

اثر تنش شوری و سیلیکون تکمیلی بر خصوصیات مورفولوژیک و روابط یونی گیاه کلزا

زهرا سلطانی^۱، فرید شکاری^{۱*}، خلیل جمشیدی^۱، رضا فتوت^۱ و رقیه عظیم خانی^۱

^۱گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۲، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۴/۰۹/۱۸)

چکیده:

جهت ارزیابی تاثیر شوری و سیلیکون بر برخی خصوصیات مورفولوژیک و تغذیه‌ای کلزا، رقم طلایه، آزمایشی با ۴ سطح سیلیکات پتاسیم (۰، ۱، ۲ و ۳ میلی مولار) و ۴ سطح کلرید سدیم (۰، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ گرم بر کیلوگرم خاک) در شرایط گلخانه انجام گرفت. در شرایط بدون تنش کاربرد سیلیکون اثری روی افزایش صفات اندازه‌گیری شده نداشت. اعمال تنش شوری موجب کاهش سطح برگ، وزن خشک برگ و بوته و نسبت سطح برگ (LAR) گردید. اضافه کردن سیلیکون به محیط رشد سبب بهبود شاخص‌های ذکر شده گردید. بیشترین صفات مورفولوژیک و تولید زیست‌توده در شوری ملایم، ۰/۳ گرم نمک و سطوح سیلیکون به کار رفته دیده شد. شوری موجب کاهش LAR گردید که بیانگر اثر شدیدتر تنش بر گسترش برگ در مقایسه با تولید زیست‌توده است. بالاترین وزن مخصوص برگ (SLW) در شرایط شوری قوی و بدون کاربرد سیلیکون به دست آمد. در مقابل کاربرد سیلیکون باعث شد تا میزان SLW در شرایط شوری کاهش یابد؛ که بیانگر اثر سیلیکون در گسترش برگ می‌باشد. با افزایش شوری در تیمارهای بدون کاربرد سیلیسیم غلظت سدیم افزایش، ولی غلظت پتاسیم و کلسیم کاهش یافت. کاربرد سیلیسیم موجب کاهش معنی‌دار در مقدار سدیم جذب شده و افزایش میزان پتاسیم و کلسیم در مقایسه با تیمارهای فاقد سیلیسیم گردید. نسبت پتاسیم به سدیم و کلسیم به سدیم در تمام سطوح سیلیسیم مصرفی افزایش نشان داد. کاربرد سیلیسیم موجب گردید تا غلظت سیلیس در مقایسه با تیمارهای بدون کاربرد سیلیکون افزایش معنی‌داری نشان داد.

کلمات کلیدی: پتاسیم، سدیم، سیلیکون، کلزا، کلسیم، نسبت سطح برگ.

مقدمه:

زیاد Na^+ سبب بروز دامنه وسیعی از مشکلات اسمزی و متابولیکی در گیاه می‌شود. در زمان بروز تنش شوری ناشی از Na^+ ، خسارت وارده به برگ‌ها همواره بسیار بیشتر از ریشه‌ها است و دلیل آن تجمع بیشتر Na^+ (و Cl^-) در برگ‌ها نسبت به ریشه‌ها است. هنگام بروز تنش Na^+ ، به طور مشخص کمبود سایر عناصر غذایی نیز ایجاد می‌شود، زیرا افزایش میزان Na^+ جذب سایر عناصر را مختل می‌کند. پیشنهاد شده است که اختلال در جذب عناصر غذایی به روش‌های زیر انجام می‌شود: (۱) اختلال مستقیم در جذب عناصر، از طریق تداخل

شوری خاک زمانی به وجود می‌آید که نمک‌های محلول در غلظت بالا در منطقه توسعه ریشه تجمع پیدا کنند و این عمل می‌تواند کاهش عملکرد گیاه را موجب گردد. در اراضی آبی این نمک‌ها از آب آبیاری و یا سطح ایستابی بالا ناشی می‌شوند (Rhoades et al., 1992). مکانیسم‌های مسئول کاهش رشد گیاهان تحت تنش شوری عبارت هستند از ۱- تنش اسمزی ۲- سمیت مخصوص یونی ۳- عدم تعادل مواد غذایی ۴- تنش اکسیداتیو (Anser et al., 2012). در اندام هوایی، تجمع

*نویسنده مسئول، نشانی پست الکترونیکی: shekari@znu.ac.ir

شوری حاصل از کلرید سدیم و امکان تغییر و بهبود نحوه تغذیه کلزا بود.

مواد و روش‌ها:

آزمایش گلخانه‌ای به صورت طرح فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار در گلخانه دانشگاه زنجان انجام گردید. در این آزمایش تاثیر سیلیکات پتاسیم روی گیاه کلزا تحت تنش شوری مورد بررسی قرار گرفت. بذرهاي کلزا، رقم طلایه از موسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه گردیدند. تیمارهای آزمایشی شامل شوری در ۴ سطح (۰، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ گرم بر کیلوگرم خاک معادل با ۲/۳، ۶/۵، ۸ و ۱۰/۷ دسی زیمنس بر متر) و سیلیکات پتاسیم در ۴ سطح (۰، ۱، ۲ و ۳ میلی‌مولار) بودند. آزمایش با گلدان‌های پلاستیکی با گنجایش ۷ کیلو گرم خاک اجرا گردید. خاک بکار رفته مخلوطی از خاک زراعی، ماسه و کود آلی پوسیده با نسبت ۱:۳:۶ بود. خاک زراعی پس از الک چند نوبت با ماسه و کود آلی مخلوط گردید و پس از اضافه کردن نمک و سطوح مختلف سیلیکات پتاسیم، گلدان‌ها با خاک تیمار مربوط پر شدند. تعداد ۲۵ بذر پس از ضد عفونی توسط قارچ‌کش کربوکسی تیرام در هر گلدان کاشته شد و در مرحله ۲ تا ۳ برگی گیاهچه‌های بصورت تصادفی تنک شدند. بعد از تنک کردن تعداد پنج بوته در هر گلدان باقی ماند.

در مرحله شروع گلدهی، گیاهان موجود در گلدان‌ها برداشته شده و پس از اندازه‌گیری سطح برگ، برگ‌های نمونه‌برداری شده ابتدا با آب معمولی و سپس با آب مقطر شسته شدند و در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد خشک گردیدند. همین عمل برای ساقه نیز انجام گردید و وزن خشک برگ و ساقه بصورت جداگانه یادداشت گردید. نسبت سطح برگ و وزن ویژه برگ با استفاده از روابط زیر محاسبه گردید (Hunt, 1982):

$$\text{Leaf Area Ratio (LAR)} = \frac{\text{Leaf Area (cm}^2\text{)}}{\text{Total Dry Weight (g)}}$$

$$\text{Specific Leaf Weight (SLW)} = \frac{\text{Leaf weigh (mg)}}{\text{Leaf Area (cm}^2\text{)}}$$

جهت اندازه‌گیری میزان عناصر معدنی موجود در برگ‌ها، نمونه‌های خشک شده برگي کاملاً پودر و از الک ۰/۵ میلی

در هنگام انتقال عناصر دیگر از خلال غشاء سلولی، مانند کانال‌های یونی اختصاصی برای پتاسیم و (۲) جلوگیری از رشد ریشه، بوسیله اثرات تخریبی Na^+ در ساختمان خاک و تنش اسمزی ناشی از این یون. در یک جمع‌بندی، تنش Na^+ قادر است که جذب آب را کاهش داده و به دلیل اختلال در جذب عناصر غذایی (مانند فسفر، آهن و روی) رشد گیاه را محدود نماید. علاوه بر این وجود نمک در خاک، رشد میکروارگانیسم‌های مفید خاک، مانند میکروبیوزا قارچی را به شدت مختل می‌نماید که به نوبه خود اثرات منفی بر رشد گیاهان می‌گذارد (Tester and Davenport, 2003).

