



بهبود اثرات تنش شوری با سیلیکون در ارقام چیتی و سبز لوبیای معمولی (*Phaseolus vulgaris*)

هادی نصرتی^۱، پرتو روشندل^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۵/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۱

چکیده

پژوهش حاضر اثر تغذیه سیلیکونی (۵/۰ و ۱ میلی‌مولار) در دو رقم لوبیا (*Phaseolus vulgaris*) (لوبیا چیتی و لوبیا سبز) تحت شوری ناشی از کلرید سدیم (۵۰ میلی‌مولار) بررسی شد. برای هر رقم، آزمایشی مستقل در قالب طرح کاملاً تصادفی روی دانه‌رست‌های ۱۲ روزه انجام گرفت و تا چهار هفته اعمال تیمارها ادامه یافت. صفات مورد ارزیابی عبارت بود از وزن خشک ساقه و ریشه، میزان کلروفیل کل، نشت الکترولیتی غشاء، محتوای نسبی آب، پرولین برگها، غلظت کاتیونهای K^+ و Na^+ در ریشه و ساقه. تحت تنش شوری کاهش معنی‌دار در بیوماس، غلظت K^+ ، کلروفیل کل و محتوای نسبی آب برگ‌ها مشاهده شد ولی میزان غلظت Na^+ ، پرولین و نشت الکترولیت‌ها افزایش یافت. همراه با تغذیه سیلیکونی درصد ارتقاء بیوماس در لوبیا چیتی بیش از لوبیا سبز بود. داده‌های این پژوهش پیشنهاد می‌کند سیلیکون با جلوگیری از ورود سدیم اضافی و کاهش نشت الکترولیتی همراه با بالا بردن محتوای نسبی آب تحمل به تنش شوری را در لوبیا چیتی افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: انتخابگری K^+/Na^+ ، لوبیا چیتی و سبز، مقاومت به شوری، Si.

مقدمه

سیلیکون دومین عنصر از نظر فراوانی در خاک است. علیرغم این میزان فراوانی، سیلیکون هرگز به شکل آزاد در خاک یافت نشده و همواره در ترکیب با دیگر عناصر به فرم انواع اکسید یا سیلیکات وجود دارد. گیاهان سیلیکون را به فرم اسید سیلیسیک مولکولی، $Si(OH)_4$ جذب می‌کنند و این عنصر نهایتاً به طور غیر قابل برگشت در سراسر گیاه به حالت سیلیکای بی شکل رسوب می‌نماید. به این ترتیب علیرغم فراوانی، بیشتر منابع سیلیکون موجود در خاک به شکل قابل دسترس برای گیاه نمی‌باشد. اگرچه نقش سیلیکون به عنوان یک عنصر ضروری برای رشد و نمو اکثر گیاهان به اثبات نرسیده است، ولی مشخص شده است که جذب آن توسط گیاه نتایج سودمندی در ارتقاء مقاومت گیاه به حشرات و آفات (Rodrigues et al., 2003)، تخفیف تنش فلزات سنگین (Wang et al., 2009) و افزایش مقاومت به خشکی (Yin et al., 2014) به همراه دارد. علاوه بر این، اثرات مثبت این عنصر

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد فیزیولوژی گیاهی، دانشگاه شهرکرد

۲. استادیار، گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهرکرد

* نویسنده مسئول: roshandelparto@gmail.com

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد آقای هادی نصرتی به راهنمایی دکتر پرتو روشندل است که در دانشگاه شهرکرد انجام گرفت.

بصورت نانوذرات سیلیکا نیز توسط اشکاوند و همکاران (۲۰۱۵) در گونه زالزالک و زرافشار و همکاران (۲۰۱۵) در گونه گلابی نیز تایید شده است. لوبیای معمولی (*Phaseolus vulgaris* L.) از گلیکوفیت‌هایی است که شوری ناشی از کلرید سدیم به طور قابل توجهی از رشد و محصول دهی آن می‌کاهد. خاکی که در آن لوبیا کشت می‌شود می‌بایست حاوی کمتر از ۰/۵٪ نمک کلرید سدیم باشد. محققان پیشنهاد کرده‌اند که می‌توان اثرات نامطلوب تنش شوری را با روش‌هایی مانند به‌نژادی رقم‌های زراعی جدید، تولید گیاهان زراعی تراریخت و غیره کم نمود، ولی هزینه بالای این روش‌ها، نیاز برای یافتن راه‌های ساده با هزینه پایین را ایجاب می‌کند. یکی از روش‌های کم هزینه، به کارگیری کودهای سیلیکاته به ویژه در مواردی است که آب استفاده شده در آبیاری حاوی کلرید سدیم بیش از حد آب شیرین باشد. تاثیر سیلیکون در تخفیف تنش شوری در گندم (Ahmad *et al.*, 1992)، جو (Liang *et al.*, 2003)، گوجه‌فرنگی (Shi *et al.*, 2014)، برنج (Yeo *et al.*, 1999)، خیار (Zhu *et al.*, 2004) و ذرت (Parveen and Ashraf, 2010) آشکار شده است. با این همه، مکانیسم (های) اثر سیلیکون هنوز به‌خوبی معلوم نیست. در این باره محققان پیشنهاداتی ارائه کرده‌اند که می‌توان به این موارد اشاره کرد: ۱) ممکن است سیلیکون از طریق رسوب Si به شکل سیلیکای بی‌شکل و فیتولین‌های آپال روی دیواره سلولی، از جابجایی سدیم (در اثر تعرق) در اندام‌های هوایی بکاهد (Wang *et al.*, 2004)، ۲) در ریشه‌ها سیلیکون با سدیم تشکیل کمپلکس داده و از انتقال سدیم به اندام‌های هوایی جلوگیری می‌کند (Ahmad *et al.*, 1992)، ۳) سیلیکون باعث حفاظت از غشاء پلاسمایی و فراساختار کلروپلاست‌ها می‌شود (Liang *et al.*, 2003)، ۴) سیلیکون می‌تواند با تحریک فعالیت $H^+ - ATPase$ باعث کدهبندی سدیم در واکوئل‌ها شود (Liang *et al.*, 2003). توضیح دیگری نیز توسط Yeo و همکاران (۱۹۹۹) بیان شده است بر این مبنا که سیلیکون سهم آب جذب شده از ریشه از طریق مسیر آپوپلاستی را محدود می‌کند و به این طریق ورود سدیم بدون تاثیر چشمگیر بر جریان کلی تعرق و رشد گیاه کاهش می‌یابد. همچنین تاثیر سودمند سیلیکون در افزایش تحمل به شوری به فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نسبت داده شده است (Zhu *et al.*, 2004). در آزمایشاتی که بر روی بذر گوجه‌فرنگی تحت شوری (۲۵ و ۵۰ میلی‌مولار) توام با سیلیکون (۱ و ۲ میلی‌مولار) انجام گرفت معلوم شد سیلیکون ۱ میلی‌مولار باعث تخفیف اثرات منفی کلرید سدیم بر مولفه‌های جوانه‌زنی می‌شود (Haghighi *et al.*, 2012).

