کلروفیل شد (Yuvakkumar et al., 2011). گزارشات

منفی‌تر شدن پتانسیل اسمزی خاک موجب کاهش رشد می‌گردد، ولی پس از آن سمیت عناصر سدیم و کلر غالب می‌گردد (Gupta and Haung, 2014). لذا تنش شوری موجب تغییرات فیزیولوژیک متنوعی مانند کاهش رشد، کاهش فتوسنتز و کاهش هدایت روزنه‌ای، اختلال در عملکرد غشاها، افزایش رادیکال‌های آزاد، کاهش فعالیت آنزیم‌ها و تقسیم سلولی می‌گردد (Munns and Tester, 2008). میزان بحرانی نمک در گیاهان مختلف متنوع است، پس از مقدار بحرانی، علائم شوری، هم در مورفولوژی و هم در صفات بیوشیمیایی گیاه قابل مشاهده و سنجش است. یکی از اثرات شوری کاهش رشد است. رشد گیاهان تحت تنش شوری نتیجه کاهش شدت فتوسنتز و تثبیت کربن است. علت کاهش فتوسنتز، کمتر شدن هدایت روزنه‌ای، کاهش فرآیندهای متابولیکی به ویژه جذب کربن، کاهش ظرفیت فتوسنتزی و یا تلفیقی از این موارد می‌باشند. البته کاهش هدایت روزنه‌ای نیز به نوبه خود ممکن است در اثر بسته شدن روزنه‌ها از طریق کاهش پتانسیل اسمزی القا شده بر اثر شوری باشد. البته این هماهنگی نشانه‌ای از نقش روزنه در تنظیم شدت فتوسنتز است. بسته‌ماندن روزنه در زمان طولانی موجب بالارفتن دمای برگ می‌شود (Ritchie et al., 1990) که این امر به نوبه خود باعث تخریب کلروپلاست‌ها و به دنبال آن پایین آمدن سرعت فتوسنتز در گیاه می‌گردد (Teare et al., 1973). اگر عاملی موجب افزایش هدایت روزنه‌ای در گیاه تحت تنش گردد، می‌تواند تا اندازه زیادی در کاهش اثرات تنش موثر باشد. بررسی قابلیت فتوسنتز در رقم‌های متفاوت گندم و جو تحت تنش خشکی نشان داد که رقم‌هایی که تحت تنش رطوبتی، روزنه خود را باز نگه داشته بودند، مقاوم‌ترند (Shiferaw and Baker, 1996). هرچند باز بودن روزنه در هنگام تنش موجب کاهش کارایی مصرف آب از طریق

فیزیولوژیک از جمله پارامترهای فتوسنتزی گیاه ذرت انجام شده است.

مواد و روش‌ها

شرایط رشد گیاه و تیمارها: بذره‌های ذرت (*Zea mays* L. رقم سینگل کراوس ۷۰۴ از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران تهیه شد. کاشت گیاهان در اواخر خرداد ماه انجام شد. بذرها پس از یک روز آبتوشی درون پارچه مرطوب، در حیاط دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری، درون گلدان‌هایی از جنس پلاستیک با دهانه ۱۴ سانتی‌متر کاشته شدند. گلدان‌ها با خاک زراعی دارای زهکش مناسب پر شد (جدول ۱). گلدان‌ها تحت تابش نور خورشید با میانگین حداکثر دمای روزانه ۳۹ درجه و دمای حداقل شب ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی در حدود ۴۰ درصد قرار داشتند. در هر گلدان ابتدا پنج عدد بذر کاشته شد و پس از سبز شدن، به تعداد دو گیاهچه در هر گلدان تنک شد. آزمایشات به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با ۵ تکرار اجرا شد. تیمارهای شوری شامل شاهد و ۱۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم و تیمارهای سیلیکون شامل شاهد (فاقد سیلیکون)، ۲ میلی‌مولار سیلیکات پتاسیم و ۲ میلی‌مولار دی‌اکسید سیلیسیوم (SiO_2) به شکل نانو سیلیکون (جدول ۲) بود. تیمارهای شوری با آبیاری هر روزه با آب شور انجام شد. تیمارهای شوری دوهفته پس از رشد گیاه به صورت تدریجی و در طی دو روز انجام شد تا از شوک اسمزی جلوگیری شود. برای جلوگیری از تجمع نمک، بعد از هر دو روز آبیاری با آب شور، گلدان‌ها با آب معمولی آبیاری شسته شد، به اندازه‌ای که آب از زیر گلدان خارج شود و سپس مجدداً با آب شور آبیاری می‌شدند. محلول ۲ میلی‌مولار سیلیکون و نانو سیلیکون (اولتراسوند شده به مدت ۵ دقیقه)، با

اندکی از اثرات مفید کاربرد سیلیکون و نانو سیلیکون در تخفیف تنش شوری در ذرت وجود دارد. سیلیکون و نانو سیلیکون، در گیاهچه‌های ذرت تحت تنش شوری موجب کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و افزایش رشد شد (Zare et al., 2015). همچنین سیلیکون موجب افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاتالاز و سوپراکسیددیسموتاز شد و به این شکل میزان پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدئید کاهش و رشد گیاه ذرت تحت تنش شوری بهبود یافت (Moussa, 2006; Parveen and Ashraf, 2010). در گیاه ذرت کشت شده در خاک‌های شور-قلیایی، تیمار سیلیکون به شکل معدنی موجب بهبود وضعیت فتوسنتز شد (Xie et al., 2015). اثرات مثبت سیلیکون در کاهش تنش‌های محیطی دیگر نیز در ذرت گزارش شده است. برای مثال، تیمار سیلیکون در ذرت تحت تنش خشکی، موجب کاهش میزان تعرق و هدایت روزنه‌ای شد و به این شکل از هدررفت آب جلوگیری نمود (Gao et al., 2006). در برنج و ذرت تحت تنش روی و کادمیوم، سیلیکون موجب بهبود فتوسنتز و تبادلات گازی شد (Malčovská et al., 2014; Song et al., 2014; Vaculík et al., 2015).

کاربرد مثبت نانو سیلیکون در گیاهان تحت تنش شوری نیز گزارش شده است با وجود مطالعات متعدد در مورد اثرات سیلیکون در گیاهان از جمله گیاه ذرت تحت تنش شوری، گزارشات اندکی از اثرات نانو سیلیکون در این گیاه وجود دارد. به‌ویژه، تاکنون اثرات سیلیکون و نانو سیلیکون بر صفات فیزیولوژیک مختلف از جمله پارامترهای فتوسنتزی در گیاه ذرت تحت تنش شوری مقایسه نشده است. این مطالعه با هدف بررسی و مقایسه اثرات کاربرد سیلیکون و نانو سیلیکون بر تخفیف تنش شوری بر برخی صفات

هوایی، وزن تر هر یک جداگانه اندازه‌گیری شد. وزن خشک نیز پس از ۴۸ ساعت قرارگیری در دمای ۷۵ درجه در اون اندازه‌گیری شد. نمونه‌های تر اولین برگ گسترش‌یافته در فریزر ۷۰- نگهداری شد و برای سنجش میزان رنگدانه‌ها، پروتئین محلول، پراکسیداسیون لیپید و پراکسید هیدروژن و نیز سنجش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان استفاده گردید.