سیلیکون نقش متمایز و معنی‌داری در فرآیندهای تشکیل و باروری خاک و تغذیه گیاهان بازی می‌کند. فرضیات متعددی در توضیح اثر سیلیس فعال روی مقاومت به شوری گیاهان وجود دارد که عبارت هستند از: (۱) بهبود فعالیت فتوسنتزی (۲) افزایش نسبت انتخابی K^+/Na^+ (۳) افزایش فعالیت آنزیم‌ها (۴) افزایش مواد محلول در آوند چوبی (۵) کاهش جذب سدیم توسط گیاهان؛ و بالاخره، (۶) حفاظت مکانیکی در برابر سمیت عناصر سنگین را نیز انجام می‌دهد (Matichenkov, 2008). همچنین، این فرضیه نیز مطرح شده است که مکانیسم‌های اضافی و شاید دیگری نیز برای سنتز مخصوص و غیر مخصوص حفاظت‌گرهای تنش در سلول‌های گیاهی وجود دارند که به وسیله خواص کاتالیکی ماتریکس پلی سیلیسیک اسید فراهم می‌شوند (Matichenkov, 2008). از نظر اهمیت سیلیس در تغذیه گیاهی، سیلیس جز عناصر سودمند در زیست‌شناسی گیاهی طبقه‌بندی می‌شود که به طور حتم یکی از نیازهای مهم برای رشد عادی بسیاری از گیاهان می‌باشد و بایستی به عنوان عنصر بسیار کم ضروری (Quasi essential) نامیده شود. گزارش شده است سیلیس تکمیلی نقش محوری در افزایش محتوای کلروفیل، هدایت روزنه‌ای، مواد فتوسنتزی و استحکام گیاهان تحت شرایط تنش را بازی می‌کند (Anser et al., 2012).

هدف از اجرای این آزمایش بررسی تاثیر کاربرد سیلیسیم بر صفات مورفولوژیک و غلظت عناصر گیاه کلزا تحت تنش

متری عبور داده شدند و در ظروف درب‌دار ریخته و شماره زده شدند. اندازه‌گیری عناصر سدیم، پتاسیم و کلسیم در گیاه به روش هضم تر با سولفوریک اسید - سالیسیک اسید و آب اکسیژنه (Emami, 1996) و غلظت سیلیسیم نیز به روش مونو سیلیسیک اسید اندازه‌گیری شد (Elliot and Snyder, 1991). غلظت سدیم و پتاسیم با دستگاه فیلم‌فوتومتر مدل (Jenway-PFP7) و میزان کلسیم نیز با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری سیلیسیم با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر همانند قرائت نمونه‌های فسفر عمل شد، با این تفاوت که جذب نور در طول موج ۴۰۰ نانومتر قرائت گردید. تجزیه واریانس صفات با استفاده از نرم افزار SAS انجام گرفت و میانگین تیمارها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۱٪ با استفاده از نرم‌افزار MSTATC مورد مقایسه قرار گرفتند.

نتایج و بحث:

اثر متقابل تیمارهای سیلیکات پتاسیم و شوری بر صفات سطح برگ، وزن خشک برگ، وزن خشک بوته، نسبت سطح برگ و وزن مخصوص برگ معنی‌دار بودند. اثر شوری و سیلیس بر غلظت عناصر نمونه‌های برگ در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد.

سطح برگ: بالاترین مقدار سطح برگ در تیمار ۳ میلی مولار Si و شوری ۶/۵ dS/m مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها نشان داد و کمترین میزان سطح برگ نیز در تیمار بدون کاربرد Si و شوری ۱۰/۷ dS/m مشاهده شد و اختلاف معنی‌داری را با تیمار بدون کاربرد Si و شوری ۸dS/m نشان نداد (جدول ۱). در شرایط بدون کاربرد سیلیکات پتاسیم طیف پیوسته‌ای از کاهش سطح برگ در گیاهان دیده شد. در حالیکه در تمامی تیمارهایی که سیلیسیم در آنها به کار رفته بود در شوری ۶/۵ دسی زیمن برمتر افزایش در سطح برگ دیده شد و در فراتر از این مقدار کاهش در سطح برگ مشاهده گردید. زمانی که گیاهی در معرض شوری قرار می‌گیرد، در ثانیه‌ها یا دقیق اولیه، سلول‌ها آب خود را از دست

داده و چروکیده می‌شوند. در طی ساعات، سلول‌ها حجم واقعی خود را باز می‌یابند، اما سرعت رشد (بزرگ شدن) سلول کاهش می‌یابد. این امر منجر به کاهش سرعت رشد برگ و ریشه می‌شود. در طی روزها، تغییرات در رشد سلول و تقسیم سلولی منجر به ظهور کندتر برگ و سرانجام اندازه کوچکتر سلول می‌شود. معمولاً رشد برگ بیشتر از رشد ریشه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در گیاهان با مقادیر بالای جذب نمک، پیرترین برگ ممکن است شروع به نشان دادن علائم آسیب می‌نماید. پس از گذشت هفته‌ها، ممانعت از رشد ساقه‌های جانبی مشهود شده و در گیاهان با مقادیر بالای جذب نمک، ممکن است تعدادی از برگ‌ها بمیرند (Munns, 2002). تحقیقات نشان می‌دهد در اثر تنش شوری ارتفاع گیاه و سطح برگ بسیار سریع‌تر از سایر پارامترهای مورفولوژیک و فنولوژیک کاهش می‌یابد. زیرا تجمع ماده خشک حاصل میزان فتوسنتز خالص و سطح فتوسنتزکننده گیاهی می‌باشد (Munns, 2002). پاسخ فوری به تنش شوری در کاهش میزان سطح برگ است که منجر به توقف گسترش برگ با افزایش غلظت شوری می‌گردد (Geccoli et al., 2015). همچنین، تنش شوری منجر به کاهش وزن خشک و تر برگ‌ها، ساقه و ریشه در گیاه نخود فرنگی گردید (Hernandez et al., 2001). کاهش در میزان فتوسنتز به ویژه از طریق کاهش سطح برگ، میزان کلروفیل، هدایت روزنه‌ای و تا حدودی کاهش در کارایی فتوسیستم II تحت تاثیر قرار گرفت (Netondo et al., 2004). Hossein و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند کاربرد سیلیکون در برنج، گندم و یولاف موجب افزایش ابعاد برگ از برگ دوم و یا سوم گردید، ولی روی ابعاد کلپتیل و برگ اول اثر معنی‌داری را نداشت. سلول‌های اپیدرمی افزایش اندازه طولی را به ویژه در قسمت پایه‌ای برگ نشان دادند. افزایش مشاهده شده در ابعاد برگ بر اثر افزایش تعداد سلول نبود بلکه بر اثر افزایش ابعاد سلول انجام گردید؛ که بیانگر اثر سلیکون روی طول شدن سلول است و نه تقسیم سلولی. آنها همچنین اعلام کردند قابلیت گسترش (extensibility) دیواره سلولی به طور معنی‌داری در ناحیه پایه‌ای برگ سوم برنج افزایش یافته بود که نشان‌دهنده اثر تحریک کنندگی سلیکون در رشد برنج می‌باشد.

جدول ۱- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل مؤلفه‌های مورد بررسی در سطوح مختلف شوری و سیلیکون