در تحقیق حاضر به تاثیر سیلیکون در افزایش مقاومت به شوری دو رقم لوبیا چیتی و لوبیا سبز در مرحله گیاهچه‌ای پرداخته شده و مکانیسم احتمالی آن مورد بحث قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

شرایط کشت و تیمار گیاهان

در پژوهش حاضر که در گلخانه مرکزی دانشگاه شهرکرد انجام گرفت، برای بررسی تاثیر سیلیکون در افزایش تحمل گیاه لوبیا

به شوری از بذرهای لوبیای معمولی (*Phaseolus vulgaris* L.) با ارقام لوبیا سبز و لوبیا چیتی که کشت آنها رایج است، استفاده شد. برای هر رقم آزمایشی مستقل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار روی دانه‌رست‌های ۱۲ روزه انجام گرفت و تا چهار هفته اعمال تیمارها ادامه یافت. در هر آزمایش چهار تیمار شامل: (۱) شاهد (بدون تیمار کلرید سدیم و سیلیکون)، (۲) تیمار کلرید سدیم (۵۰ میلی مولار)، (۳) تیمار کلرید سدیم با غلظت ۵۰ میلی مولار + ۵ میلی مولار سیلیکون و (۴) تیمار کلریدسدیم با غلظت ۵۰ میلی مولار کلریدسدیم + ۱ میلی مولار سیلیکون جهت یافتن غلظت پایه سیلیکون اعمال گردید. از آنجایی که در تحقیقات قبلی بی‌اثر بودن سیلیکون (به تنهایی) بر رشد گیاهان لوبیا گزارش شده بود (Zuccarini, 2008)، تیمار مذکور در این آزمایشات لحاظ نشد. محیط گلخانه دارای شرایط ۱۴ ساعت نور / ۳۳ درجه سانتیگراد و ۱۰ ساعت تاریکی / ۱۸ درجه سانتیگراد بود. پس از اتمام دوره آزمایش، اندازه‌گیری وزن خشک و تر ریشه و اندام‌های هوایی (به‌طور جداگانه) با استفاده از ترازوی دیجیتال (±۰/۰۰۰۱) انجام شد. برای تعیین وزن خشک، اندام‌های گیاهی مورد بررسی به مدت ۷۲ ساعت در آن ۶۰ درجه سانتیگراد قرار داده شدند.

اندازه‌گیری محتوای کلروفیل کل (a+b)

جذب نور عصاره استونی برگ‌های تازه در طول موجهای ۶۴۶ و ۶۶۳ نانومتر قرائت و میزان کلروفیل کل (a+b) با استفاده از روابط زیر محاسبه گردید (Lichtenthaler and Buschmann, 2001):

$$\text{Chl. a (mg.ml}^{-1}\text{)} = 12.25 A_{663.2} - 2.79 A_{646.8}$$

$$\text{Chl. b (mg.ml}^{-1}\text{)} = 21.51 A_{646.8} - 5.1 A_{663.2}$$

$$\text{Chl. Total (mg.ml}^{-1}\text{)} = \text{Chl. a} + \text{Chl. b}$$

اندازه‌گیری نشت الکترولیتی غشاء

۰/۲ گرم برگ تازه با دقت شسته و خشک و در ظروف شیشه‌ای در پوش‌دار محتوی ۱۰ میلی لیتر آب دیونیزه قرار داده شد. سپس به مدت سه ساعت در دمای سی درجه سانتیگراد در حمام آب گرم قرار داده و نشت الکترولیتی آنها با استفاده از هدایت سنج الکتریکی اندازه‌گیری شد (C₁). مجدداً نمونه‌ها به مدت دو دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد قرار داده و برای بار دوم هدایت الکتریکی آنها پس از سرد شدن محلول اندازه‌گیری شد (C₂). درصد نشت (EL) مطابق فرمول زیر محاسبه گردید (Tuna et al., 2008):

$$\% \text{ EL} = C_1 / C_2 \times 100$$

هدایت الکتریکی محلول بعد از جوش = C₂ هدایت الکتریکی محلول قبل از جوش، C₁ =

سنجش میزان پرولین

برای اندازه‌گیری پرولین طبق روش Bates و همکاران (۱۹۷۳)، ۲۰۰ میلی گرم از بافت تازه برگ در ۱۰ میلی لیتر محلول ۳٪ اسید سولفوسالیسیلیک ساییده و مخلوط حاصل به مدت ۱۰ دقیقه (g × ۸۵۰۰) سانتی‌فیوژ (دستگاه سانتی‌فیوژ یونیورسال مدل PIT320) شد. سپس به ۲ میلی لیتر از محلول صاف شده، ۲ میلی لیتر از هر یک از مواد معرف نین‌هیدرین و اسید استیک گلاسیال اضافه گردید و مخلوط حاصل به مدت یک ساعت در بن ماری با دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد. سپس این محلول بر روی یخ سرد شد و به آن ۴ میلی لیتر تولوئن اضافه و با دستگاه ورتکس به خوبی مخلوط شد. لوله‌های حاوی این مخلوط به مدت ۲۰ دقیقه ثابت نگه داشته شد. پس از تشکیل دو فاز در لوله‌های آزمایش، از لایه فوقانی که حاوی کمپلکس رنگی بود برای سنجش میزان پرولین با دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-2500, Shimadzu Corp., Kyoto, Japan) در طول موج ۵۲۰ نانومتر استفاده شد. میزان پرولین با کمک منحنی استاندارد بر اساس میکرومولار بر گرم وزن تر محاسبه شد.

اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ

محتوای نسبی آب برگ گیاهچه‌های ۴۰ روزه، با روش Tuna و همکاران (۲۰۰۸) اندازه‌گیری شد. از برگ هر گروه از گیاهچه‌ها، شش دیسک برگ برداشت شد. وزن تر هر نمونه اندازه‌گیری شد (FW). دیسک‌ها در آب دیونیزه برای هفت ساعت شناور شدند. بعد از گذشت این مدت زمان دیسک‌های تورژسانس یافته دوباره توزین شدند (TW). سپس دیسک‌های مذکور در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد آون به مدت ۷۲ ساعت خشک و توزین شدند (DW). با استفاده از رابطه زیر درصد محتوای نسبی آب برگها (RWC) محاسبه گردید:

$$RWC = [(FW-DW)/(TW-DW)] \times 100 \%$$

تعیین محتوای یونی

برای سنجش میزان کاتیون‌های Na^+ و K^+ ، ریشه و بخش هوایی خشک شده گیاهان مورد آزمایش پس از آسیاب شدن به مدت ۵ ساعت درون کوره و در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. به خاکستر حاصل از هر نمونه، ۵ میلی لیتر اسید کلریدریک ۶ نرمال اضافه و حرارت داده شد. پس از صاف کردن نمونه‌ها با کاغذ صافی، حجم محلول صاف شده با افزودن آب مقطر به ۱۰۰ میلی لیتر رسانده شد. غلظت یونهای سدیم، پتاسیم با روش فلیم فتومتری (410- Corning U.K.) اندازه‌گیری شد (Roshandel, 2005).