افزودن توئین ۲۰ (۵/۰ درصد حجمی/حجمی) به‌عنوان مویان (Qados and Mofteh, 2015) و اسیدیت ۶/۲ تهیه شد و تیمارهای آن به‌صورت برگ‌پاشی، یک روز قبل از اعمال تنش شوری و به دنبال آن هر سه روز یک بار انجام شد. اندازه‌گیری صفات مرتبط با فتوسنتز ۱۳ روز پس از اعمال تیمارها انجام شد و روز بعد گیاهان برداشت شدند. پس از جدا نمودن دو بخش ریشه و بخش

جدول ۱: برخی مشخصات فیزیکی شیمیایی خاک مورد استفاده برای کشت گیاه ذرت

ازت (درصد)	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	ظرفیت تبادل کاتیونی (میلی اکی والان بر ۱۰۰ گرم)	درصد کربن آلی (درصد)	هدایت الکتریکی	اسیدیت
۰/۱۳	۱۴/۰۰	۴۵/۰۰	۴۱/۰۰	۲۳/۲۱	۱/۲۹	۰/۹۹	۷/۵۱
مس (میلی گرم بر کیلوگرم)	روی (میلی گرم بر کیلوگرم)	منگنز (میلی گرم بر کیلوگرم)	آهن (میلی گرم بر کیلوگرم)	پتاسیم قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم)	فسفر قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم)		
۳/۸۹	۰/۸۳	۴۱/۸۳	۵۶/۳۸	۱۸۲/۳۰	۱۱/۶۴		

جدول ۲: مشخصات نانوسیلیکون استفاده شده در این پژوهش

مورفولوژی	رنگ	متوسط اندازه ذرات (نانومتر)	مساحت سطح ویژه (متر مربع بر گرم)	درصد خلوص	چگالی (گرم بر سانتی متر مربع)
آمورف	سفید	۲۰-۳۰	۱۸۰-۶۰۰	۹۹/۹۸	۰/۱۰

اندازه‌گیری رنگدانه‌های فتوسنتزی: به‌منظور استخراج کلروفیل و کاروتنوئیدها از روش (Lichtenthaler, 1987) استفاده شد. به این منظور مقدار ۰/۰۵ گرم برگ با ۲ میلی‌لیتر استون ۸۰٪ (۷/۷) هموژن و سپس به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۱۰۰۰g سانتریفوژ و در نهایت محلول فوقانی به حجم ۴ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس جذب محلول در طول موج‌های ۶۶۳/۲ و ۶۴۶/۸ و ۴۷۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر BAUSH and LOMB مدل Milton Roy Company ثبت و مقادیر رنگی‌ها بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر محاسبه شد. اندازه‌گیری پراکسید هیدروژن: سنجش پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدهید طبق روش

(Sergive et al., 1997) انجام شد. برای این منظور ۰/۰۵ گرم از بافت تر با ۲ میلی‌لیتر محلول تری کلرواستیک اسید ۰/۱ درصد ساییده و سپس عصاره حاصل به مدت ۲۰ دقیقه در ۱۳۰۰۰ دور سانتریفوژ شد. برای سنجش پراکسید هیدروژن، ۵۰۰ میکرولیتر از محلول فوقانی با ۵۰۰ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰ میلی‌مولار مخلوط شده و سپس ۱ میلی‌لیتر مخلوط پدید پتاسیم ۱ مولار حل شده در بافر فسفات ۱۰ میلی‌مولار به آن اضافه گردید. بعد از گذشت یک ساعت شدت رنگ در طول موج ۳۹۰ نانومتر خوانده شد و در مقایسه با استاندارد، میزان پراکسید هیدروژن به دست آمد.

پارامترهای فتوسنتزی: میزان فتوستتوز و تبادلات گازی با استفاده از دستگاه پرتابل فتوستتوز متر GFS3000 (WALZ آلمان) انجام گرفت. خوانش پارامترها در روز آفتابی و ساعت ۱۱ صبح انجام شد. به این شکل که برگ زنده درون محفظه دستگاه قرار گرفت و پس از گذشت چند دقیقه برای رسیدن به تعادل، پارامترهای مربوطه ثبت شد. شدت فتوستتوز، میزان تعرق و هدایت روزنه‌ای به شکل مستقیم و میزان کارایی مصرف آب از تقسیم شدت فتوستتوز بر میزان تعرق به دست آمد.

به منظور آنالیز و تجزیه و تحلیل داده‌ها و رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel و SAS استفاده شد. برای بررسی معنی‌دار بودن اختلاف میانگین داده‌ها نیز از تست LSD استفاده شد.

نتایج

تغییرات رشد: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر شوری در تمامی صفات رشد اندازه‌گیری شده به جز درصد آب نسبی کل گیاه معنی‌دار بود، در حالی که اثر سیلیکون تنها در وزن خشک ریشه و درصد آب نسبی برگ و اثر نانوسیلیکون تنها در وزن تر و خشک ریشه و درصد آب نسبی برگ معنی‌دار بود. برهم‌کنش شوری و سیلیکون در درصد آب نسبی برگ و ریشه اثر معنی‌دار داشت، ولی برهم‌کنش شوری و نانوسیلیکون در هیچ یک از صفات رشد اثر معنی‌دار نداشت (جدول ۳). در گیاهان فاقد تنش شوری، سیلیکون و نانوسیلیکون، تغییر معنی‌داری در وزن تر کل بوجود نیاوردند، ولی سیلیکون موجب افزایش وزن خشک ریشه و نانوسیلیکون موجب افزایش وزن تر و خشک ریشه شد. در شرایط بدون تنش شوری، درصد آب نسبی بخش هوایی تحت اثر سیلیکون و بخصوص نانوسیلیکون افزایش یافت، ولی در ریشه این صفت تحت اثر سیلیکون نسبت به شاهد کاهش

اندازه‌گیری مالون دی‌آلدهید: برای سنجش مالون دی‌آلدهید، ۲۵۰ میکرولیتر از محلول رویی با ۱/۷۵۰ میلی‌لیتر معرف تیوباربتوریک ۰/۵ درصد تهیه شده در تری کلرو استیک اسید ۲۰٪ مخلوط شد. مخلوط حاصل به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب گرم قرار گرفت و سپس بلافاصله به مدت ۱۵ دقیقه در یخ قرار داده شد تا واکنش متوقف شود. بعد از سرد شدن، لوله‌ها ورتکس و جذب آن در ۴۴۰، ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر خوانده شد. ضریب خاموشی برای اندازه‌گیری مالون دی‌آلدهید معادل $155 \text{ mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$ در نظر گرفته شد. در نهایت مقدار آن برحسب نانومول بر گرم وزن تر محاسبه گردید (Sergive et al., 1997).

اندازه‌گیری پروتئین محلول و فعالیت پراکسیداز: برای سنجش مقدار پروتئین و فعالیت آنزیم پراکسیداز محلول ۰/۱ گرم از بافت تر برگ، با استفاده از بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار با اسیدیته ۶/۸، ساییده (Liu and Huang, 2000) و سپس در ۱۲۰۰۰ دور به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. از محلول رویی برای سنجش مقدار پروتئین و فعالیت آنزیم استفاده شد. اندازه‌گیری پروتئین محلول به روش برادفورد صورت گرفت. به این صورت که ۱۰۰ میکرولیتر از محلول فوقانی با ۵ میلی‌لیتر معرف برادفورد مخلوط شد و پس از ۲۰ دقیقه میزان جذب نور آن در ۵۹۵ نانومتر ثبت گردید. مقدار پروتئین محلول با استفاده از نمودار استاندارد آلبومین محاسبه شد (Bradford, 1976).

فعالیت آنزیم پراکسیداز محلول با استفاده از روش (Kar and Mishra, 1976) صورت گرفت. مخلوط واکنش شامل بافر فسفات ۲۵ میلی‌مولار، گایاکول ۲۰ میلی‌مولار، آب اکسیژنه ۴۰ میلی‌مولار و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. مقدار فعالیت آنزیم پراکسیداز محلول بر اساس تغییرات جذب تبدیل گایاکول به تتراگایاکول در ۴۷۰ نانومتر با ضریب خاموشی $26/6 \text{ mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$ در دقیقه اندازه‌گیری شد.

نانوسیلیکون در گیاهان تحت تنش شوری، وزن خشک کل گیاهان را به ترتیب به میزان ۸۶ درصد و ۴۷ درصد افزایش داد. شوری درصد آب نسبی گیاهان را به صورت معنی داری کم کرد، کاربرد نانوسیلیکون در گیاهان تحت شوری این درصد را به صورت معنی داری افزایش داد (جدول ۴ و ۸) (شکل ۱).