Si	NaCl	سطح برگ	وزن خشک برگ	وزن خشک بوته	نسبت سطح برگ	وزن مخصوص برگ
	۰	۱۹۵۳/۸ ^c	۳/۱۸۷ ^{c,e}	۵/۴۵۲ ^{b,d}	۳۶۰/۳۸ ^{ab}	۰/۰۰۱۶ ^{bc}
	۶/۵	۱۷۶۷/۵ ^c	۲/۹۹۶ ^{c,f}	۴/۶۰۱ ^d	۳۸۴۷/۱۷ ^{ab}	۰/۰۰۱۶ ^{bc}
	۸	۸۳۴/۷ ^d	۲/۲۴۲ ^{fg}	۳/۲۵۷ ^e	۲۵۷/۳۱ ^{cd}	۰۰/۰۰۲ ^a
	۱۰/۷	۷۳۱/۳ ^d	۲/۱۵ ^g	۳/۲۳۹ ^e	۲۵۱/۸۵ ^d	۰/۰۰۲۷ ^a
۱	۰	۱۸۶۸/۷ ^c	۳/۲۱۳ ^{c,e}	۵/۳۵۳ ^{b,d}	۳۴۹/۵۷ ^{ab}	۰/۰۰۱۷ ^c
	۶/۵	۲۴۷۸/۶ ^b	۴/۴۶۸ ^b	۷/۰۷۵ ^a	۳۵۲/۸۴ ^{ab}	۰/۰۰۱۸ ^{bc}
	۸	۱۸۴۷/۹ ^c	۳/۷۶۲ ^{bc}	۵/۸۶۷ ^{bc}	۳۱۶/۳۴ ^{bc}	۰/۰۰۲ ^b
	۱۰/۷	۱۸۷۱/۳ ^c	۲/۸۰۷ ^{d,g}	۵/۴۲۸ ^{b,d}	۳۳۴/۷۳ ^b	۰/۰۰۱۵ ^c
۲	۰	۱۷۸۲/۴ ^c	۳/۲۱۲ ^{c,e}	۴/۷۷۴ ^{cd}	۳۷۷/۰۷ ^{ab}	۰/۰۰۱۸ ^{bc}
	۶/۵	۱۸۰۳/۱ ^c	۲/۷۷۲۳ ^{e,g}	۴/۸۸۶ ^{b,d}	۳۷۰/۱۴ ^{ab}	۰/۰۰۱۴ ^c
	۸	۱۷۷۷/۵ ^c	۳/۶۰۹ ^{cd}	۵/۶۰۲ ^{b,d}	۳۱۷/۶۱ ^{bc}	۰/۰۰۲ ^b
	۱۰/۷	۱۹۱۷/۳ ^c	۲/۹۷۶ ^{cf}	۵/۹۸۱ ^b	۳۲۰/۵۱ ^{bc}	۰/۰۰۱۵ ^c
۳	۰	۱۸۸۵/۸ ^c	۳/۱۱۵ ^{c,e}	۵/۵۴۱ ^{bd}	۳۴۰/۰۸ ^{ab}	۰/۰۰۱۸ ^{bc}
	۶/۵	۲۹۵۸/۴ ^a	۵/۲۲۷ ^a	۷/۲۵۸ ^a	۴۰۷/۷۶ ^a	۰/۰۰۱۷ ^{bc}
	۸	۱۷۸۸ ^c	۳/۳۹۳ ^{c,e}	۵/۴۱ ^{b,d}	۳۲۹/۹۷ ^b	۰/۰۰۱۹ ^{bc}
	۱۰/۷	۱۷۵۵/۴ ^c	۳/۱۲۳ ^{c,e}	۵/۲۶۵ ^{b,d}	۳۳۴/۵۹ ^b	۰/۰۰۱۷ ^{bc}

میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک باشند طبق آزمون دانکن در سطح ۱ درصد با یکدیگر اختلاف معنی‌داری ندارند.

در گزارش مشابهی، کاربرد سیلیکون در گیاهان گوجه فرنگی موجب کاهش خسارت ناشی از تنش شوری گردید. در گیاهان تحت تنش شوری و بدون کاربرد سیلیکون سطح برگ نسبت به تیمار شاهد ۵۸ درصد کاهش نشان داد. در مقابل، اضافه کردن سیلیکون موجب گردید تا میزان کاهش سطح برگ به ۲۲ درصد محدود شود. این اثر مرتبط با بهبود پتانسیل تورمی و وضعیت آب در گیاه بود (Romero-Aranda *et al.*, 2006).

وزن خشک برگ و بوته: بالاترین وزن خشک بوته در تیمار با کاربرد ۳ میلی مولار Si و شوری ۶/۵ dS/m مشاهده گردید که اختلاف معنی‌داری را با تیمار ۱ میلی مولار Si و شوری ۶/۵ dS/m نشان نداد و کمترین وزن خشک بوته نیز در تیمار بدون کاربرد Si و شوری ۱۰/۷ dS/m مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری را با تیمار بدون کاربرد Si و شوری ۸ dS/m نشان نداد (جدول ۱). نظیر حالت مشاهده شده برای

سطح برگ، وزن خشک برگ و بوته نیز در شرایط بدون کاربرد سیلیکون روند کاهشی پیوسته‌ای را نشان دادند. ولی اضافه کردن سیلیکون به محیط رشد گیاه موجب شد تا از یک سو میزان خسارت نمک در گیاه کاهش پیدا کند و میزان ماده خشک تولید شده در مقایسه با تیمارهای معادل نمک ولی بدون کاربرد سیلیکون افزایش یابد معنی‌داری رانشان دهد و از سوی دیگر در سطح شوری ۶ دسی زیمن بر متر، تمامی تیمارهای کاربرد سیلیکون افزایشی در مقدار ماده خشک تجمع یافته در برگ و بوته به وجود آوردند. احتمال دارد در سطوح پایین و غلظت‌های رقیق نمک اثرات بهبود دهنده‌ای بین سیلیسیم و سدیم در رشد گیاه وجود داشته باشد. رشد گیاه به طور معمول نتیجه تمام فرآیندهای متابولیکی است که خود را با افزایش توده خشک، حجم، طول یا سطح سلول‌ها نشان می‌دهد (Amal *et al.*, 2010). کاهش رشد

جدول ۱- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل مؤلفه‌های مورد بررسی در سطوح مختلف شوری و سیلیکون

وزن مخصوص برگ	نسبت سطح برگ	وزن خشک بوته	وزن خشک برگ	سطح برگ	NaCl	Si
۰/۰۰۱۶ ^{bc}	۳۶۰/۳۸ ^{ab}	۵/۴۵۲ ^{b,d}	۳/۱۸۷ ^{c,e}	۱۹۵۳/۸ ^c	۰	
۰/۰۰۱۶ ^{bc}	۳۸۴۷/۱۷ ^{ab}	۴/۶۰۱ ^d	۲/۹۹۶ ^{c,f}	۱۷۶۶/۵ ^c	۶/۵	
۰۰/۰۰۲ ^a	۲۵۷/۳۱ ^{cd}	۳/۲۵۷ ^e	۲/۲۴۲ ^{fg}	۸۳۴/۷ ^d	۸	
۰/۰۰۲۷ ^a	۲۵۱/۸۵ ^d	۳/۲۳۹ ^e	۲/۱۵ ^g	۷۳۱/۳ ^d	۱۰/۷	
۰/۰۰۱۷ ^c	۳۴۹/۵۷ ^{ab}	۵/۳۵۳ ^{b,d}	۳/۲۱۳ ^{c,e}	۱۸۶۸/۷ ^c	۰	
۰/۰۰۱۸ ^{bc}	۳۵۲/۸۴ ^{ab}	۷/۰۷۵ ^a	۴/۴۶۸ ^b	۲۴۷۸/۶ ^b	۶/۵	
۰/۰۰۲ ^b	۳۱۶/۳۴ ^{bc}	۵/۸۶۷ ^{bc}	۳/۷۶۲ ^{bc}	۱۸۴۷/۹ ^c	۸	۱
۰/۰۰۱۵ ^c	۳۳۴/۷۳ ^b	۵/۴۲۸ ^{b,d}	۲/۸۰۷ ^{d,g}	۱۸۷۱/۳ ^c	۱۰/۷	
۰/۰۰۱۸ ^{bc}	۳۷۶/۰۷ ^{ab}	۴/۷۷۴ ^{cd}	۳/۲۱۲ ^{c,e}	۱۷۸۲/۴ ^c	۰	
۰/۰۰۱۴ ^c	۳۷۰/۱۴ ^{ab}	۴/۸۸۶ ^{b,d}	۲/۷۷۲۳ ^{e,g}	۱۸۰۳/۱ ^c	۶/۵	
۰/۰۰۲ ^b	۳۱۷/۶۱ ^{bc}	۵/۶۰۲ ^{b,d}	۳/۶۰۹ ^{cd}	۱۷۷۷/۵ ^c	۸	۲
۰/۰۰۱۵ ^c	۳۲۰/۵۱ ^{bc}	۵/۹۸۱ ^b	۲/۹۷۶ ^{cf}	۱۹۱۷/۳ ^c	۱۰/۷	
۰/۰۰۱۸ ^{bc}	۳۴۰/۰۸ ^{ab}	۵/۵۴۱ ^{bd}	۳/۱۱۵ ^{c,e}	۱۸۸۵/۸ ^c	۰	
۰/۰۰۱۷ ^{bc}	۴۰۷/۷۶ ^a	۷/۲۵۸ ^a	۵/۲۲۷ ^a	۲۹۵۸/۴ ^a	۶/۵	
۰/۰۰۱۹ ^{bc}	۳۲۹/۹۷ ^b	۵/۴۱ ^{b,d}	۳/۳۹۳ ^{c,e}	۱۷۸۸ ^c	۸	۳
۰/۰۰۱۷ ^{bc}	۳۳۴/۵۹ ^b	۵/۲۶۵ ^{b,d}	۳/۱۲۳ ^{c,e}	۱۷۵۵/۴ ^c	۱۰/۷	

میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک باشند طبق آزمون دانکن در سطح ۱ درصد با یکدیگر اختلاف معنی‌داری ندارند.