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه واریانس با استفاده از آزمون یک طرفه در برنامه آماری SPSS مورد بررسی قرار گرفت و مقایسه میانگین‌ها در سطح $p < 0.05$ و با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن صورت گرفت. نمودارهای مربوطه با استفاده از برنامه Excel رسم گردید.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس برای داده‌های به‌دست آمده از لوبیا چیتی (جدول ۱) و لوبیا سبز (جدول ۲) نشان داد که تاثیر تیمار شوری و نیز شوری همراه با تغذیه سیلیکونی بر روی صفات مورد بررسی در هر یک از دو واریته، دارای اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تیمار گیاه با کلرید سدیم به‌نحو معنی‌دار از وزن تر بخشهای هوایی و زیرزمینی در هر دو رقم کاست ($p < 0.05$) (شکل ۱؛ الف و ب). درصد این کاهش برای بخش هوایی لوبیا چیتی ۴۱٪ و برای لوبیا سبز ۳۹٪ بود. کاهش وزن تر ریشه‌ها تحت تنش شوری در لوبیا چیتی ۲۹٪ و در لوبیا سبز ۱۶٪ به‌دست آمد. تغذیه سیلیکونی (در موثرترین حالت یعنی سطح ۱ میلی مولار) فقط باعث افزایش معنی‌دار در وزن تر بخشهای هوایی لوبیا چیتی (۲۶٪+) و لوبیا سبز (۳۷/۵٪+) نسبت به شاهد شوری شد. ولی تفاوت معنی‌داری در دو سطح ۰/۵ و ۱ میلی مولار سیلیکون به‌دست نیامد. تاثیر سیلیکون بر افزایش وزن تر ریشه در هر دو رقم نسبت به شاهد شوری اختلاف معنی‌داری نشان نداد. بررسی نتایج نشان داد تیمار شوری باعث کاهش معنی‌دار در وزن خشک بخشهای هوایی و زیرزمینی هر دو رقم لوبیا چیتی و لوبیا سبز می‌شود (شکل ۱؛ ج و د).

تحت تنش شوری، کاهش وزن خشک در لوبیا چیتی ۴۸٪- و در لوبیا سبز ۴۳٪- نسبت به شاهد بود. تغذیه سیلیکونی در موثرترین سطح (۱ میلی مولار) باعث افزایش ۴۰ درصدی وزن خشک در لوبیا چیتی و در مقایسه با شاهد شوری شد. میزان این صفت در چنین شرایطی برای لوبیا سبز ۳۲٪ بود. در مورد وزن خشک ریشه‌ها، تنش شوری به‌تنهایی باعث کاهش ۵۰ درصدی این پارامتر در لوبیا چیتی شد. میزان آن برای لوبیا سبز ۵۴٪- بود. تغذیه سیلیکونی (به‌ویژه در ۱ میلی مولار) باعث افزایش وزن خشک ریشه‌های لوبیا چیتی (۳۸٪+) و لوبیا سبز (۲۳٪+) گردید. ولی اختلاف معنی‌داری بین دو سطح ۰/۵ و ۱ میلی مولار سیلیکون مشاهده نشد.

تاکنون تاثیر مفید سیلیکون در تخفیف اثرات سوء تنشهای مختلف زیستی و غیرزیستی در گیاهان گوناگون نشان داده شده است (Ahmad *et al.*, 1992; Yeo *et al.*, 1999; Neumann and De Figueiredo, 2002; Rodrigues *et al.*, 2003; Gong *et al.*, 2006; Zuccarini, 2008; Parveen and Ashraf, 2010; Pavlovic *et al.*, 2013; Yin *et al.*, 2014; Ahmed *et*

(2015; Zarafshar et al., 2015; Ashkavand et al., 2015; Shi et al., 2014; al., 2014). نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر نیز

گویای سودمندی سیلیکون بر رشد ارقام لوبیای معمولی تحت تنش شوری و تایید کننده تحقیقات قبلی بود. این نتایج نشان

داد

جدول ۱: جدول تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات مورد بررسی در گیاه لوبیا چیتی ۴۰ روزه تحت تیمار شوری و

سیلیکون

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن تر اندامهای هوایی	وزن تر ریشه	وزن خشک اندامهای هوایی	وزن خشک ریشه	کلروفیل کل	نشت الکترولیتی غشاء	میزان پرولین آزاد	محتوای نسبی آب برگ	غلظت یونهای سدیم اندامهای هوایی	غلظت یونهای سدیم ریشه	غلظت یونهای پتاسیم اندامهای هوایی	غلظت یونهای پتاسیم ریشه
شوری	۱	۱۱/۱۳*	۰/۴۷۳*	۴/۲۴*	۰/۰۴*	۱۳/۸۲*	۹۴/۴۶*	۱۱/۷۲*	۹۰/۳*	۱۲۵/۳*	۱۸۳/۲*	۹۶/۷۱*	۱۴۹/۶*
شوری × سیلیکون	۲	۱۲/۸۹*	۰/۵۱*	۵/۳۱*	۰/۱۱*	۳۹/۲۸*	۶۷/۱۸*	۱۰/۵۴*	۱۳۱/۵*	۹۸/۷۲*	۱۱۹/۵*	۱۵۶/۷*	۱۶۶/۷*
خطا	۱۲	۱/۳۳	۰/۰۵۵	۰/۶۷	۰/۰۰۶	۰/۵۸	۱/۰۲	۰/۸۹	۱/۰۱	۲/۷۱	۱/۷۷	۲/۰۳	۱/۰۳
ضریب تغییرات	-	۶/۲۳	۸/۶۲	۹/۴۴	۱۰/۳۴	۳/۳۶	۷/۰۳	۸/۹۷	۹/۳۱	۷/۰۱	۷/۴۳	۸/۵۶	۶/۹۱

* معنی داری در سطح ۵ درصد

جدول ۲: جدول تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات مورد بررسی در گیاه لوبیا سبز ۴۰ روزه تحت تیمار شوری و

سیلیکون

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن تر اندامهای هوایی	وزن تر ریشه	وزن خشک اندامهای هوایی	وزن خشک ریشه	کلروفیل کل	نشت الکترولیتی غشاء	میزان پرولین آزاد	محتوای نسبی آب برگ	غلظت یونهای سدیم اندامهای هوایی	غلظت یونهای سدیم ریشه	غلظت یونهای پتاسیم اندامهای هوایی	غلظت یونهای پتاسیم ریشه
شوری	۱	۱۳/۲*	۰/۵۹*	۵/۳۱*	۰/۰۸*	۱۶/۴*	۱۰۰/۵*	۹/۹۳*	۹۳/۵۳*	۱۱۹/۷*	۱۵۲/۶*	۱۱۶/۲*	۱۵۸/۶*
شوری × سیلیکون	۲	۱۴/۱*	۰/۶۸*	۵/۸۸*	۰/۲۳*	۴۴/۶*	۸۷/۶۳*	۸/۱۶*	۱۲۰/۴*	۸۹/۴*	۹۸/۳*	۲۱۹/۹*	۱۸۰/۴*
خطا	۱۲	۲/۸۷	۰/۰۷	۰/۹۹	۰/۰۰۰۵	۱/۵۴	۴/۲۲	۰/۰۷	۱/۳۲	۱/۲۵	۱/۵۲	۲/۴۴	۱/۳۱
ضریب تغییرات	-	۱۰/۲۱	۱۳/۴۳	۱۱/۸	۱۰/۸	۷/۳	۵/۸۲	۱/۶۲	۴/۴۶	۲/۶۵	۶/۷۲	۹/۸۷	۴/۷۷

* معنی داری در سطح ۵ درصد

اگرچه در تنش شوری ناشی از کلرید سدیم از میزان بیوماس و وزن تر (محتوای آب کل) در ارقام لوبیا چیتی و سبز کاسته

می شود ولی تغذیه سیلیکونی اثرات منفی کلرید سدیم را به نحوی معنی دار تخفیف می دهد.