یافت (جدول ۴). تنش شوری سبب کاهش وزن تر و خشک ریشه، بخش هوایی و وزن کل در گیاهان فاقد تیمار سیلیکون و نانوسیلیکون شد، به طوری که وزن تر و خشک کل گیاهان تحت شوری نسبت به گیاهان شاهد به ترتیب ۶۲ درصد و ۷۲ درصد کاهش یافت (جدول ۴ و ۸). اعمال سیلیکون و نانوسیلیکون در گیاهان تحت تنش شوری رشد گیاهان را بهبود بخشید. به این شکل که کاربرد سیلیکون و

جدول ۳: نتایج تجزیه واریانس برخی از صفات رشد در واکنش به تیمارهای شوری در گیاه ذرت رشد یافته در حضور و فقدان سیلیکون و نانوسیلیکون.

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن تر			وزن خشک			درصد آب نسبی		
		برگ	ریشه	کل	برگ	ریشه	کل	برگ	ریشه	کل
شوری	۱	۲۰۸/۷۹**	۶۷/۸۷**	۵۱۴/۷۶**	۷/۲۷**	۲/۸۸*	۱۹/۲۲**	۹۹/۹۶**	۲۵/۱۹*	۰/۰۴ ^{ns}
سیلیکون	۱	۰/۱۱ ^{ns}	۵/۲۹ ^{ns}	۳/۹۰ ^{ns}	۰/۸۸ ^{ns}	۰/۵۸*	۰/۰۳ ^{ns}	۴۸/۸۵*	۱۴/۷۱ ^{ns}	۱۲/۷۸*
نانوسیلیکون	۱	۰/۵۵ ^{ns}	۳۵/۴۵**	۲۷/۱۷ ^{ns}	۰/۷۱ ^{ns}	۱/۲۵**	۰/۰۸ ^{ns}	۴۵/۸۶**	۳/۴۲ ^{ns}	۲۶/۱۲**
شوری×سیلیکون	۱	۷/۳۵ ^{ns}	۷/۶۱ ^{ns}	۲۹/۹۵ ^{ns}	۲/۶۰*	۰/۰۸ ^{ns}	۱/۷۸ ^{ns}	۳۵/۰۲**	۴۳/۶۶**	۰/۰۰ ^{ns}
شوری×نانوسیلیکون	۱	۱/۸۱	۱/۶۰	۰/۰۱	۰/۴۷	۰/۴۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۲۳/۲۶	۴/۱۰

^{ns}, **, * به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول ۴: مقایسه میانگین برخی از صفات رشد در واکنش به تیمارهای شوری در گیاه ذرت رشد یافته در حضور و فقدان سیلیکون و نانوسیلیکون

تیمارها	وزن تر (گرم)			وزن خشک (گرم)			درصد آب نسبی		
	بخش هوایی	ریشه	کل	بخش هوایی	ریشه	کل	بخش هوایی	ریشه	وزن کل
شوری صفر									
شاهد	۱۴/۴۹ a	۹/۶۱b	۲۴/۱۰a	۴/۴۵ a	۱/۰۴b	۵/۵۰a	۷۲/۲۶c	۸۸/۸۸a	۷۸/۹۸bc
سیلیکون	۱۳/۳۳a	۹/۹۱b	۲۳/۲۴a	۲/۸۱b	۱/۶۷a	۴/۴۹a	۷۸/۹۶a	۸۳/۴۵b	۸۰/۸۵ac
نانوسیلیکون	۱۳/۷۸ a	۱۴/۰۵a	۲۷/۸۳a	۳/۳۲ab	۲/۱۰a	۵/۴۲a	۷۵/۹۳b	۸۵/۲۸ ab	۸۰/۶۵ac
شوری ۱۰۰ میلی مولار									
شاهد	۴/۵۰c	۴/۵۸c	۹/۰۸c	۰/۰۹۷ d	۰/۵۸c	۱/۵۵c	۶۹/۷۶ c	۸۵/۶۵ ab	۷۷/۷۸b
سیلیکون	۶/۲۶b	۷/۸۵b	۱۴/۱۱b	۱/۰۹۳ c	۰/۹۴b	۲/۸۷b	۷۰/۳۱c	۸۷/۰۹ ab	۷۹/۶۴ab
نانوسیلیکون	۵/۰۲bc	۷/۳۲b	۱۲/۳۴ bc	۱/۰۳۴ cd	۰/۹۴b	۲/۲۸bc	۷۳/۴۰bc	۸۷/۲۵ ab	۸۱/۶۳a

داده‌های هر ستون که حداقل در یک حرف با هم مشترک هستند، با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد معنی دار نیستند



شکل ۱: اثر تنش شوری و سیلیکون و نانوسیلیکون بر گیاه ذرت. 0 بدون تنش و بدون سیلیکون. Si دارای سیلیکون. NSi نانوسیلیکون. NaCl شوری. Si/NaCl شوری و سیلیکون. NSi/NaCl شوری و نانوسیلیکون.

تجزیه واریانس آشکار کرد که میزان مالون دی آلدهید و پروتئین محلول تحت اثر شوری به صورت معنی داری تغییر کرده است. سیلیکون در میزان پراکسید هیدروژن و مالون دی آلدهید و میزان فعالیت پراکسیداز و نانوسیلیکون در میزان پراکسید هیدروژن و مالون دی آلدهید اثر معنی دار داشت. برهم کنش شوری با سیلیکون در میزان پراکسید هیدروژن و مالون دی آلدهید و برهم کنش شوری با نانوسیلیکون تنها در میزان مالون دی آلدهید اثر معنی دار داشتند (جدول ۷). طی تنش شوری در گیاهان فاقد سیلیکون و نانوسیلیکون، میزان پراکسید هیدروژن در اندام هوایی گیاه نسبت به شاهد حدود دو برابر افزایش داشت. هرچند که با کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون در گیاهان تحت شوری مقدار پراکسید هیدروژن به ترتیب ۷۰ و ۵۰ درصد کاهش یافت (شکل ۲ الف) (جدول ۸).

تغییرات صفات بیوشیمیایی: با بررسی تجزیه واریانس مشخص شد که شوری در میزان همه رنگدانه‌ها اثر معنی دار داشت، در حالی که اثر سیلیکون و نانوسیلیکون در میزان کاروتنوئیدها معنی دار نبود. اثر متقابل شوری با سیلیکون و نانوسیلیکون در میزان هیچ یک از رنگدانه‌ها معنی دار بود (جدول ۵). تنش شوری موجب کاهش معنی دار میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها در برگ گیاهان شد، کاربرد نانوسیلیکون هم در گیاهان بدون تنش و هم در گیاهان تحت شوری منجر به افزایش کلروفیل a و کلروفیل b در برگ گیاهان شد، در حالی که افزایش این رنگیزه‌ها با کاربرد سیلیکون تنها در مورد کلروفیل b گیاهان شاهد معنی دار بود. هیچ یک از تیمارهای سیلیکون و نانوسیلیکون در گیاهان شاهد و تحت تنش شوری، اثر معنی داری در میزان کاروتنوئیدهای برگ گیاه ذرت نداشتند (جدول ۶).