رویشی و وزن خشک به دلیل کاهش آماس سلول‌ها است که متاثر از فرآیندهای اسمزی می‌باشد. در بررسی وزن خشک و طول گیاهچه‌های جو در شرایط شور، اظهار شده است که برای نشان دادن حساسیت به شوری وزن خشک معیار مناسب‌تری نسبت به طول گیاهچه می‌باشد (Ekiz and Yilmaz, 2003). Kerepesi و Galiba (۲۰۰۰) در گندم گزارش کردند کاهش سطوح فتوسنتز کننده و مصرف بیش از حد انرژی جهت کنترل و کاهش اثر تنش شوری ناشی از افزایش غلظت NaCl برای برقراری تعادل یونی و اسمزی و جلوگیری از سمیت یون‌ها و نیز حفظ آماس سلولی می‌تواند از علل عمده کاهش عملکرد ماده خشک باشد. شوری با کاهش جذب آب و توسعه ریشه‌ها باعث کاهش تجمع ماده خشک گردید. گزارش شده است شوری موجب کاهش پارامترهای رشد (وزن خشک ساقه و ریشه) در گیاه جو (Tayeb, 2005)، و گندم (Kaydan, 2007)

شد. Kaori و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند با کاربرد سیلیکون در محیط ریشه سورگوم، میزان کاهش وزن خشک ریشه تحت تنش شوری کاهش پیدا کرد که همراه با افزایش جذب آب بود. کاربرد سیلیکون پتانسیل اسمزی ریشه را بدون اثر بر محتوای آب کاهش داد، که نشان می‌دهد تنظیم اسمزی با افزایش جذب آب رخ داده است. Moussa (۲۰۰۶) نشان داد که افزودن سیلیسیم تجمع ماده خشک را در همه بخش‌های گیاه ذرت تحت تنش شوری افزایش داد. کاربرد NaCl در محلول غذایی منجر به کاهش قابل ملاحظه‌ای در تجمع ماده خشک شد. سیلیسیم افزوده شده در تجمع ماده خشک در شرایط بدون تنش شوری موثر نبود و مشخص شد که سیلیسیم در محلول غذایی، بازدارندگی رشدی که توسط NaCl ایجاد می‌شود را کاهش می‌دهد. نتایج آزمایش حاضر نیز همخوانی با نتایج آزمایش ذکر شده را دارد که در آزمایش حاضر نیز در

شرایط بدون اعمال شوری کاربرد سیلیکون اثری را در افزایش ماده خشک برگ یا بوته نداشت.

نسبت سطح برگ: بالاترین نسبت سطح برگ در تیمار با کاربرد ۳ میلی مولار Si و شوری ۶/۵ dS/m مشاهده گردید که اختلاف معنی داری را با تیمارهای بدون کاربرد Si در شوری های ۲/۳ و ۶/۵، تیمارهای با کاربرد ۱ میلی مولار Si در تمام سطوح شوری و تیمارهای با کاربرد ۲ میلی مولار در شوری های ۲/۳ و ۶/۵ و تیمارهای با کاربرد ۳ میلی مولار Si بدون شوری نشان نداد. کمترین نسبت سطح برگ نیز در تیمار بدون کاربرد Si و شوری ۱۰/۷ dS/m مشاهده شد که اختلاف معنی داری را با تیمار بدون کاربرد Si و شوری ۸ dS/m نشان نداد (جدول ۱).

نسبت سطح برگ (LAR)، بیان کننده نسبت بین سطح پهنک برگ یا بافت های فتوسنتز کننده به کل بافت های تنفس کننده یا وزن گیاه است. همچنین، LAR نشان دهنده پربریگی گیاه است (Hunt, 1982). اظهار شده است تنش های محیطی نظیر تنش رطوبتی از طریق تسریع پیری و ریزش برگ ها اثر خود را روی کاهش سطح برگ می گذارد که به این ترتیب نسبت سطح برگ را متأثر می کند (Silim et al., 1993). در گیاهان پنبه رشد کرده تحت شرایط آبیاری منظم و تنش مقدار LAR کاهش معنی داری را بر اثر اعمال تنش مشاهده گردید (Oliveira, Noreen et al., 2013) و همکاران (۲۰۱۱) نیز گزارش کردند در گیاهان ۷۰ روزه بادمجان که با آب با شوری های متفاوت آبیاری شده بودند، ارتفاع قطر ساقه، تعداد برگ، وزن خشک برگ، سطح ویژه برگ و نسبت سطح برگ تحت تاثیر شوری قرار گرفتند. ولی بیشترین تاثیر روی تعداد و سطح برگ بود.

وزن مخصوص برگ: در مرحله قبل از گلدهی بالاترین وزن مخصوص برگ در تیمار بدون کاربرد Si و شوری ۱۰/۷ dS/m مشاهده شد که اختلاف معنی داری را با تیمار بدون کاربرد Si و شوری ۸ dS/m نشان نداد و کمترین وزن مخصوص برگ نیز در تیمار با کاربرد ۱ میلی مولار Si و شوری ۱۰/۷ dS/m مشاهده گردید که اختلاف معنی داری را با تیمارهای ۱ میلی مولار Si در غلظت های شوری ۶/۵

و ۲/۳، تیمارهای بدون کاربرد Si و غلظت های شوری ۶/۵ و ۲/۳، تیمارهای با کاربرد ۲ میلی مولار Si و غلظت های شوری ۸ و ۶/۵، ۲/۳ نشان نداد (جدول ۱). از دلایل افزایش وزن مخصوص برگ با افزایش سطوح شوری، افزایش تجمع یون سدیم در برگ ها می باشد. هر چه وزن مخصوص برگ بیشتر باشد می تواند نشان دهنده این باشد که از مقدار مواد آلی برگ کم شده و مواد معدنی جایگزین آنها شده است. همچنین، افزایش SLW بیانگر این مطلب است که تعداد لایه های مزوفیلی برگ افزایش پیدا کرده که باعث افزایش ضخامت برگ نیز خواهد شد (Hunt, 1982). افزایش میزان SLW در برگ های کلزا تحت تنش کمبود آب در مقایسه با گیاهان شاهد گزارش شده است (میارصادقی و همکاران، ۱۳۸۹). در چغندر علوفه ای سطح ویژه برگ (SLA) با افزایش شوری با ۴۷ درصد و در چغندر قند ۳۶ درصد کاهش یافت. (Niazi, 2007). در گیاهان هالوفیت افزایش وزن مخصوص برگ بر اثر تنش شوری به دلیل کاهش سطح برگ و افزایش ضخامت برگ گزارش شده است (Flowers et al., 1977). کاربرد Si می تواند سطح برگ، تعداد برگ و تا اندازه ای ضخامت برگ و سطح ویژه برگ و محتوای آب هر برگ را بهبود بخشد که احتمالاً به سبب تجمع کمتر یون های سمی در برگ ها و دیگر عوامل شناخته نشده باشد. همچنین، تخفیف اثرات شوری روی تغییرات آناتومیکی نظیر افزایش ضخامت برگ و سطح مخصوص برگ به دنبال کاربرد Si ممکن است مربوط به کاهش تجمع یون های سمی باشد (Farshidi et al., 2012). احمد و همکاران (Ahmad et al., 2011) در سورگوم های تحت تنش گزارش کردند کاربرد Si منجر به افزایش سطح برگ، شاخص سطح برگ و وزن ویژه برگ گردید. به نظر آنها افزایش SLW و LAI می تواند منجر به افزایش میزان جذب نور و بهبود تولید ماده خشک در گیاه گردد. در آزمایش حاضر با افزایش شوری اندازه و سطح برگ کاهش پیدا کرد ولی در مقابل وزن آن در تعدادی از تیمارهای کاربرد سیلیکون افزایش یافت. از آنجا که سطح برگ صورت کسر LAR و وزن برگ صورت کسر SLW را تشکیل می دهند، کاهش

نسبت برگ با افزایش شوری و افزایش وزن ویژه برگ قابل انتظار است. کاهش وزن خشک گیاه در شرایط تنش شوری، به علت کاهش سطح برگ می‌باشد. زیرا کاهش سطح برگ، میزان دریافت نور را کاهش داده و در نتیجه میزان فتوسنتز و تجمع ماده خشک کاهش می‌یابد (Orcutt and Nilsen, 2000).