نتایج نشانگر آن بود که تحت تنش شوری میزان کلروفیل کل در هر دو رقم در مقایسه با شاهد کاهش معنی‌داری یافت (کاهش به میزان ۲۱٪ در لوبیا چیتی و ۲۶٪ در لوبیا سبز). با این وجود، تغذیه با سیلیکون (در هر دو سطح) باعث افزایش معنی‌دار غلظت کلروفیل در هر دو رقم تحت تنش شوری شد (شکل ۲؛ الف). این افزایش - در موثرترین سطح سیلیکون یعنی ۱ میلی مولار - در رقم لوبیا چیتی ۱۸٪ و در لوبیا سبز ۱۶٪ بود. تاثیر سیلیکون در دو غلظت بکار رفته، تفاوت آماری نداشت. گزارش شده است سیلیکون با تاثیر مثبت بر فراساختار برگ‌ها، محتوای کلروفیل کل و فعالیت آنزیم رابیسکو سرعت فتوسنتز را در گیاه جو و گوجه فرنگی تحت شوری ارتقاء می‌دهد (Liang et al., 2003; Shi et al., 2014). مشابه با این یافته‌ها، نتایج حاضر نیز نشان داد در ارقام لوبیا نیز سیلیکون با حفظ نسبی محتوای کلروفیل کل می‌تواند در انجام بهتر فتوسنتز، گیاه را یاری دهد. Zuccarini (۲۰۰۸) معتقد است سیلیکون از تاثیر منفی سدیم بر تبادلات گازهای فتوسنتزی می‌کاهد و از این طریق بر کارایی بهتر فتوسنتز می‌افزاید. اشکاند و همکاران (۱۳۹۵) نیز گزارش نمودند که استفاده از نانوذرات سیلیکایی، نقش مثبتی در نگهداشت عملکردهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهچه‌های زالک تحت تنش خشکی دارد.

تنش شوری (۵۰ میلی مولار) تاثیر منفی خود را بر پایداری و انسجام غشاءهای سیتوپلاسمی در هر دو رقم لوبیای مورد مطالعه نشان داد ($p < 0.05$) (شکل ۲؛ ب). این تاثیر منفی (افزایش نشت الکترولیتها) در لوبیا چیتی شدیدتر بود (افزایش ۷۹ درصدی نسبت به شاهد). در لوبیا سبز و تحت تنش شوری تنها، نشت الکترولیتها ۷۲٪ نسبت به شاهد بیشتر بود. تغذیه سیلیکونی باعث حفاظت و تقویت انسجام غشاءهای سیتوپلاسمی در برابر کلرید سدیم شد ($p < 0.05$). برخلاف لوبیا سبز، در لوبیا چیتی تاثیر سیلیکون در دو سطح ۰/۵ و ۱ میلی مولار، تفاوت معنی‌دار داشت. در مقایسه با تیمار شوری تنها، تغذیه سیلیکونی در سطح ۱ میلی مولار بهترین تاثیر را در کاهش نشت الکترولیتی نشان داد (میزان این پارامتر برای لوبیا چیتی ۳۴٪- و برای لوبیا سبز ۱۶٪- بود). در لوبیا سبز بین دو سطح سیلیکون اختلاف معنی‌داری برای این صفت دیده نشد. داده‌های تحقیق حاضر نشان داد اگرچه در تنش شوری پایداری و انسجام غشاءهای سیتوپلاسمی در لوبیا چیتی بیش از لوبیا سبز دچار مخاطره می‌گردد، با این وجود، برای کاهش نشت الکترولیتها، تغذیه سیلیکونی در لوبیا چیتی تاثیر قویتری دارد. تاثیر مثبت سیلیکون در کاهش نشت الکترولیتی در گیاهان جو (Liang et al., 2003) و گندم (Tuna et al., 2008) نیز گزارش شده است. اگرچه مکانیسم خاصی برای این پدیده عنوان نشده است ولی امکان دارد این رخداد به‌نحوی با رسوب Si به شکل سیلیکای بی‌شکل و فیتولینهای آپال در غشاءها در ارتباط باشد.

نتایج نشان داد تنش شوری باعث افزایش معنی‌دار غلظت پرولین در برگ هر دو رقم لوبیا چیتی (۲۲٪+) و سبز (۱۹٪+) می‌شود ($p < 0.05$). همانگونه که در شکل (۲؛ ج) قابل مشاهده است استفاده از تغذیه سیلیکونی (به‌ویژه در سطح ۱ میلی مولار) میزان پرولین را در برگ گیاهان هر دو رقم مورد مطالعه نسبت به تیمار شوری تنها تا بیش از ۷٪ کاهش داد ولی این

اختلاف از نظر آماری تفاوت معنی داری نداشت. در گزارشهای مختلف بیان شده است که تحت تنش‌هایی مانند شوری و خشکی، غلظت پرولین در بافت‌های گیاهی افزایش می‌یابد (خواجه و همکاران، ۱۳۹۴). محققان دلیل این امر را تحریک بیوسنتز پرولین یا کاهش اکسیداسیون آن در شرایط تنش می‌دانند (Sharma and Kuhad, 2006). گفته می‌شود پرولین در گیاهان تحت تنش از تجزیه شدن ماکرومولکول‌های حیاتی مانند آنزیم‌های سیتوسولی جلوگیری کرده و در عین حال باعث حفظ انسجام و استحکام دیواره سلولی و پاکروبی رادیکال‌های مخرب تولید شده در اثر تنش می‌شود (اکبری مقدم، ۱۳۹۱). در نگاهی اجمالی به تحقیقات انجام شده در این خصوص چنین بر می‌آید که ارتباط تیمار سیلیکونی و تغییر غلظت پرولین در گیاهان تحت تنش همواره از روند مشابهی برخوردار نیست. به‌عنوان مثال، در آزمایشی که خواجه و همکاران (۱۳۹۴) بر روی گیاهان گندم تحت تنش خشکی انجام دادند معلوم شد محلول‌پاشی سیلیکون (۱/۵ میلی مولار) باعث افزایش میزان پرولین در گیاهان تحت تنش شدید می‌شود. ولی در نتایجی متضاد، طالع احمد و حداد (۱۳۸۹) و حداد و مشیری (۱۳۸۹) گزارش کردند که در گیاهان گندم و جو که تحت تنش خشکی قرار داشتند سیلیکون باعث کاهش غلظت پرولین می‌شود. در آزمایش حاضر، اگرچه در مقایسه با تیمار شوری تنها شوری غلظت پرولین در گیاهان تحت شوری همراه با تغذیه سیلیکونی کاهش یافت ولی این کاهش از نظر آماری معنی دار نبود. به این ترتیب نمی‌توان با قاطعیت عنوان کرد که در مکانیسم تاثیر سیلیکون در افزایش مقاومت به شوری دو رقم لوبیای مورد مطالعه، پرولین نقشی اساسی برعهده دارد.