جدول ۵: نتایج تجزیه واریانس میزان رنگدانه‌های گیاه در واکنش به تیمارهای شوری در گیاه ذرت رشد یافته در حضور و فقدان سیلیکون و نانوسیلیکون

منابع تغییرات	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاروتنوئیدها
شوری	۱	۰/۱۵۸**	۰/۰۲۹**	۰/۳۱۰**	۱/۱۳۷*
سیلیکون	۱	۰/۰۴۷*	۰/۰۱۴۴**	۰/۱۱**	۰/۳۸۸ ^{ns}
نانوسیلیکون	۱	۰/۰۹۱**	۰/۰۱۷۱**	۰/۱۸۰**	۰/۳۳۴ ^{ns}
شوری×سیلیکون	۱	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۵ ^{ns}	۰/۱۱۸ ^{ns}
شوری×نانوسیلیکون	۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰

^{ns}، *، ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول ۶: مقایسه میانگین میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی در واکنش به تیمارهای شوری در برگ‌های گیاهان ذرت رشد یافته در حضور و فقدان سیلیکون و نانوسیلیکون

تیمار	رنگیزه (میلی گرم در گرم وزن تر)		
	کلروفیل a	کاروتنوئیدها	کلروفیل b
شوری صفر			
شاهد	۰/۶۳ b	۳/۲۵a	۰/۲۲b
سیلیکون	۰/۷۷ab	۳/۴۰a	۰/۳۱a
نانوسیلیکون	۰/۸۲a	۳/۵۶a	۰/۳۰a
شوری ۱۰۰ میلی مولار			
شاهد	۰/۴۵c	۲/۴۶b	۰/۱۵c
سیلیکون	۰/۵۶bc	۳/۰۰ab	۰/۲۰bc
نانوسیلیکون	۰/۵۹b	۲/۷۷ab	۰/۲۲b

داده‌های هر ستون که حداقل در یک حرف با هم مشترک هستند، با آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ معنی‌دار نیستند

تیمار نانوسیلیکون تنها در گیاهان فاقد شوری فعالیت پراکسیداز محلول را زیاد کرد، ولی در گیاهان تحت شوری اثر معنی‌داری در فعالیت این آنزیم نداشت (شکل ۲-د). در گیاهانی فاقد تنش شوری، سیلیکون و نانوسیلیکون اثر معنی‌داری بر میزان پروتئین محلول نداشتند. میزان پروتئین محلول در گیاهان تحت تنش شوری فاقد سیلیکون و نانوسیلیکون نسبت به نمونه شاهد به اندازه ۲۰ درصد کاهش یافت (جدول ۸). کاربرد سیلیکون معدنی در گیاهان تحت تنش شوری، اثر معنی‌داری در میزان پروتئین محلول نداشت، حتی کاربرد نانوسیلیکون در گیاهان تحت تنش شوری، کاهش میزان پروتئین محلول تحت شوری را تشدید کرد (شکل ۲-ج).

در گیاهان فاقد تنش شوری، سیلیکون معدنی و بخصوص نانوسیلیکون موجب افزایش میزان مالون دی آلدئید در گیاهان شدند (شکل ۲-ب). شوری در گیاهان فاقد سیلیکون و نانوسیلیکون موجب افزایش قابل توجه میزان پراکسیداسیون لیپید اندام هوایی شد، به طوری که میزان مالون دی آلدئید ۱۴ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت. برعکس کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون در گیاهان تحت شوری میزان پراکسیداسیون لیپید را به کمتر از نصف کاهش داد (شکل ۲-ب) (جدول ۸).

تنش شوری اثر معنی‌داری در فعالیت پراکسیداز محلول اندام هوایی گیاه نداشت. کاربرد سیلیکون هم در گیاهان تحت شوری و هم در گیاهان فاقد شوری موجب افزایش معنی‌دار فعالیت این آنزیم شد. ولی

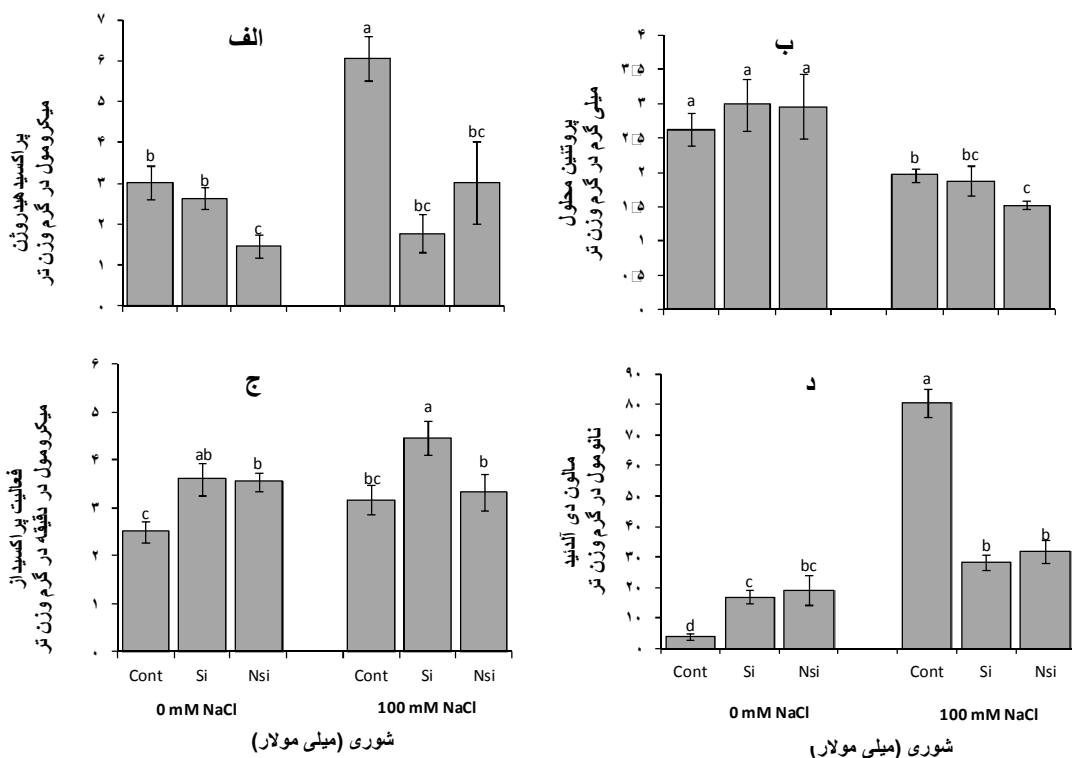
جدول ۷: نتایج تجزیه واریانس میزان پراکسید هیدروژن، مالون دی آلدئید و پروتئین محلول و میزان فعالیت پراکسیداز محلول گیاه در واکنش به تیمارهای شوری در گیاه ذرت رشد یافته در حضور و فقدان سیلیکون و نانوسیلیکون

منابع تغییرات	درجه آزادی	پراکسید هیدروژن	مالون دی آلدئید	پراکسیداز محلول	پروتئین محلول
شوری	۱	۰/۹۸ ^{ns}	۶۵۲/۳ ^{**}	۱/۱۵ ^{ns}	۸/۸۹ ^{**}
سیلیکون	۱	۲۴/۲۵ ^{**}	۱۶۳۵/۳ ^{**}	۵/۲۸ ^{**}	۰/۰۷ ^{ns}
نانوسیلیکون	۱	۱۵/۱۲ ^{**}	۱۱۵۷/۵ ^{**}	۱/۳۳ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}
شوری×سیلیکون	۱	۱۶/۸۸ ^{**}	۴۵۱۳/۳ ^{**}	۰/۹۶ ^{ns}	۰/۲۰ ^{ns}
شوری×نانوسیلیکون	۱	۱/۷۱ ^{ns}	۴۲۰۴/۱ ^{**}	۰/۵۳ ^{ns}	۰/۶۲ ^{ns}

ns، *، ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

میزان فتوستتزر گیاهان تیمار شده با سیلیکون و نانوسیلیکون به ترتیب بیش از ۲/۳ و ۲ برابر نسبت به گیاهان بدون این مواد بیشتر بود (شکل ۲-الف) (جدول ۸). البته در شرایط بدون تنش فقط نانوسیلیکون موجب افزایش معنی دار میزان فتوستتزر شد.