غلظت سدیم: در تیمار بدون کاربرد Si و سطح شوری $10/7 \text{ dS/m}$ بیشترین مقدار سدیم جذب شده به پیکره گیاهی مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری را با سایر تیمارها نشان داد. کمترین مقدار محتوای سدیم نیز در تیمار با کاربرد 3 میلی مولار Si و بدون اعمال شوری مشاهده شد و با تیمار شاهد، تیمار با کاربرد 1 میلی مولار Si و بدون شوری، تیمار با کاربرد 2 میلی مولار Si و بدون کاربرد نمک اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۲). به طور کلی افزایش سطح نمک بکار رفته موجب افزایش میزان سدیم موجود در بافت‌های گیاهی گردید. در مقابل، افزودن سیلیس به محیط ریشه در تمام سطوح شوری منجر به کاهش سدیم جذب شده در بافت‌های گیاهی گردید. انتقال سدیم یک فرآیند انرژی خواه است که ورود آن به واکوئل توسط آنتی‌پورت Na^+/H^+ تونوپلاستی و خروج آن از سیتوپلاسم به آپوپلاست توسط آنتی‌پورت Na^+/H^+ غشای پلاسمایی صورت می‌گیرد (Leidi et al., 1991). $\text{H}^+ \text{-PPase}$ و $\text{H}^+ \text{-ATPase}$ در تونوپلاست و $\text{H}^+ \text{-ATPase}$ در غشای پلاسمایی نیروی لازم برای آنتی‌پورت Na^+/H^+ را فراهم می‌کنند (Marschner, 1995). پیشنهاد شده که سیلیسیم باعث افزایش فعالیت $\text{H}^+ \text{-ATPase}$ و $\text{H}^+ \text{-PPase}$ تونوپلاست و $\text{H}^+ \text{-ATPase}$ غشاء پلاسمایی در ریشه جو در معرض تنش شوری می‌شود و این افزایش فعالیت $\text{H}^+ \text{-ATPase}$ و $\text{H}^+ \text{-PPase}$ به آنتی پورت Na^+/H^+ کمک کرده که باعث خروج Na^+ به آپوپلاست و همچنین تحویل Na^+ به واکوئل ریشه شده و در نتیجه انتقال سدیم از ریشه به ساقه کاهش می‌یابد (Lazof and Bernstein, 1999) اما مکانیسمی که باعث چنین فرآیندهایی می‌شود هنوز واضح نیست.

غلظت پتاسیم: در تیمار با کاربرد 3 میلی مولار Si و سطح شوری $6/5 \text{ dS/m}$ بیشترین مقدار پتاسیم جذب شده دیده شد

و با تیمار شاهد، تیمار 1 میلی مولار Si و بدون شوری و تیمارهای با کاربرد 3 میلی مولار Si و سطوح شوری $2/3$ ، 8 و $10/7 \text{ dS/m}$ اختلاف معنی‌داری را نشان نداد. کمترین میزان پتاسیم در تیمار بدون کاربرد Si و سطح شوری $10/7 \text{ dS/m}$ دیده شد و با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری را نشان داد (جدول ۲). پتاسیم مهمترین عنصر در محلول‌های غیر آلی گیاه است و نقش مهمی در کاهش پتانسیل اسمزی در مغز ریشه دارد که لازمه فشار تورگر برای سلول، انتقال شیره خام در آوند چوبی و متعادل ساختن آب گیاه است (Liang et al., 2005). در شرایط شوری سدیمی نه تنها مقادیر زیاد سدیم در جذب پتاسیم به وسیله ریشه مزاحمت ایجاد می‌کند بلکه به غشاء سلولی نیز آسیب زده و عمل انتخابی آن برای جذب پتاسیم بیشتر نسبت به سدیم که لازمه فرایندهای متابولیکی مانند انتقال و تعدیل اسمزی است را تغییر می‌دهد (Flowers and Dalmond, 1992). مطالعات نشان می‌دهد که افزایش سدیم در محیط ریشه یا افزایش نسبت سدیم به کلسیم باعث کاهش جذب پتاسیم به وسیله ریشه می‌شود (Flowers and Dalmond, 1992). Ekiz و Yilmaz (۲۰۰۳) گزارش کردند در گیاهچه‌های ژنوتیپ‌های مختلف جو با افزایش غلظت نمک در محیط جذب پتاسیم کاهش، ولی جذب سدیم افزایش یافت که می‌تواند به دلیل افزایش جذب سدیم نسبت به پتاسیم باشد. همچنین اظهار شده است با افزایش شوری جذب سدیم افزایش و جذب پتاسیم و کلسیم کاهش می‌یابد (Ma and Takahashi, 1993). تجمع سدیم و پتاسیم در بافت‌های گیاهی ارتباط آنتاگونیستی دارند، به عبارت دیگر ارتباط منفی بین آنها وجود دارد چنانکه افزایش میزان سدیم باعث کاهش میزان پتاسیم می‌شود (Epstein, 1999). جذب و انتقال پتاسیم یک انتقال فعال در غشا ATP-driven H^+ است که در ارتباط با پمپ پلاسمایی می‌باشد (Matoh et al., 1986). بر اساس گزارش Liang (۱۹۹۹) در اثر کاربرد سیلیسیم احتمالاً افزایش فعالیت پمپ $\text{H}^+ \text{-ATPase}$ باعث افزایش جذب پتاسیم می‌شود. در آزمایش حاضر، افزایش میزان سیلیسیم همسو با افزایش محتوای پتاسیم در گیاه بود. نتایج این تحقیق مطابق با

جدول ۲- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل مؤلفه‌های مورد بررسی در سطوح مختلف شوری و سیلیکون.

غلظت سیلیسیوم	نسبت کلسیم به سدیم	غلظت کلسیم	نسبت پتاسیم به سدیم	غلظت پتاسیم	غلظت سدیم	NaCl	Si
۰/۸۲۶ ^d	۱۵۳/۳ ^{b,d}	۲۷/۰۴۵ ^{de}	۱۴/۷۵۸ ^c	۳/۶۰۲ ^{ab}	۰/۱۷۶ ^{fg}	.	
۰/۸۶۰ ^d	۱۱۵/۵۷ ^{cd}	۲۷/۴۳۶ ^{de}	۱۴/۴۶۳ ^{cd}	۲/۴۵۲ ^d	۰/۲۴۱ ^{ef}	۶/۵	
۰/۸۲۶ ^d	۲۵/۰۶ ^{ef}	۱۵/۴۹۶ ^f	۴/۰۱۳ ^{de}	۲/۴۸۱ ^d	۰/۶۱۸ ^b	۸	
۰/۶۵۷ ^d	۱۷ ^f	۱۳/۶۰۴ ^f	۲/۲۰۹ ^e	۱/۶۸۷ ^e	۰/۷۶۴ ^a	۱۰/۷	
۱/۲۸۴ ^c	۱۹۵ ^b	۳۰/۱۰۱ ^{c,e}	۲۳/۶۰۶ ^{ab}	۳/۶۸۰ ^a	۰/۱۵۹ ^g	.	
۱/۸۱۲ ^{ab}	۱۲۷/۷ ^{b,d}	۲۹/۶۶۱ ^{c,e}	۱۲/۰۵۵ ^c	۲/۷۸ ^d	۰/۲۴ ^{ef}	۶/۵	۱
۱/۸۱۶ ^{ab}	۱۰۵/۱ ^{cd}	۳۴/۵۴۳ ^{bc}	۸/۰۸۳ ^{cd}	۲/۶۱۶ ^d	۰/۳۳۳ ^{cd}	۸	
۱/۷۵۹ ^{ab}	۹۸/۸ ^{de}	۲۵/۴۹۲ ^e	۱۰/۱۱۳ ^c	۲/۶۴۵ ^d	۰/۲۶ ^{de}	۱۰/۷	
۱/۷۶۲ ^{ab}	۲۷۱/۲ ^a	۳۵/۹۹ ^{bc}	۱۹/۷۰۸ ^b	۲/۵۸۸ ^d	۰/۱۳۹ ^g	.	
۱/۸۸۲ ^a	۸۳/۳ ^{d,f}	۲۶/۰۴۹ ^e	۸/۵۳۴ ^{c,e}	۲/۶۸۷ ^d	۰/۳۱۷ ^{cd}	۶/۵	۲
۱/۷۵۲ ^{ab}	۱۱۶/۱ ^{cd}	۳۷/۲۶۴ ^b	۹/۰۵ ^{cd}	۲/۹۰۷ ^{b,d}	۰/۳۲ ^{cd}	۸	
۱/۸۸۹ ^a	۱۸۳/۳ ^{bc}	۴۳/۷۶۳ ^a	۱۱/۹۶۷ ^c	۲/۸۲۹ ^{cd}	۰/۲۳۹ ^{ef}	۱۰/۷	
۱/۹۰۳ ^a	۲۸۹/۴ ^a	۳۷/۶۰۴ ^{ab}	۲۷/۳۴۶ ^a	۳/۵۵۲ ^{a,c}	۰/۱۳۲ ^g	.	
۱/۷۰۸ ^{ab}	۱۲۳/۴ ^{b,d}	۳۴/۷۱۲ ^{bc}	۱۳/۲۷۴ ^c	۳/۷۴۳ ^a	۰/۲۸۱ ^{de}	۶/۵	۳
۱/۴۸۵ ^{bc}	۸۵/۶ ^{d,f}	۳۱/۳۷۶ ^{be}	۹/۵۴۸ ^{cd}	۳/۵۱۶ ^{a,c}	۰/۳۸۶ ^c	۸	
۱/۶۲ ^{a,c}	۹۰/۵ ^{d,f}	۳۳/۷۶۶ ^{b,d}	۹/۷۷ ^{cd}	۳/۶۵۱ ^a	۰/۳۷۳ ^c	۱۰/۷	

میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک باشند طبق آزمون دانکن در سطح ۱ درصد با یکدیگر اختلاف معنی‌داری ندارند.

یافته‌های Liang و همکاران (۱۹۹۹) است.

نسبت یون‌های پتاسیم به سدیم: بالاترین نسبت پتاسیم به سدیم در تیمار با کاربرد ۳ میلی مولار Si و بدون شوری مشاهده گردید و با تیمار بدون کاربرد شوری و با کاربرد ۱ میلی مولار Si اختلاف معنی‌داری نشان نداد. کمترین نسبت پتاسیم به سدیم در تیمار بدون کاربرد Si و سطح شوری dS/m ۱۰/۷ مشاهده شد و با تیمارهای بدون کاربرد Si در سطوح شوری dS/m ۸ و ۶/۵ نشان نداد (جدول ۲). تحت تنش شوری، رقابت یون سدیم با پتاسیم در سیتوپلاسم برای اتصال به نقاط پیوندی پتاسیم، باعث افزایش غلظت یون سدیم در داخل گیاه می‌شود و این نیز به نوبه خود باعث کاهش نسبت K/Na در سلول می‌شود (Maathius and Amtmaan, 1999) برخی محققین هم در گیاهانی نظیر لوبیا (Bayulo-Jimenez et al., 2003)، رازیانه شیرین (Ashraf and Akhtar, 2004)، و کلزا (Rameeh and et al.,

(2004) کاهش نسبت K/Na را در اثر شوری مشاهده کردند. نگهداری پایین یون سدیم در اندام‌های هوایی منجر به افزایش پتاسیم می‌شود. در واقع احتمال دارد نسبت K/Na در بسیاری از گونه‌ها در پایین نگهداشتن غلظت یون سدیم اهمیت زیادی داشته باشد (Tester and Davenport, 2003).

غلظت کلسیم: بیشترین مقدار عنصر کلسیم در تیمار با کاربرد ۲ میلی‌مولار Si و سطح شوری dS/m ۱۰/۷ مشاهده شد و اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها نشان داد. کمترین مقدار عنصر کلسیم در تیمار بدون کاربرد Si و سطح شوری dS/m ۱۰/۷ مشاهده شد و با تیمار بدون کاربرد Si و سطح شوری dS/m ۸ اختلاف معنی‌داری را نشان نداد (جدول ۲). گزارشاتی وجود دارد مبنی بر این که کلسیم اثرات سوء ناشی از تنش نمک را کاهش یا خنثی می‌کند. کلسیم ممکن است از طریق رقابت با سدیم و کاهش جذب آن و یا افزایش جذب پتاسیم باعث کاهش صدمات ناشی از تنش شوری گردد

(Ashraf et al., 1989). در تحقیق حاضر کاهش غلظت کلسیم در تنش شوری بدون کاربرد Si مشاهده شد که می‌تواند برآوردی از میزان تحمل به شوری در گیاه باشد. طبق گزارش El-Hendawy و همکاران (۲۰۰۵) کاهش در جذب پتاسیم و کلسیم می‌تواند با تحمل نمک در گیاه مرتبط باشد. کاهش میزان کلسیم بر اثر اعمال شوری در کاهو گزارش شده است (Grattan and Grieve, 1999). افزایش جذب کلسیم در نتیجه استفاده از سیلیسیم در محلول غذایی بوسیله Liang (۱۹۹۶)، همچنین کاهش غلظت کلسیم تحت شرایط افزایش سیلیسیم نیز توسط Ma و Takahashi (۱۹۹۳) و عدم تاثیر سیلیسیم توسط Stamatakis و همکاران (۲۰۰۳) گزارش شده است. Ma و Takahashi (۱۹۹۳) در توجیه یافته خود بیان کردند که علت کاهش محتوای کلسیم در ارتباط با کاهش میزان تعرق بوسیله سیلیسیم است که همسو با گزارشات Ahmad و همکاران (۱۹۹۲) و Okuda و Takahashi (۱۹۶۵) می‌باشد. اما نتایج آزمایش Yeo و همکاران (۱۹۹۹) نشان داد سیلیسیم هدایت روزنه‌ای گیاهان برنج تحت تنش را بهبود بخشید. این گزارش در تضاد با دلیل بیان شده به وسیله Ahmad و همکاران (۱۹۹۲) و Okuda و Takahashi (۱۹۶۵) است. مکانیسم فیزیولوژیکی اثر سیلیسیم روی جذب و انتقال کلسیم بوسیله گیاه واضح نیست. تفاوت در مدل‌های دیواره سلولزی در نتیجه ته‌نشست سیلیسیم ممکن است عدم پراکنش محل‌های آنیونی که کلسیم را جذب می‌کنند، افزایش دهد. در نتیجه به نظر می‌رسد که باید محتوای کلسیم در بافت گیاهی افزایش یابد (Ghoulam et al., 2002). در مطالعه حاضر با کاربرد سیلیسیم محتوای کلسیم افزایش یافت.

نسبت یون‌های کلسیم به سدیم: در تیمار با کاربرد ۳ میلی مولار Si و بدون شوری بیشترین نسبت کلسیم به سدیم مشاهده گردید که با تیمار با کاربرد ۲ میلی مولار Si و بدون شوری اختلاف معنی‌داری دیده نشد. کمترین نسبت کلسیم به سدیم در تیمار بدون کاربرد Si و سطح شوری ۱۰/۷ dS/m بود که اختلاف معنی‌داری با تیمار بدون کاربرد Si و سطح شوری ۸ dS/m، تیمار با کاربرد ۲ میلی مولار Si و شوری ۸ dS/m

۶/۵ و تیمار با کاربرد ۳ میلی مولار Si و سطح شوری ۸ dS/m نشان نداد (جدول ۲). کلسیم نقش مهم و ضروری در حفظ ساختار و عمل غشاء سلولی و همچنین در استحکام دیواره سلولی، تنظیم انتخابی انتقال یون و کنترل تبادل یونی آنزیم‌های دیواره سلولی ایفا می‌کند (Murillo-Amador et al., 2006) معمولاً با افزایش غلظت سدیم، جذب کلسیم کاهش و سدیم افزایش می‌یابد (Murillo-Amador et al., 2006). با توجه به یافته‌های Plieth (۲۰۰۵) کلسیم از طریق بستن کانال‌های کاتیونی به طور غیر مستقیم بر جذب کلر نیز موثر است. بسیاری از واکنش‌های گیاه به شوری با برهم‌کنش سدیم و کلسیم در ارتباط است. فرایندهای گیاهی مانند رشد، فتوسنتز، تغذیه و انتقال یون‌ها و آب تحت تاثیر واکنش متقابل سدیم و کلسیم قرار دارد. بسیاری از این پاسخ‌ها در ارتباط مستقیم با برهم‌کنش سدیم با کلسیم در سطح غشای پلاسمایی و در نتیجه رویداد حاصل از سیگنال کلسیم می‌باشد (Cramer, 1997)