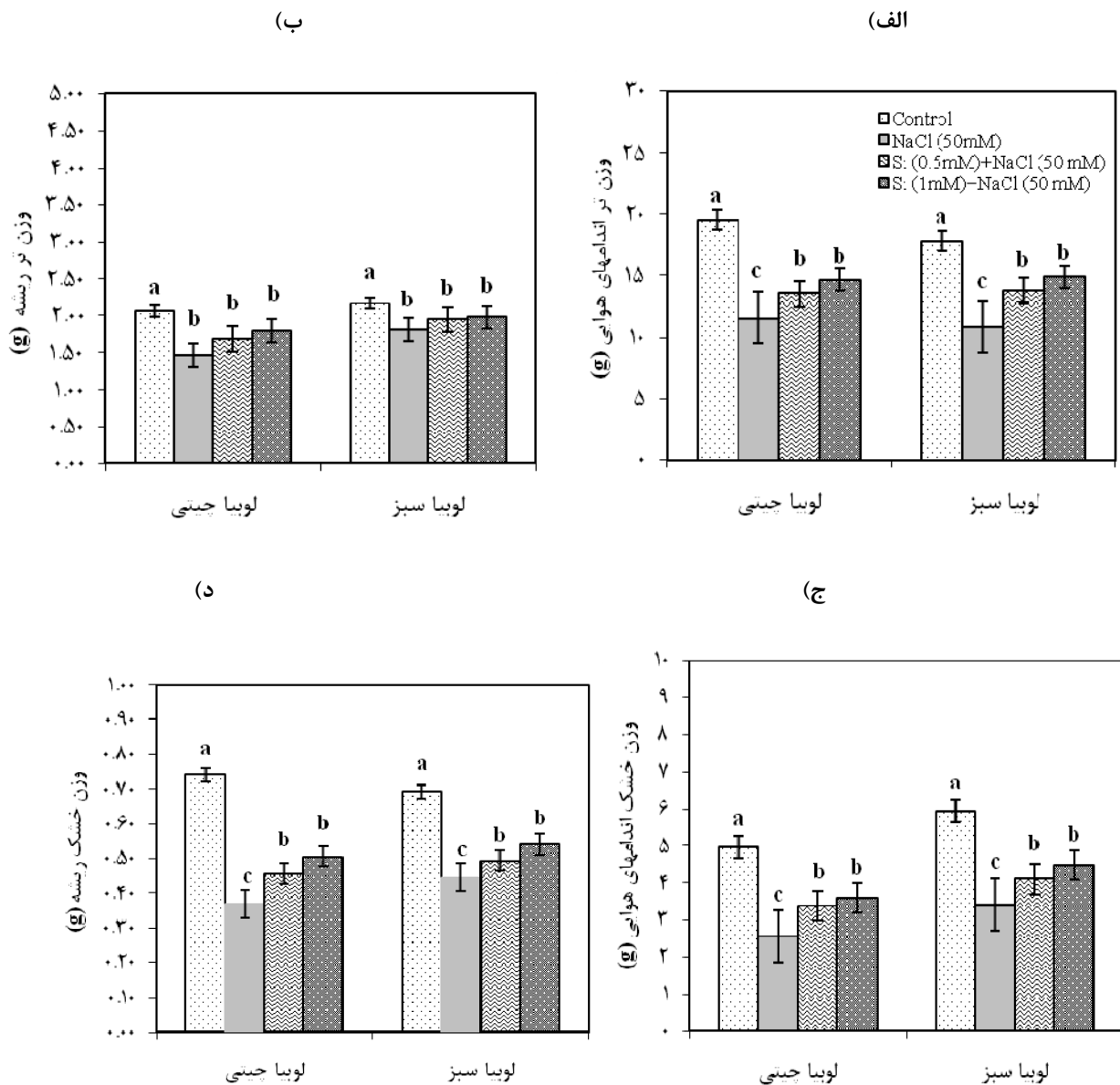
محتوای نسبی آب برگ در هر دو رقم در تنش شوری کاهش معنی‌دار نشان داد ($p < 0.05$). این کاهش برای لوبیا چیتی ۵۰٪ و برای لوبیا سبز ۴۷٪ بود (شکل ۲؛ د). با استفاده از سیلیکون محتوای نسبی آب برگ در هر دو رقم به صورت معنی‌دار بهبود یافت. در بهترین حالت (سیلیکون ۱ میلی مولار) و نسبت به تیمار شوری تنها، میزان این صفت برای لوبیا چیتی ۵۳٪ و برای لوبیا سبز ۴۲٪ افزایش نشان داد. اثر سیلیکون در بین دو سطح به کار رفته با یکدیگر تفاوت معنی‌دار داشت. کاهش اولیه رشد گیاه در شوری، ناشی از اثرات اسمزی کلرید سدیم است، از اینرو در نظرگیری وضعیت آب گیاه در شرایط شوری از اهمیت خاصی برخوردار است (Munns *et al.*, 2002). توانایی گیاه در نگهداشت آب کل و به دنبال آن رقیق شدن غلظت Na^+ اضافی در سلولها و بافت‌ها به عنوان یک استراتژی در ارتقاء تحمل به شوری به‌شمار می‌رود. نشان داده شده است که کمپلکس‌های با وزن مولکولی بالای سیلیکون می‌توانند از طریق فرآیند اندوسیتوز به داخل واکوئل‌ها منتقل و باعث تقویت سازگاری اسمزی شده و متعاقباً ظرفیت نگهداری و حفظ آب بافت افزایش یابد (Neumann and De Figueiredo, 2002). گفته می‌شود سیلیکون به شکل اسید مونوسیلیسیک غیر باردار توسط ریشه‌ها فعالانه جذب می‌شود و سپس به‌طور غیر فعال از طریق جریان تعرق در گیاه انتقال می‌یابد. پس از آن به‌طور غیر قابل برگشت به‌شکل SiO_2-nH_2O در دیواره و لومن سلولهای گیاه رسوب می‌کند (Richmond and Sussman, 2003). به این ترتیب، یکی دیگر از اثرات تخفیف‌دهنده سیلیکون در شوری

می‌بایست مربوط به ماهیت هیدروفیل این ماده باشد. رسوب $\text{SiO}_2\text{-nH}_2\text{O}$ می‌تواند به نگهداشت آب کمک نماید و متعاقباً غلظت نمکها در سلول رقیق شده و بافتها در برابر خشکی فیزیولوژیک محافظت شوند.