تغییرات فتوستتزر: تنش شوری در گیاهان فاقد سیلیکون و نانوسیلیکون، میزان فتوستتزر را نسبت به شاهد، یک سوم کاهش داد. کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون موجب افزایش میزان فتوستتزر هم در گیاهان فاقد تنش شوری و هم در گیاهان تحت شوری گردید، به طوری که در گیاهان تحت شوری،



شکل ۲: اثرات تنش شوری بر میزان پراکسید هیدروژن (الف)، مالون دی آلدئید (ب)، پروتئین محلول (ج) و پراکسیداز محلول (د) در برگ گیاهان ذرت رشد یافته در حضور و فقدان سیلیکون و نانوسیلیکون. میله‌های روی هر یک از ستون‌ها نشان دهنده خطای استاندارد می‌باشد.

تعرق را زیاد کرد، اما در گیاهان تحت شوری سیلیکون و نانوسیلیکون، میزان تعرق را به ترتیب به اندازه ۸۰ و ۵۴ درصد نسبت به گیاهان تحت شوری ولی بدون این مواد، کاهش دادند (شکل ۳ ج) (جدول ۸). تحت شرایط شوری در فقدان سیلیکون و نانوسیلیکون، راندمان مصرف آب پایین آمد، اما تیمارهای سیلیکون و نانوسیلیکون در گیاهان تحت شوری موجب افزایش راندمان مصرف آب به ترتیب به اندازه ۱۷ و ۶ برابر شد (شکل ۳ د) (جدول ۸). البته در شرایط بدون تنش سیلیکون و نانوسیلیکون اثری بر راندمان مصرف آب نداشت.

تحت تنش شوری بدون سیلیکون و نانوسیلیکون، میزان هدایت روزنه‌ای نسبت به نمونه شاهد ۳۵ درصد افزایش را نشان داد. نانوسیلیکون در گیاهان شاهد که تحت تنش شوری نبودند، میزان هدایت روزنه‌ای را زیاد کرد، اما در گیاهان تحت شوری هم سیلیکون و هم نانوسیلیکون میزان هدایت روزنه‌ای را نسبت به فقدان این مواد، به ترتیب به اندازه ۹۰ و ۷۰ درصد کاهش دادند (شکل ۳ ب) (جدول ۸).

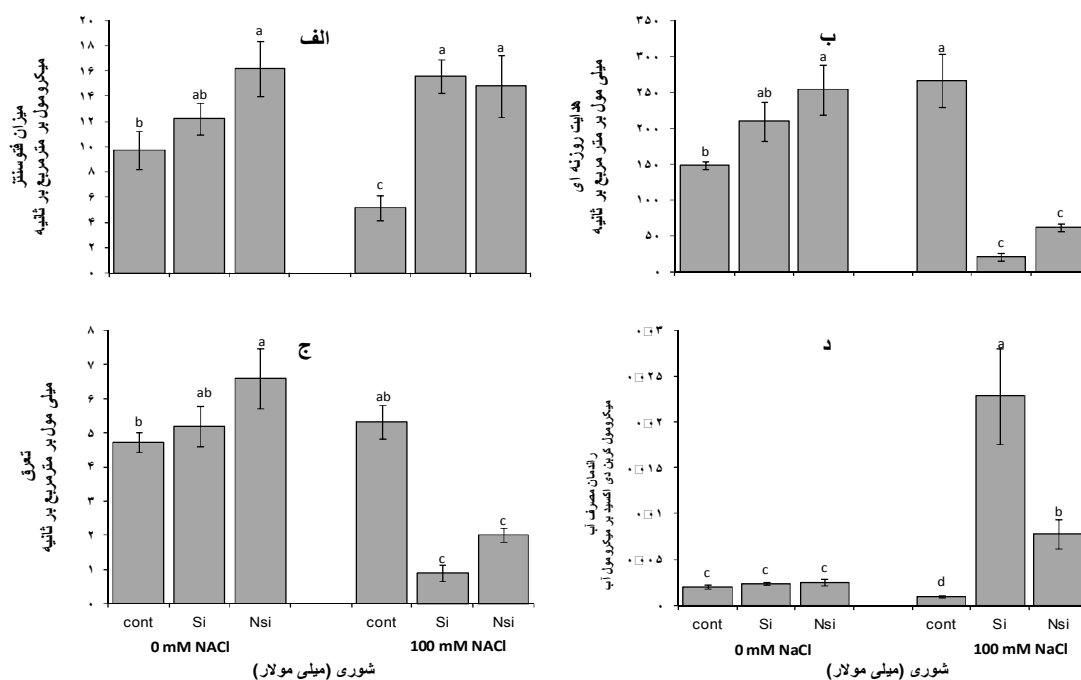
در فقدان سیلیکون و نانوسیلیکون شوری اثر معنی داری در مقدار تعرق گیاهان نداشت. در شرایط بدون شوری سیلیکون و به ویژه نانوسیلیکون میزان

جدول ۷: نتایج تجزیه واریانس پارامترهای فتوسنتزی گیاه در واکنش به تیمارهای شوری در گیاه ذرت رشد یافته در حضور و

فقدان سیلیکون و نانوسیلیکون

منابع تغییرات	درجه آزادی	تعرق	هدایت روزنه‌ای	فتوسنتز	راندمان مصرف آب
شوری	۱	۷۸/۸۱**	۱۴۵۳۸۴/۸**	۴/۰۵۹	۰/۰۰۰۷**
سیلیکون	۱	۱۳/۴۵**	۴۸۶۹۴/۹*	۱۷۴/۲۲*	۰/۰۰۰۵**
نانوسیلیکون	۱	۱/۲۸ ^{ns}	۱۸۲۲۷/۷*	۲۶۸/۰۳**	۰/۰۰۰۵ ^{ns}
شوری×سیلیکون	۱	۲۰/۹۲**	۱۱۸۳۵۸/۷**	۶۷/۳۹*	۰/۰۰۰۵**
شوری×نانوسیلیکون	۱	۲۳/۸۲**	۱۱۹۶۷۲/۷**	۱۱/۶۳	۰/۰۰۰۰

^{ns}، *، ** به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.



شکل ۳: اثرات شوری بر شدت فتوسنتز (الف)، هدایت روزنه‌ای (ب)، تعرق (ج) و راندمان مصرف آب (د) در برگ گیاه ذرت رشد یافته در حضور و فقدان سیلیکون و نانوسیلیکون. میله‌های روی هر یک از ستون‌ها نشان دهنده خطای استاندارد می‌باشد.

جدول ۸: اثر تنش شوری بر پارامترهای مورد سنجش و مقایسه اثر سیلیکون و نانوسیلیکون در تخفیف اثرات شوری در گیاه ذرت تحت شوری

فاکتورهای مورد بررسی	درصد تغییر تحت شوری	اثر سیلیکون در گیاهان تحت شوری	اثر نانوسیلیکون در گیاهان تحت شوری
وزن تر کل	۶۲ درصد کاهش	۵۵ درصد افزایش	۳۰ درصد افزایش
وزن خشک کل	۷۲ درصد کاهش	۸۶ درصد افزایش	۴۷ درصد افزایش
درصد آب نسبی کل	۱/۵ درصد کاهش	۲ درصد افزایش	۵/۲ درصد افزایش
میزان کلروفیل کل	۲۹ درصد کاهش	۲۴ درصد افزایش	۳۲ درصد افزایش
میزان فتوستت	۲۶ درصد کاهش	۳,۲ برابر افزایش	۳,۰ برابر افزایش
تعرق	۲ درصد افزایش	۸۲ درصد کاهش	۵۹ درصد کاهش
راندمان مصرف آب	۵۰ درصد کاهش	۱۷۰ درصد افزایش	۶۰۰ درصد افزایش
میزان پروتئین محلول	۲۰ درصد کاهش	۲/۲ درصد کاهش	۲۴ درصد کاهش
پراکسید هیدروژن	۱۰۰ درصد افزایش	۷۰ درصد کاهش	۵۰ درصد کاهش
میزان پراکسیداسیون لیپید	۱۴۲۰ درصد افزایش	۵۹ درصد کاهش	۵۳ درصد کاهش
پراکسیداز محلول	۱۸ درصد افزایش	۳۰ درصد افزایش	۶ درصد کاهش