غلظت سیلیسیم: بالاترین درصد سیلیسیم در تیمار با کاربرد ۳ میلی مولار Si و بدون شوری مشاهده گردید که اختلاف معنی‌داری را با تیمارهای با کاربرد ۳ میلی مولار Si و سطوح شوری ۱۰/۷ dS/m و ۶/۵، تیمارهای با کاربرد ۲ میلی مولار Si در تمام سطوح شوری و تیمارهای با کاربرد ۱ میلی مولار Si و سطوح شوری ۱۰/۷ dS/m، ۸ و ۶/۵ نشان نداد. کمترین درصد سیلیسیم در تیمار بدون کاربرد Si و سطح شوری ۸ dS/m ۱۰/۷ دیده شد که با سایر تیمارهای بدون کاربرد Si در سطوح مختلف شوری اختلاف معنی‌داری را نشان نداد (جدول ۲). عمده محدودیت‌ها برای رشد و تولید گیاهان، یون‌های سمی هستند که با جذب بیش از حد آنها به خصوص Na^+ و Cl^- به وسیله مختل کردن جذب و توزیع عناصر ضروری باعث عدم تعادل تغذیه‌ای می‌شوند (Hu and Schmidhalter, 2005). گزارش شده است که تحت شرایط شوری به دلیل کاهش در جذب کلسیم، به دلیل افزایش نسبت سدیم به کلسیم، رشد ریشه کاهش پیدا می‌کند (Chinnusamy et al., 2005). کاربرد Si تحت تنش شوری، توانست غلظت K را در ریشه‌ها و P و Fe را در ریشه‌ها و ساقه‌ها افزایش دهد. علی‌رغم این که مسیر

استفاده می‌شود ممکن است کاهش یابد. همچنین پیشنهاد شده است که رسوب سیلیس در گیاهان مکان‌های اتصال به نمک را ایجاد کرده و در نتیجه انتقال آنها از ریشه‌ها به ساقه‌ها کاهش می‌یابد (Yeo et al., 1999).

نتیجه‌گیری کلی:

اعمال تنش شوری در گیاه کلزا موجب گردید تا صفات گیاهی نظیر انبساط و گسترش برگ به شدت تحت تاثیر قرار گیرد و تا حدود ۶۳ درصد در بالاترین سطح شوری و بدون تیمار کاربرد سیلیسیم نسبت به شاهد کاهش یابد. در مقابل کاربرد سیلیکات پتاسیم موجب کاهش و تخفیف خسارت شوری گردید و حتی در تیمار ۳ میلی مولار سیلیکات و ۶/۵ دسی زیمن بر متر شوری بیشترین گسترش برگ مشاهده شد.

آپوپلاستی در ریشه به دنبال تغذیه Na دچار اختلال شده بود، ولی با وجود این جذب مواد غذایی حتی با تنش شوری زیاد نیز افزایش یافت (Tuna et al., 2008; Ashraf et al., 2010). همان گونه که ذکر شد Si سیالیت مطلوب غشاء را حفظ کرده و فعالیت H^+ -ATPase در غشای پلاسما را تحت تنش شوری افزایش می‌دهد (Liang et al., 2006). تحمل به نمک با افزودن سیلیس در گیاهان مختلف از قبیل جو، ذرت، برنج، کلزا، اسفناج، خیار و گوجه گزارش شده است (Tuna et al., 2008; Hashemi et al., 2010) اعتقاد بر این است که سیلیکون در آگزودرم و اپیدرم رسوب می‌کند و از این راه جذب آپوپلاستی سدیم به وسیله ریشه‌ها کاهش می‌یابد (Gong et al., 2006). اگر مسیر آپوپلاستی به وسیله رسوب سیلیس محدود شود، جذب برخی عناصر که از این مسیر

منابع:

- امامی، ع. ۱۳۷۵. روش‌های تجزیه گیاهی. نشریه فنی. موسسه تحقیقات آب و خاک کشور. تهران ایران. شماره ۱۸۲. ص ۴۵.
- میارصادقی، س.، شکاری، ف.، فتوت، ر. و زنگانی، ا. ۱۳۸۹. تاثیر پیش تیمار با سالیسیلیک اسید بر بنیه و رشد گیاهچه کلزا در شرایط کمبود آب. مجله زیست‌شناسی گیاهی. ۲: ۵۵-۷۰.
- Ahmed, M., Hassen, F., Qadeer, U. and Aqeel Aslam, M. (2011) Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum. *African Journal of Agricultural Research* 6: 594-607.
- Ahmad, R. Zaheer, S.H. and Ismail, S. (1992) Role of silicon in salt tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Science* 85: 43-50.
- Amal, M. Matter, M. and Saker, M. (2010) Effect of salt stress on some defense mechanisms of transgenic and wild potato clones (*Solanum tuberosum* L.) grown *in vitro*. *Nature and Science* 8: 181-193.
- Anser, A. Shahzad, M. A. Basra, S. H. Javaid Iqbal, M. Ahmad Alias, A. Bukhsh and Sarwar, M. (2012) Salt stress alleviation in field crops through nutritional supplementation of silicon. *Pakistan Journal of Nutrition* 11: 637-655.
- Ashraf, M. and Akhtar, N. (2004) Influence of salt stress on growth, ion accumulation and seed oil content in sweet fennel. *Biologia Plantrum* 48: 461-464.
- Ashraf, M., Bokhari, M. H. and Mehmood, S. (1989) Effect of four different salts on germination and seedling growth of four Brassica species 35: 173-187.
- Ashraf, M. Rahmatullah, K.S. Afzal, M. Ahmed, R. Mujeeb F, Sarwar, A. and Ali, L. (2010) Alleviation of detrimental effects of NaCl by silicon nutrition in salt-sensitive and salt-tolerant genotypes of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Plant and Soil* 326:381-391.
- Bayulo-Jimenez, J. S. Debouk, D. G. and Plynch, J. (2003) Growth, gas exchange, water relations and ion composition of *Phaseolus vulgaris* L. under saline conditions. *Field Crop Research* 8: 207-222.
- Chinnusamy, V. Jagendorf, A. and Zhu, J.K. (2005) Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Science* 45: 437-448.
- Cramer, G. R. (1997) Uptake and role of ions in salt tolerance, in P. K. Strategies for Improving Salt Tolerance in Higher Plants, Oxford and IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi p: 55-86.
- Ekiz, H. and Yilmaz, A. (2003) Determination of the salt tolerance of some barley genotypes and the characteristics affecting tolerance. *Turkish Journal of Agriculture*. 27: 253-26.
- El-Hendawy, S. E. Hu, Y. and Schmidhalter, U. (2005) Growth, ion content, gas exchange, and water relation of wheat genotypes differing in salt tolerances. *Australian Journal of Agriculture Research* 56: 123-134.
- Elliot, C. L. and Synder, G. H. (1991) Autoclave induced digestion for the colorimetric determination of silicon. in rice