همچنانکه در شکل ۳ مشهود است در حضور کلرید سدیم و در غیاب سیلیکون، غلظت یون سدیم به‌طور قابل توجهی در هر دو رقم لوبیا چیتی و لوبیا سبز افزایش یافت ($p < 0.05$). تجمع Na^+ در ریشه‌های این دو رقم بیش از بخش هوایی آنها بود (شکل ۳؛ الف و ب). این مقادیر در ریشه و بخشهای هوایی لوبیا چیتی به ترتیب $8/3$ و $4/6$ برابر و در ریشه و اندامهای هوایی لوبیا سبز به ترتیب 6 و $2/7$ برابر نسبت به حالت بدون تنش به‌دست آمد. اضافه کردن سیلیکون به محلول غذایی هوگلند به نحوی معنی‌دار باعث کاهش تجمع Na^+ در هر دو رقم لوبیا شد، اگرچه در مقایسه با تیمار شوری تنها هنوز غلظت آن بالا بود. به‌طور کلی، تاثیر بازدارندگی سیلیکون بر ورود Na^+ اضافی در تنش شوری در سطح ۱ میلی‌مولار مشهودتر از $0/5$ میلی‌مولار بود (نزدیک به دو برابر) و این تاثیر در ریشه‌ها (کاهش دو برابری برای ورود سدیم) بیش از بخش‌های هوایی به‌دست آمد. در بهترین وضعیت (سیلیکون ۱ میلی‌مولار)، میزان یون سدیم در ریشه لوبیا چیتی $2/4$ و در ریشه لوبیا سبز $1/3$ برابر کمتر از تیمار شوری تنها بود. علاوه بر این در تغذیه سیلیکون ۱ میلی‌مولار، از میزان یون سدیم در بخش‌های هوایی لوبیا چیتی تا $1/6$ برابر کاسته شد و در اندامهای هوایی لوبیا سبز میزان این کاهش 68% بود.

در گلیکوفیت‌ها و در شرایط شوری، تجمع بیشتر Na^+ در ریشه‌ها نسبت اندامهای هوایی یک استراتژی مهم برای دور نگهداشتن این کاتیون از اندامهای فتوسنتز کننده و در نتیجه تحمل شوری محسوب می‌شود (Munns *et al.*, 2002). به‌نظر می‌رسد در این دو رقم لوبیا نیز چنین مکانیسمی وجود داشته است. در گیاهان برنج و جو گزارش شده است که در تنش شوری، سودمندی سیلیکون ناشی از تاثیر آن در کاهش محتوای Na^+ در اندامهای هوایی است (Yeo *et al.*, 1999). Zuccarini (۲۰۰۸) نیز عنوان نمود که سیلیکون باعث کاهش محتوای Na^+ بویژه در برگ‌ها می‌شود. پیشنهاد شده است که رسوب سیلیکون در دیواره سلول‌ها از انتقال نمک‌ها به اندامهای هوایی می‌کاهد (Shi *et al.*, 2014). به این ترتیب داده‌های حاضر این فرضیه را حمایت می‌کند که تخفیف اثرات مضر کلرید سدیم توسط سیلیکون می‌تواند مربوط به کاهش تجمع این نمک در اندامهای هوایی باشد.

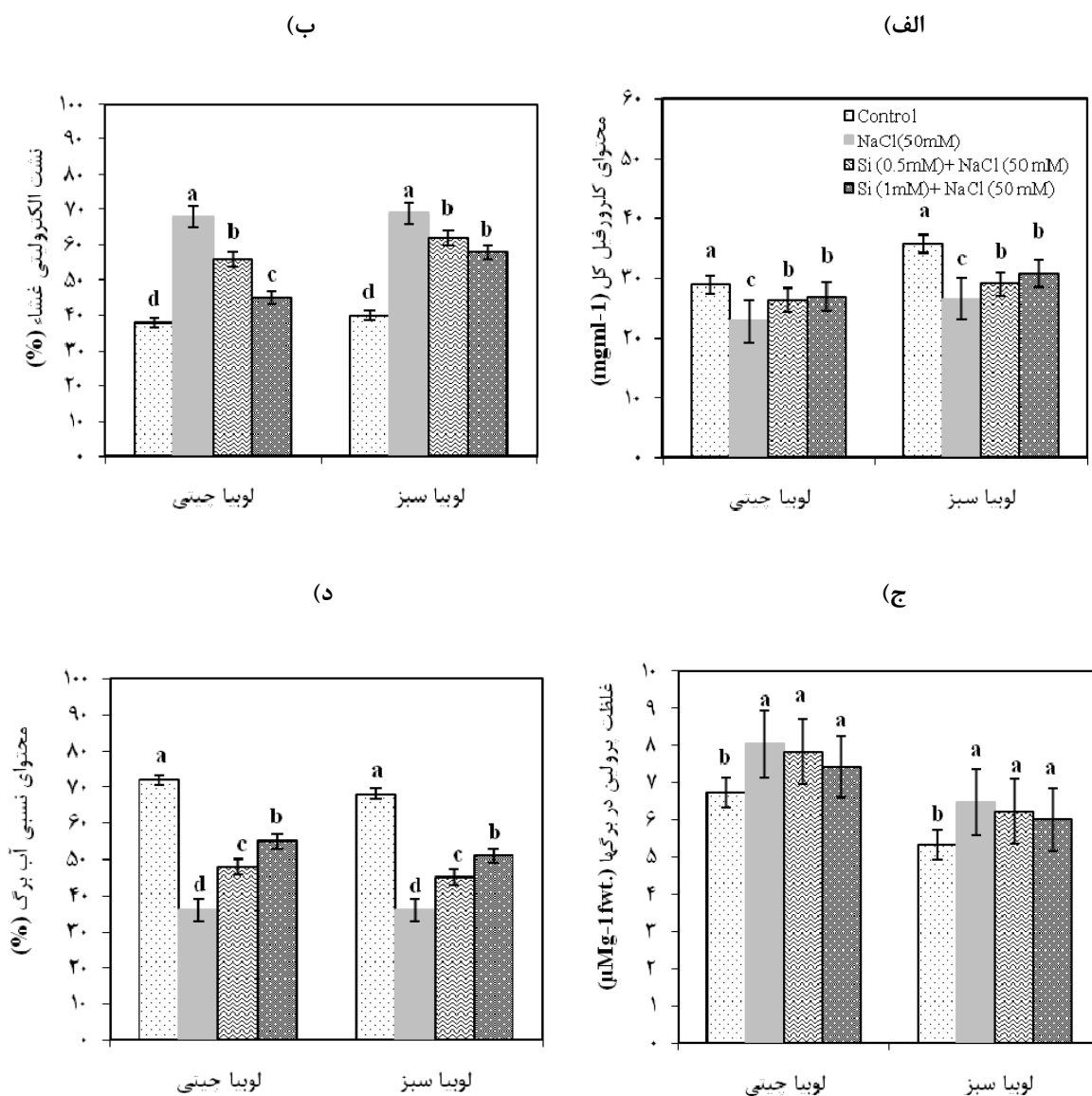
در پژوهش حاضر تغذیه سیلیکونی از تجمع Na^+ در بافت‌های ریشه‌ای ارقام لوبیا کاست؛ این یافته موافق با این فرضیه است که سیلیکون از طریق انسداد نسبی انتقال آپوپلاستی Na^+ که تا حد زیادی مسئول ورود این یون به ریشه‌هاست، از ورود آن به گیاه جلوگیری می‌نماید. محققان پیشنهاد کرده‌اند که رسوب سیلیکون در دیواره سلولهای آگزودرمیس و اندودرمیس ریشه‌ها از انتقال نمک کلرید سدیم به بافت‌های مرکزی ریشه و ساقه‌ها ممانعت می‌نماید (Yeo *et al.*, 1999; Gong *et al.*, 2006). ایده‌ی دیگری نیز ابراز شده مبنی بر این که سیلیکون انتقال Na^+ به اندامهای هوایی را با تشکیل کمپلکس‌های بزرگی از این یون کاهش می‌دهد (Ahmad *et al.*, 1992).