بحث

شد (شکل ۳ الف). از طرف دیگر شوری سبب ایجاد سمیت توسط یون‌های سمی می‌شود که افزایش تنش اکسیداتیو را به دنبال دارد. لذا، تحت تنش شوری افزایش تولید پراکسید هیدروژن و پراکسیداسیون لیپید دیده شد (شکل ۲). پراکسید هیدروژن نقش دوگانه‌ای در گیاهان تحت تنش بازی می‌کند. اول اینکه شاخصی از تولید رادیکال آزاد در گیاه است که میزان آن در گیاهان تحت تنش بالا می‌رود. دوم این که یکی از مولکول‌هایی است که در مسیر سیگنالینگ دفاع سلولی فعال است و عملاً با افزایش پراکسید هیدروژن، فرآیند مرگ برنامه‌ریزی شده سلولی آغاز می‌شود (Farouk, 2011). بالارفتن پراکسید هیدروژن موجب پراکسیده‌شدن غشاهای سلولی شده که تخریب غشاها را به دنبال دارد. یکی از معیارهای سنجش میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی، اندازه‌گیری میزان مالون دی‌آلدهید می‌باشد. در این آزمایش، طی تنش شوری میزان مالون دی‌آلدهید افزایش معنی‌دار داشت (شکل ۲). محققان دیگر نیز در نخود و ذرت نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش شوری موجب کاهش رشد گیاه ذرت شد (جدول ۴). کاهش رشد گیاهان مختلف از جمله ذرت تحت شوری توسط محققان مختلف گزارش شده است (Nematpour et al., 2015; Zare et al., 2015). تنش شوری منجر به کاهش درصد آب نسبی گیاه شد (جدول ۴ و ۸) در حالی که میزان تعرق گیاهان تحت شوری کاهش معنی‌داری نداشت و حتی هدایت روزنه‌ای تحت شوری زیاد شد (شکل ۳). گزارشات متفاوتی در مورد اثر شوری بر تعرق وجود دارد. شوری در گیاه *Balanites aegyptiaca* موجب افزایش تعرق شد (Radwan et al., 2000) و در گیاه خیار موجب کاهش میزان تعرق گشت (Stepien and Klbus, 2006). به نظر می‌رسد که تحت شوری جذب آب توسط گیاه ذرت کاهش اما خروج آب از آنها کاهش نیافته است و در نتیجه موازنه آب در گیاه منفی شده است. این امر احتمالاً با کاهش واکنش‌های آنزیمی فتوستت سبب کاهش سرعت فتوستت در گیاه

روزنه مربوط باشد. لذا باز بودن روزنه‌ها موجب تبادلات بهتر گازی شده که به همراه افزایش میزان رنگدانه‌ها، میزان فتوسنتز را بالا می‌برد.

تحت تنش شوری، تیمار با سیلیکون و نانوسیلیکون موجب بالارفتن وزن تر و خشک ریشه و برگ گیاه گردید (جدول ۴ و ۸). سیلیکون در گیاهان تیره گندم در ساختار دیواره سلولی ساقه و برگ‌ها وارد می‌شود و موجب استحکام فیزیکی آنها می‌گردد (Liang, 1998). سیلیکون با بهبود افراستگی گیاه دریافت نور توسط برگ را بیشتر می‌نماید که خود محرک رشد بیشتر گیاه می‌باشد. مقایسه وزنی نشان داد که افزایش وزن تر و خشک کل با کاربرد سیلیکون نسبت به نانوسیلیکون در گیاهان تحت شوری بیشتر بود (جدول ۴ و ۸). بررسی درصد آب نسبی نشان داد که نانوسیلیکون نسبت به سیلیکون درصد آب نسبی در گیاهان تحت شوری را کمی بیشتر افزایش داده است. از طرف دیگر کاهش تعرق و هدایت روزنه‌ای گیاهان تحت شوری با کاربرد سیلیکون بسیار بیشتر از کاربرد نانوسیلیکون بود. دلایل متعددی برای این امر ذکر شده که از جمله آن تجمع سیلیکون در برگ موجب ضخیم شدن کوتیکول می‌شود (Matoh et al., 1986). این امر نشان می‌دهد که احتمالاً در گیاهان تیمار شده با نانوسیلیکون نسبت به سیلیکون تحت شوری جذب آب بیشتر بوده که با وجود تعرق بالاتر هنوز درصد آب نسبی بیشتر را حفظ کرده بود. در گندم تنش شوری میزان آب نسبی را کاهش داد و سیلیکون میزان آن را بالا برد (Tuna et al., 2008). در گیاه باقلا تحت تنش شوری، کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون میزان آب نسبی را افزایش داد (Qados and Mofteh, 2015). طبق تحقیقات Haghghi و Pessaraki (۲۰۱۳) در گوجه گیلاسی، سیلیکون اثر معنی‌داری بر تعرق گیاه تحت تنش شوری نداشت، ولی نانوسیلیکون میزان آن را کاهش

(Moussa, 2006; Krouma, 2009). از جمله غشاهای اندامکی که مورد تخریب رادیکال‌های آزاد قرار می‌گیرد، غشای کلروپلاست‌ها می‌باشد. به همین دلیل میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی کاهش داشت (جدول ۶). با تخریب غشاهای کلروپلاستی و کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی، شدت فتوسنتز نیز به شدت کاهش یافت (شکل ۲-الف). به علاوه احتمالاً افزایش تنش اکسیداتیو منجر به کاهش میزان پروتئین محلول در گیاهان شد (شکل ۲-ج). به صورت مشابهی کاهش پروتئین محلول در رقم‌های ذرت حساس به شوری تحت شوری گزارش شده است (Azevedo Neto et al., 2009). این نتایج آشکار می‌سازد کاهش فتوسنتز و عدم کاهش همزمان تعرق موجب کاهش راندمان مصرف آب در گیاه شد و در نتیجه رشد کاهش یافت (جدول ۴). نتیجه این که شوری موجب کاهش وزن تر و خشک در گیاهان می‌گردد.

در شرایط بدون تنش شوری، سیلیکون معدنی و نانوسیلیکون، سبب کاهش وزن خشک اندام هوایی و افزایش وزن تر و خشک ریشه گیاه شد، ولی وزن تر و خشک تغییر معنی‌دار نداشت. در این گیاهان، تیمار با سیلیکون و نانوسیلیکون سبب کاهش میزان پراکسید هیدروژن شد، ولی میزان مالون دی‌آلدئید زیاد شد (شکل ۲). به علاوه در شرایط فاقد شوری، سیلیکون و به ویژه نانوسیلیکون موجب افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز محلول گیاهان شد (شکل ۲). به نظر می‌رسد که سیلیکون و نانوسیلیکون سبب تحمیل تنشی در گیاهان فاقد تیمار شوری شده است که رشد ریشه را نسبت به بخش هوایی زیاد کرده است. با این وجود، در شرایط بدون تنش میزان فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، تعرق و میزان کلروفیل‌ها تحت تیمار با نانوسیلیکون افزایش یافت (جدول ۶). این امر ممکن است به رسوب نانوسیلیکون در سلولهای نگهبان روزنه، سختی دیواره و باز ماندن

موثرتر بود (Tripathi et al., 2016; Tantawy et al., 2015).