- straw. Journal of Agricultural Food Chemistry 39: 1118-1119.
- Epstein, E. (1999) Silicon. Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology 50: 641-664.
- Farshidi, M. Abdolzadeh, A. Sadeghipour, H.R. (2012) Silicon nutrition alleviates physiological disorders imposed by salinity in hydroponically grown canola (*Brassica napus* L.) plants Acta Physiologia Plantarum. 34:1779-1788.
- Flowers, T. J. and Dalmond, D. (1992) Protein synthesis in halophytes: the influence of potassium, sodium and magnesium in vitro. Plant and Soil 146: 153- 161.
- Flowers, T. J. Torke, P. F. and Yeo, A. R. (1977) The mechanism of salt tolerance in halophytes. Annual Review of Plant Physiology 28: 89-121.
- Gong, H. J., Randall, D. P. and Flowers, T. J. (2006) Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice seedlings by reducing bypass flow. Plant Cell and Environment 111: 1-9.
- Geccoli, G., Bustos, D., Ortega, L. I., Senn, M. E., Vegetti, A. V. and Taleisnik, E. (2015) Plasticity in sunflower leaf and cell growth under high salinity. Plant Biology 17: 41-51.
- Ghoulam, C. Foursy, A. and Fares, K. (2002) Effects of salt stress on growth, inorganic ions and praline accumulation in relation to osmotic adjustment in five sugar beet cultivars. Environmental and Experimental Botany 47: 39- 50
- Grattan, S. R. and Grieve, C. M. (1999) Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. Scientia Horticulture 78: 127- 157.
- Hashemi, A. Abdolzadeh, A. Sadeghipour, H. R. (2010) Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L., plants. Journal of Soil Science Plant Nutrition 56:244-253.
- Hernandez J. A. Ferrer, M. A. Jiménez, A. Barcelo, A. R. and Sevilla, F. (2001) Antioxidant systems and O_2^-/H_2O_2 production in the apoplast of pea leaves. Its relation with salt-induced necrotic lesions in minor veins. Plant Physiology 127, 817-831.
- Hossain, M. T., Mori, R., Soga, K., Wakabayashi, K., Kamisaka, S., Fujii, S., Yamamoto, R. and Hoson, T. (2002) Growth promotion and an increase in cell wall extensibility by silicon in rice and some other Poaceae seedlings. Journal of Plant Research 115, 23-27.
- Hu, Y. and Schmidhalter, U. (2005) Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 168: 541-549.
- Hunt, R. (1982) Plant growth curves. A functional approach. Edward Arnold Pub. Ltd. London UK.
- Kaori, S. Hattori, T. An, P. Tsuji, W. Eneji, A. E. Kobayashi, S. Kawamura, Y. Tanaka, K. and Inanaga, S. (2011) Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress. Journal of Plant Nutrition 34 71-82.
- Kaydan, D. (2007) Effects of salicylic acid on the growth and some physiological characters in salt stressed wheat (*Triticum aestivum* L.). Tarim Bilimleri Dergisi 13 114-119.
- Kerepesi, I. and Galiba, G. (2000) Osmotic and salt stress-induced alteration in soluble carbohydrate content in wheat seedlings. Journal of Crop Science 40: 482-487.
- Lazof, D. B. and Bernstein, N. (1999) The NaCl induced inhibition of shoot growth: the case for disturbed nutrition with special consideration of calcium, Advanced Botany Research 29: 113- 189.
- Leidi, E. O. Silberbush, M. and Lips, S. H. (1991) Wheat growth as affected by nitrogen type, pH and salinity. II. Photosynthesis and transpiration. Journal of Plant Nutrition 14: 247- 256.
- Liang, Y. C. (1999) Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. Plant and Soil 209: 217-224.
- Liang, Y. C. Wong, J. W. C. and Long, W. (2005) Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. Chemosphere 58: 475-483.
- Liang, Y. Zhang, W. Chenc, Q. Liu, Y. Ding, R. (2006) Effect of exogenous silicon (Si) on H^+ -ATPase activity, phospholipids and fluidity of plasma membrane in leaves of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). Environmental and Experimental Botany 57:212-219.
- Liang, Y.C. Zhenguo, S. Q. and Tongsheng, M. (1996) Effect of silicon on salinity tolerance of two barley genotypes. Journal of Plant Nutrition 19:173-183.
- Ma, J. F. and Takahashi, E. (1993) Interaction between calcium and silicon in water-cultured rice plants. Plant and Soil. 148: 107-113.
- Marschner, H. (1995) Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press Limited: London. P: 889.
- Maathius, F. J. and Amtmaan, A. (1999) K^+ nutrition and Na^+ toxicity: The basis of cellular K^+/Na^+ ratio. Annual of Botany 84: 123-133.
- Matichenkov, V. V. (2008) Silicon deficiency and Functionality in Soils, Crops and Food. 2th International Conference on Soil and Compost Eco-Biology, November 26th -29th, 2008. Puerto de la Cruz, Tenerife. Spain.
- 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. (2002) Comparative physiology of salt and water stress. Plant Cell and Environment 25: 239-250.

- Murillo-Amador, B. Jones, H. G. Kayac, C. and Aguilar, R. L. (2006) Effects of foliar application of calcium nitrate on growth and physiological attributes of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) grown under salt stress. *Environmental and Experimental Botany* 58: 188–196.
- Netondo, G.W. Onyango, J.C. and Beck, E. (2004) Sorghum and salinity: II. Gas exchange and chlorophyll fluorescence of sorghum under salt stress. *Crop Science* 44: 806-811.
- Niazi, B.H. (2007) The Response of Fodder beet to Salinity: Introduction of a non-conventional fodder crop (Fodder beet) to salt affected lands of Pakistan. PhD-thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Noreen, S., Athar, H. and Ashraf, M. (2013) Interactive effects of watering regimes and exogenously applied osmoprotectants in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) crop. *Pakistan Journal of Botany* 45, 1873-1881.
- Okuda, A. and Takahashi, E. (1965) The role of silicon. In: *The Mineral Nutrition of the Rice Plant*. Proceeding: Symposium of the International Rice Research Institute. Baltimore, MD. USA.
- Oliveira, F. de A. de; Campos, M. de S.; Oliveira, F. R. A. de; Oliveira, M. K. T. de; Medeiros, J. F. de; Melo, T. K. de (2011) Nitrogen, phosphorus and potassium development and concentration in leaf tissues of eggplant in function of salinity. *Revista Brasileira de Ciencias Agrarias* 6: 37-45
- Orcutt, D. M. and Nilsen, E.T. (2000) *The physiology of plants under stress, soil and biotic factors*. John Wiley and Sons Inc. New York.
- Plieth, C. (2005) Calcium: Just another regulator in the machinery of life? *Annual of Botany*. 96: 1-8.
- Rameeh, S. Rezai, A. and Saeidi, G. (2004) Study of salinity tolerance in rapeseed. *Communications in soil science and plant analysis* 35: 2849-2866.
- Rhoades, J. D. Kandiah, A. and Mashali, A. M. (1992) *The use of saline waters for crop production*. FAO. Irrigation and Drainage. Paper 48. Rome, Italy..
- Romero-Aranda, M.R., Jurado, O. and Cuartero, J. (2006) Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *Journal of Plant Physiology* 163: 847-855.
- Silim, S. N. Saxana, M. C. and Singh, K. B. (1993) Adaptation of spring-sown chickpea to the Mediterranean Basin. II. Factors influencing yield under drought. *Field Crops Research* 34: 137-141.
- Stamatakis, A. Papadantonakis, N. Savvas, D. Lydakis-Simantiris, N. and Kefalas, P. (2003) Effects of silicon and salinity on fruit yield and quality of tomato grown hydroponically. *Acta Horticulture* 609:141-147.
- Tayeb, M. A. (2005) Response of barley grains to the interactive effect of salinity and salicylic acid. *Plant Growth Regulation* 45:215–224.
- Tester, M. and Davenport, R. J. (2003) Na⁺ transport and Na⁺ tolerance in higher plants. *Annual of Botany* 91: 503–527.
- Tuna, A. L. Kaya, C. Higgs, D. Murillo-Amador, B. Girgin, A. R. and Aydemir, S. (2008) Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. *Environmental and Experimental Botany* 62:10–16.
- 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 salt stress and supplemental silicon on morphological and ionic relations of rapeseed

Zahra Soltani, Farid Shekari*, Khalil Jamshidi¹, Reza Fotovat and Rogayeh Azim Khani

Department of agronomy and Plant Breeding, University of Zanjan.

(Received: 23 May 2015, Accepted: 9 December 2015)

Abstract:

To study the effects of salinity and complementary silicon on some morphological traits of canola, cv. Talaiie, an experiment was done in greenhouse. Treatments included four levels of potassium silicate (0, 1, 2 and 3mM) and four levels of chloride sodium (0, 0.3, 0.6 and 0.9 g/kg soil). In normal condition application of silicon did not have a significant effect on measured traits. Salinity decreased leaf area, leaf and plant dry weight and leaf area ratio (LAR). Application of silicon to growth media enhanced mentioned traits. The highest morphological traits and biomass were found in mild salinity, 0.3 g NaCl, and all applied silicon levels. Salinity decreased LAR values which showed salinity had strong effect on leaf expansion than biomass production. The highest specific leaf weight (SLW) was found in highest salt level and non application of silicon. On the other hand, supplementary silicon reduced SLW in salt treatments, which showed positive effects of silicon on leaf expansion. Sodium concentration was increased with increasing salt levels in non-applied silicon treatments, but potassium and calcium concentrations were decreased. Application of silicon induced a reduction in sodium and potassium and calcium uptake compared to non-applied silicon treatments. The ratio of K/Na and Ca/Na increased in all silicon treatments. Si concentrations in salted and normal condition were higher in silicon treated soils.

Keywords: Calcium, Leaf area ratio, Rapeseed, Potassium, Silicon, Sodium.

*corresponding author, Email: shekari@znu.ac.ir