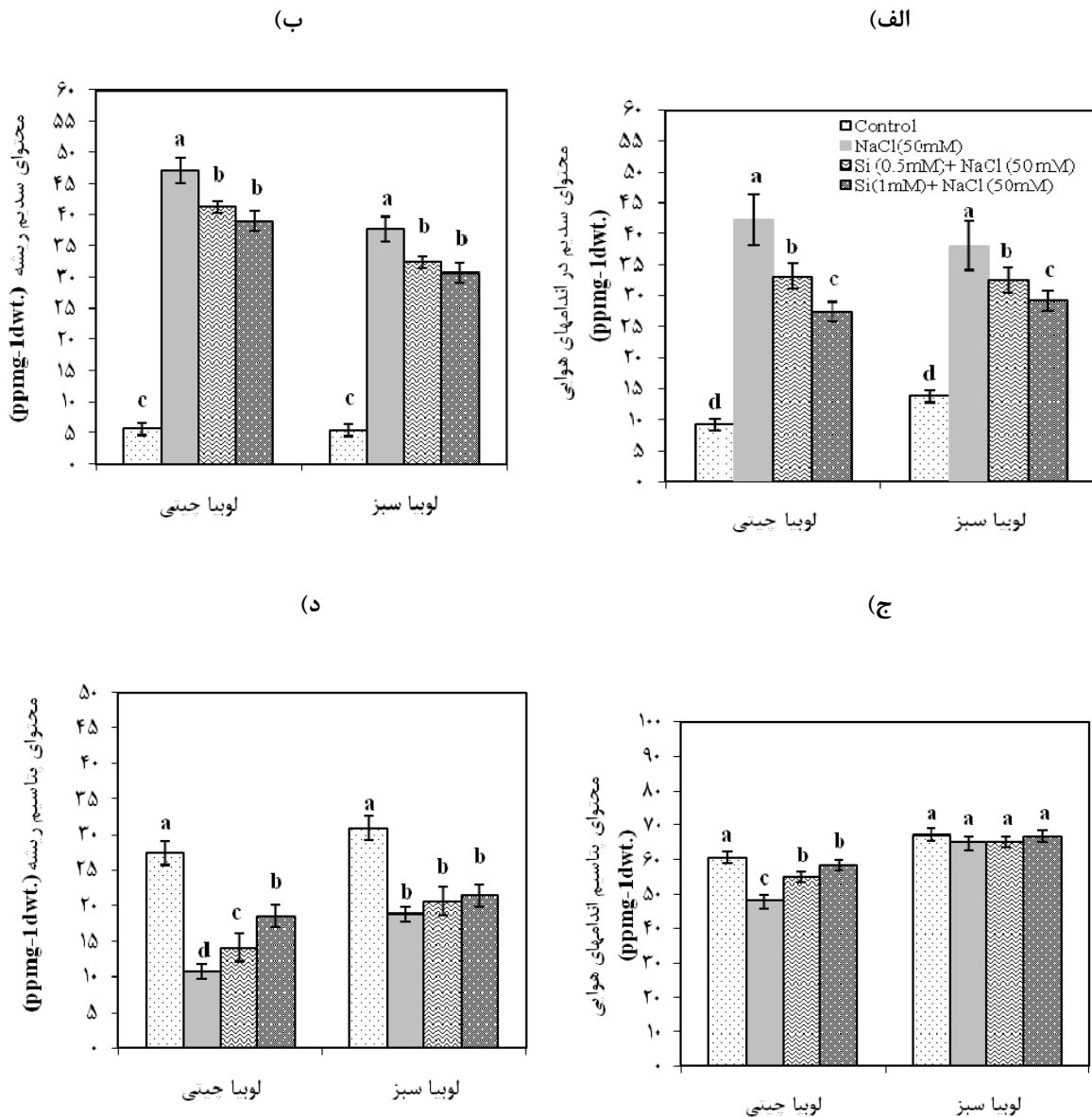
شکل ۱: تأثیر تنش شوری (کلرید سدیم ۵۰ میلی مولار) و تغذیه سیلیکونی (۰/۵ و ۱ میلی مولار) بر الف) وزن تر بخش هوایی، ب) وزن تر ریشه، ج) وزن خشک بخش هوایی و د) وزن خشک ریشه در گیاهچه‌های ۴۰ روزه لوبیا چیتی و لوبیا سبز. هر ستون شامل سه تکرار و بارهای عمودی نشانگر خطای معیار ($\pm SE$) می‌باشد.

نتایج حاکی از آن بود که تحت تیمار شوری به طور معنی‌دار از غلظت پتاسیم در ریشه‌های هر دو رقم لوبیا و نیز در بخش‌های هوایی لوبیا چیتی کاسته می‌شود ($p < 0.05$) (شکل ۳؛ ج و د). کاهش محتوای K^+ در ریشه‌های هر دو رقم بیش از بخش‌های هوایی بود: به ترتیب ۵۸ و ۱۶/۵٪ در لوبیا چیتی و ۴۲ و ۴٪ در لوبیا سبز. اضافه کردن سیلیکون به محیط کشت باعث افزایش معنی‌دار میزان K^+ در ریشه و بخش‌های هوایی لوبیا چیتی در مقایسه با تیمار شوری تنها شد ($p < 0.05$). تحت تنش کلرید سدیم و موثرترین میزان سیلیکون (۱ میلی مولار)، تأثیر مثبت سیلیکون بر نگهداشت K^+ در ریشه‌ها و بخش‌های هوایی لوبیا

چیتی به ترتیب ۲۹ و ۱۵٪ و در لوبیا سبز ۸ و ۳/۵٪ به دست آمد.



شکل ۲: تأثیر تنش شوری (کلرید سدیم ۵۰ میلی مولار) و تغذیه سیلیکونی (۵/۰ و ۱ میلی مولار) بر الف) محتوای کلروفیل کل، ب) نشت الکترولیتی غشاء، ج) غلظت پرولین و د) محتوای نسبی آب برگ‌های گیاهچه‌های ۴۰ روزه لوبیا چیتی و لوبیا سبز. هر ستون شامل سه تکرار و بارهای عمودی نشانگر خطای معیار ($\pm SE$) می‌باشد.



شکل ۳: تأثیر تنش شوری (کلرید سدیم ۵۰ میلی مولار) و تغذیه سیلیکونی (۰/۵ و ۱ میلی مولار) بر (الف) میزان Na^+ بخش هوایی، (ب) میزان Na^+ ریشه، (ج) میزان K^+ بخش هوایی و (د) میزان K^+ ریشه در گیاهچه‌های ۴۰ روزه لوبیا چیتی و لوبیا سبز. هر ستون شامل سه تکرار و بارهای عمودی نشانگر خطای معیار ($\pm SE$) می‌باشد.