تیمار سیلیکون و به ویژه نانوسیلیکون میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی را در گیاهان تحت تنش شوری (تقریباً به یک نسبت) افزایش داد (جدول ۶). میزان کلروفیل معیار مهمی برای ارزیابی سلامت گیاه می‌باشد زیرا به شکل مستقیم معرف میزان فتوسنتز و نهایتاً مقدار توده گیاهی می‌باشد (Wang et al., 2002). در این پژوهش نیز هماهنگ با بالا رفتن میزان رنگدانه‌ها با کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون شدت فتوسنتز گیاهان تحت شوری (در هر دو تیمار تقریباً سه برابر) افزایش (شکل ۳ الف) یافت. با توجه به کاهش هدایت روزنه‌ای و تعرق گیاهان تحت شوری با کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون در گیاه ذرت افزایش فتوسنتز این گیاهان چگونه امکان‌پذیر است؟ Matoh و همکاران (۱۹۸۶) پیشنهاد کردند که تجمع سیلیکون در سلول‌های نگهبان روزنه موجب سختی و عدم انعطاف‌پذیری این سلول‌ها و تغییر منفذ روزنه از حالت باز به حالت نیمه باز و گاهاً بسته می‌گردد که موجب کاهش میزان هدایت روزنه‌ای و در نهایت تعرق در گیاه تحت تیمار با سیلیکون و نانوسیلیکون می‌شود، ولی در این صورت میزان فتوسنتز نیز می‌بایست کاهش می‌یافت. لذا، ممکن است تیمار سیلیکون و تا حدودی نانوسیلیکون سرعت باز و بسته شدن روزنه را بهبود بخشیده و در نتیجه با وجود کاهش هدایت روزنه‌ای و تعرق شدت فتوسنتز را در گیاهان تحت شوری زیاد کرده باشد که نیاز به پژوهش‌های بیشتر دارد. در نتیجه، کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون راندمان مصرف آب را افزایش داد. البته اثر سیلیکون بسیار بیشتر از نانوسیلیکون بود. این امر نشان می‌دهد که گیاهان تحت شوری تیمار شده با سیلیکون نسبت به

داد. در برنج رشد یافته در محیط شور، کاربرد سیلیکون با کاهش میزان تعرق سبب کاهش جذب سدیم گشت و میزان تنش گیاه را کم کرد (Yeo et al., 1999). این نتایج آشکار می‌سازد که گیاهان تیمار شده با سیلیکون تحت شوری نسبت به نانوسیلیکون تعرق و جذب آب کمتری داشته و لذا احتمالاً جذب یون‌های سمی مانند سدیم و کلر در آنها نیز کمتر شده است. از سوی دیگر، تیمار سیلیکون در گیاهان تحت تنش شوری، موجب افزایش معنی‌دار در فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدان پراکسیداز محلول شد، ولی نانوسیلیکون در فعالیت این آنزیم اثر معنی‌دار نداشت (شکل ۲-د). لذا، با کاربرد سیلیکون میزان پراکسید هیدروژن و همچنین مالون دی‌آلدئید نسبت به کاربرد نانوسیلیکون در گیاهان تحت شوری بیشتر کاهش یافت (شکل ۲ الف و ب). این نتایج آشکار می‌سازد که کاربرد سیلیکون نسبت به نانوسیلیکون تنش اکسیداتیو را در گیاهان تحت شوری بیشتر کاهش داده است. در این آزمایش، پژوهش‌های متنوعی در راستای این آزمایش ارائه شده، در خیار و جو تیمار سیلیکون با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان موجب کاهش اثرات شوری گشت (Liang et al., 2003; Zhu et al., 2004). حتی در گیاه سویا طی تنش خشکی و امواج UVB، سیلیکون میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را افزایش داد به این شکل خسارت ناشی از تنش کاهش یافت (Shen et al., 2010). استفاده از نانوسیلیکون نیز در گیاه سویا و باقلا تحت تنش شوری، با افزایش سیستم آنتی‌اکسیداتیو موجب کاهش اثرات نامطلوب شوری شد (Farhangi-Abriz and Torabian, 2018; Qados, 2015). در گیاه فلفل شیرین طی تنش شوری و در گیاه ذرت در تنش ناشی از آرسنیک استفاده از نانوسیلیکون نسبت به سیلیکون در کاهش تنش

معدنی، چه به شکل نانو، تنش شوری را کاهش داده بهبود رشد گیاه را سبب می‌شود. با وجود افزایش شدت فتوستز و میزان رنگدانه‌های فتوستزی تقریباً معادل، کاهش بیشتر تعرق با کاربرد سیلیکون نسبت به نانوسیلیکون در گیاهان تحت شوری سبب افزایش بیشتر راندمان مصرف آب در این تیمار شد. از طرف دیگر افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز محلول با کاربرد سیلیکون در گیاهان تحت شوری کاهش بیشتر پراکسید هیدروژن و پراکسیداسیون لیپید در این تیمار را به دنبال داشت حاکی از کاهش بیشتر تنش اکسیداتیو با کاربرد سیلیکون نسبت به نانوسیلیکون بود. در نتیجه افزایش رشد گیاهان تحت شوری با کاربرد سیلیکون نسبت به نانوسیلیکون بیشتر بود

سپاسگزاری

به این وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه گلستان و دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری جهت فراهم نمودن امکانات پژوهشی و بودجه لازم جهت انجام پایان نامه دکتری خانم محبوبه زراوشان تشکر می‌گردد.

نانوسیلیکون در جذب و حفظ آب موفق‌تر بوده‌اند (شکل ۳).

این نتایج آشکار می‌سازد که با کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون در گیاهان تحت تنش شوری، هم میزان رنگیزه‌ها افزایش می‌یابد و هم با کاهش تعرق و هدایت روزنه‌ای علیرغم حفظ فتوستز زیاد، موجب افزایش راندمان مصرف آب می‌گردد که نهایتاً رشد بیشتر را به دنبال دارد (شکل ۳). این نتایج در تائید تحقیق سایرین می‌باشد که قبلاً در گیاه جو و برنج و سورگوم ارائه شده است (Liang, 1999; Matoh et al., 1986; Yongchao and Ruixing, 2002; Liang, 1998; Nabati, 2013).

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج این تحقیق نشان داد، با این که تحت تنش شوری، میزان پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدهید در گیاه ذرت افزایش یافته و میزان پروتئین محلول، میزان رنگدانه‌ها، شدت فتوستز، تعرق، هدایت روزنه‌ای و دنبال آن راندمان مصرف آب و وزن تر و خشک در گیاه کاهش می‌یابد. کاربرد سیلیکون چه به شکل

References

- Azevedo Neto, A.D., Prisco, J.T. and Gomes-Filho, E. (2009).** Changes in soluble amino-N, soluble proteins and free amino acids in leaves and roots of salt-stressed maize genotypes. *Journal of Plant Interactions*. 4: 137-144.
- 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.
- Farouk, S. (2011).** Ascorbic acid and α -Tocopherol minimize salt-induced wheat leaf senescence. *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*. 7: 58-79.
- Farhangi-Abriz, S. and Torabian, S. (2018).** Nano-silicon alters antioxidant activities of soybean seedlings under salt toxicity. *Protoplasma*. 255(3): 953-962.
- Gao, X., Zou, C., Wang, L. and Zhang, F. (2006).** Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. *Journal of Plant Nutrition*. 29: 1637-1647.
- Guntzer, F., Keller, C. and Meunier, J.D. (2012).** Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. 32: 201-213.
- Gupta, B. and Huang, B. (2014).** Review Article Mechanism of Salinity Tolerance in Plants: Physiological, Biochemical, and Molecular Characterization. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Genomic.
- Haghighi, M. and Pesarakli, 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.

- Hasanpour, R., Neyshabouri, M. and Zarehaghi, D. (2015).** Combined effect of soil salinity and compaction on some growth indices of corn. *Water and Soil Science (Agricultural Science)*. 25: 247-260. (in Persian with English abstract).
- Hussain, K., Majeed, A., Nawaz, K. and Nisar, M.F. (2010).** Changes in morphological attributes of maize (*Zea mays* L.) under NaCl salinity. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*. 8: 230-232.
- Kar, M. and Mishra, D. (1976).** Catalase, Peroxidase and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. *Plant Physiology*. 57: 315-319.
- Karunakaran, G., Suriyaprabha, R., Manivasakan, P., Yuvakkumar, R., Rajendran, V., Prabhu, P. and Kannan, N. (2013).** Effect of nanosilica and silicon sources on plant growth promoting rhizobacteria, soil nutrients and maize seed germination. *IET Nanobiotechnology*. 7: 70-77.
- Krouma, A. (2009).** Physiological and nutritional responses of chickpea (*Cicer arietinum* L.) to salinity. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 33: 503-512.
- Liang, Y.C. (1999).** Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. *Plant Soil*. 209: 217-224.
- Liang, Y., Chen, Q.I.N., Liu, Q., Zhang, W. and Ding, R. (2003).** Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Plant Physiology*. 160: 1157-1164.
- Liang, Y.C. (1998).** Effects of silicon on leaf ultrastructure, chlorophyll content and photosynthetic activity in barley under salt stress. *Pedosphere*. 8: 289-296.
- Lichtenthaler, H.K. (1987).** Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In *Methods in Enzymology*. 148: 350-382.
- Liu, X. and Huang, B. (2000).** Heat stress injury in relation to membrane lipid peroxidation in creeping. *Crop Science*. 40: 503-510.
- Malčovská, S.M., Dučaiová, Z., Maslaňáková, I. and Bačkor, M. (2014).** Effect of silicon on growth, photosynthesis, oxidative status and phenolic compounds of maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium excess. *Water, Air, and Soil Pollution*. 225: 2056.
- Markovich, O., Steiner, E., Aharoni, A., and Elbaum, R. (2017).** Silicon promotes cytokinin biosynthesis and delays senescence in Arabidopsis and Sorghum. *Plant, Cell and Environment*. 40: 1189-1196.
- Matoh, T., Kairusmee, P. and Takahashi, E. (1986).** Salt-induced damage to rice plants and alleviation effect of silicate. *Soil Science and Plant Nutrition*. 32: 295-304.
- Moussa, H.R. (2006).** Influence of exogenous application of silicon on physiological response of salt-stressed maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Agriculture and Biology*. 8: 293-297.
- Munns, R. and Tester, M. (2008).** Mechanisms of Salinity Tolerance. *Annual Review of Plant Biology*. 59: 651-681.
- Nabati, J., Kafi, M., Masoumi, A. and Zare Mehrjerdi, M. (2013).** Effect of salinity and silicon application on photosynthetic characteristics of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) *International Journal of Agricultural Sciences*. 3: 483-492.
- Nematpour, A., Kazemeini, S. and Edalat, M. (2015).** Effect of salinity on some growth and physiological characteristics of two cultivars of sweet corn (*Zea mays* var. *saccharata*). *Plant Production Technology*. 7: 153-165. (In Persian with English abstract).
- Parveen, N. and Ashraf, M. (2010).** Role of silicon in mitigating the adverse effects of salt stress on growth and photosynthetic attributes of two maize (*Zea mays* L.) Cultivars grown hydroponically. *Pakistan Journal of Botany*. 42: 1675-1684.
- Poorakbar, L. and Maghsoumi Holasoo, S. (2015).** Salinity effect on antioxidative enzymes activity in roots and leaves of maize plant (*Zea mays* L. cv. SC. 704). *Applied Biology*. 28: 5-22. (in Persian with English abstract).
- Qados, A. and Moftah, A.E. (2015).** Influence of silicon and nano-silicon on germination, Growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.) under salt stress conditions. *American Journal of Experimental Agriculture*. 5: 509-524.
- Qados, A.M.A. (2015).** Mechanism of nanosilicon-mediated alleviation of salinity stress in faba bean (*Vicia faba* L.) plants. *Journal of Experimental Agriculture International*. 78-95.
- Radwan, U.A., Springule, I., Biswas, P.K. and Huluka, G. (2000).** The effect of salinity on water use efficiency of *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. *Egyptian Journal of Biology*. 2: 1-7.
- Ritchie, S.W., Nguyen, H.T. and Haloday, A.S. (1990).** Leaf water content and gas exchange parameters of two wheat genotype differing in drought resistance. *Crop Science*. 30: 105-111.

- Sergive, I., Alexieva, V. and Karanov, E. (1997).** Effect of spermine, atrazine and combination between them on some endogenous protective systems and stress markers in plants. *Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*. 51: 121-124.
- Shen, X., Zhou, Y., Duan, L., Li, Z., Eneji, A.E. and Li, J. (2010).** Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. *Journal of plant physiology*. 167: 1248-1252.
- Shiferaw, B. and Baker, D.A. (1996).** An evaluation of drought screening techniques for *Eragrostis tef*. *Crop Science*. 36: 74-85.
- Song, A., Li, P., Fan, F., Li, Z. and Liang, Y. (2014).** The effect of silicon on photosynthesis and expression of its relevant genes in rice (*Oryza sativa* L.) under high-zinc stress. *PLoS ONE* 9: e113782.
- Stępień, P. and Klbus, G. (2006).** Water relations and photosynthesis in *Cucumis sativus* L. leaves under salt stress. *Biologia Plantarum* 50(4): 610.
- Tantawy, A.S., Salama, Y.A.M., El-Nemr, M.A. and Abdel-Mawgoud, A.M.R. (2015).** Nano silicon application improves salinity tolerance of sweet pepper plants. *International Journal of Chem Tech Research*. 8: 11-17.
- Teare, I.D., Kanemasu, E.T., Powers, W.L. and Jacobs, H.S. (1973).** Water-use efficiency and its relation to crop canopy area, stomata regulation and root distribution. *Agronomy Journal*. 65: 207-211.
- Tripathi, D.K., Singh, S., Singh, V.P., Prasad, S.M., Chauhan, D.K. and Dubey, N.K. (2016).** Silicon nanoparticles more efficiently alleviate arsenate toxicity than silicon in maize cultivar and hybrid differing in arsenate tolerance. *Frontiers in Environmental Science*. 4: 46.
- Tuna, A.L., Kaya, C., Higgs, D., Murillo-Amador, B., Aydemir, S. and Girgin, A.R. (2008).** Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. *Environmental and Experimental Botany*. 62:10-16.
- Vaculík, M., Pavlovič, A. and Lux, A. (2015).** Silicon alleviates cadmium toxicity by enhanced photosynthetic rate and modified bundle sheath's cell chloroplasts ultrastructure in maize. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 120: 66-73.
- Yongchao, L. and Ruixing, D. (2002).** Influence of silicon on microdistribution of mineral ions in roots of salt-stressed barley as associated with salt tolerance in plants. *Science in China Series C: Life Sciences*. 45: 298.
- Wang, J., Possw, A., Donovanw, T.J., Shannonz, M.C. and Leschw, S.M. (2002).** Biophysical properties and biomass production of elephant grass under saline conditions. *Journal of Arid Environments*. 52: 447-456.
- Xie, Zh., Song, R., Shao, H., Song, F. Xu, H. and Lu, Y. (2015).** Silicon Improves Maize photosynthesis in Saline-Alkaline Soils. *The Scientific World Journal*. 15
- 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 & Environment*. 22: 559-565.
- Yuvakkumar, R., Elango, V., Rajendran, V., Kannan, N.S., and Prabu, P. (2011).** Influence of nanosilica powder on the growth of maize crop (*Zea mays* L.). *International Journal of Green Nanotechnology*. 3: 180-190.
- Zare, H., Ghanbarzadeh, Z., Behdad, A. and Mohsenzadeh, S. (2015).** Effect of silicon and nanosilicon on reduction of damage caused by salt stress in maize (*Zea mays*) seedlings, *Iranian Journal of Plant Biology*. 7: 59-74. (in Persian with English abstract).
- Zhu, Z., Wei, G., Li, J., Qian, Q. and Yu, J. (2004).** Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Science*. 167: 527-533.