علاوه بر این، نتایج نشان داد در ریشه‌های لوبیا چیتی تأثیر مثبت سیلیکون بر نگهداشت K^+ در سطح ۱ میلی مولار اختلاف معنی‌داری با سطح ۰/۵ میلی مولار دارد ($p < 0.05$).

در تیمار شوری تنها، کاهش معنی‌دار غلظت K^+ در ریشه‌های ارقام لوبیا -در مقایسه با بخش‌های هوایی- می‌تواند گویای آن باشد که بافت‌های ریشه‌ای تامین کننده K^+ مورد نیاز بخش‌های هوایی در تنش شوری است، زیرا این اندام‌های هوایی به ویژه برگ‌ها هستند که فعالانه در متابولیسم‌های حیاتی گیاه به خصوص فتوسنتز شرکت داشته و تامین عناصر و مواد غذایی برای

آنها در الویت نقل و انتقالات قرار می‌گیرد. در عین حال، تاثیر سیلیکون بر افزایش میزان K^+ در ریشه‌ها بیش از اندام‌های هوایی بود.

با مقایسه بیوماس (به عنوان موثرترین شاخص تحمل گیاه به تنش شوری) در این دو رقم، ملاحظه می‌شود که لوبیا چیتی رقم حساستری به شوری است. علاوه بر این، نه تنها تجمع Na^+ در بافتهای لوبیا سبز - به‌ویژه در اندام‌های هوایی - کمتر از لوبیا چیتی بود بلکه میزان کاهش K^+ آنها - به‌ویژه در اندام‌های هوایی - نیز پایین‌تر بود. به دیگر سخن، بافتهای لوبیا سبز - به‌ویژه در اندام‌های هوایی - به نحو موثرتری توانسته‌اند میزان K^+ را در سلول‌های تحت تنش، حفظ نمایند. ممکن است کمبود K^+ در اندام‌های هوایی لوبیا سبز تا حدی با پتاسیم موجود در ریشه‌ها برطرف شده باشد. معلوم شده است گلیکوفیت‌هایی که به شوری متحمل‌ترند از توانایی بالاتری در نگهداشت K^+ و نیز کاهش تجمع Na^+ در بافتهای خود برخوردارند، یعنی مشابه با حالتی که در لوبیا سبز دیده شد. با در نظر گرفتن این نکته می‌توان ادعان کرد که تحمل بالاتر لوبیا سبز به شوری می‌تواند ناشی از حفظ پتاسیم سیتوپلاسمی در این رقم باشد. همسو با این مطلب، برخی گزارشات نشان داده‌اند که سیلیکون نسبت بالاتر K^+/Na^+ را در برابر اثرات سمی سدیم القاء می‌نماید (Liang et al., 2003). Zuccarini (۲۰۰۸) نیز بیان داشته است استفاده از سیلیکون در گیاه لوبیا می‌تواند آفت محتوای K^+ ناشی از تنش شوری را به‌ویژه در ریشه‌ها برطرف نماید. در این بین، اگرچه رقم لوبیا سبز در شرایط شوری رقم متحمل‌تری به نظر می‌رسید ولی در مقایسه با رقم لوبیا چیتی، کمترین تاثیر را از سودمندی تغذیه سیلیکونی به نمایش گذاشت.

نتیجه گیری کلی

در مجموع می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مفید بودن سیلیکون در کاهش اثرات منفی کلرید سدیم در دو رقم لوبیا سبز و لوبیا چیتی کاملاً یکسان نیست؛ چنانچه رقم حساستر به شوری (لوبیا چیتی) مزیت بیشتری از تغذیه سیلیکونی عاید خود نمود. علاوه بر این، به نظر می‌رسد سیلیکون در لوبیا چیتی تحمل به شوری را نه تنها از طریق ممانعت از ورود سدیم اضافی بالا می‌برد، بلکه همچنین با کاستن از نفوذپذیری غشاءهای سیتوپلاسمی و نیز نگهداشت بهتر محتوای نسبی آب برگ‌ها، به نحو موثری باعث ارتقای رشد گیاه تحت تنش شوری می‌شود.

منابع

اشکاوند، پ.، طبری کوچکسرایبی، م.، زرافشار، م. و قنبری، ا. ۱۳۹۵. اثر نانوذرات سیلیکا ($NPs \text{ } \gamma\text{-SiO}_2$) روی صفات رویشی و فیزیولوژیکی نهال زالزالک زرد. علوم و فناوری چوب و جنگل (علوم کشاورزی و منابع طبیعی). دوره ۲۳ شماره ۱، ص

۴۱-۶۱

اکبری مقدم، ح. ۱۳۹۱. تسهیم ماده خشک و عکس العمل‌های مورفوفیزیولوژیکی ارقام گندم تحت تأثیر تنش خشکی در مراحل مختلف رشد. پایان نامه دکتری زراعت، دانشکده کشاورزی دانشگاه زابل، ص ۱۵۱.

حداد، ر. و مشیری، ز. ۱۳۸۹. تأثیر سیلیکون در افزایش تحمل به خشکی در مرحله دو برگگی گیاه جو. ژنتیک نوین. جلد ۵ شماره ۴، ص ۴۷-۵۸.

خواجه، م.، موسوی نیک، س. م.، سیروس مهر، ع.، یدالهی ده چشمه، پ. و امیری، ا. ۱۳۹۴. اثر تنش کم آبی و محلول پاشی سیلیکون بر عملکرد و رنگیزه های فتوسنتزی گندم در منطقه سیستان. فیزیولوژی گیاهان زراعی. دوره ۷ شماره ۲۶، ص ۱۹-۵.

طالع احمد، س. و حداد، ر. ۱۳۸۹. اثر سیلیکون بر فعالیت آنزیم‌های ضد اکسنده و محتوای تنظیم کننده‌های اسمزی در دو ژنوتیپ گندم نان در شرایط تنش خشکی. مجله به زراعی نهال و بذر. جلد ۲۶ شماره ۲، ص ۲۰۷-۲۲۵.

Ahmad, R., Zaheer, S.H. and Ismail, S. (1992) Role of silicon in salt tolerance of wheat (*Triticum aestivum*). *Plant Science* 85: 43-50.

Ahmed, M., Asif, M. and Hassan, F. U. (2014) Augmenting drought tolerance in sorghum by silicon nutrition. *Acta Physiologiae Plantarum* 36(2): 473-483.

Bates, L. S., Waldren, R. P. and Teare, I. D. (1973) Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39(1): 205-207.

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* 29: 1970-1979.

Haghighi, M., Afifipour, Z. and Mozafarian, M. (2012) The alleviation effect of silicon on seed germination and seedling growth of tomato under salinity stress. *Vegetable Crops Research Bulletin* 76: 119-126.

Kaya, C., Tuna, A. L., Sonmez, O., Ince, F. and Higgs, D. (2009) Mitigation effects of silicon on maize plants grown at high zinc. *Journal of Plant Nutrition* 32(10): 1788-1798.

Liang, Y.C., Chen, Q., Liu, Q., Zhang, W.H. and Ding, R.X. (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.

Munns, R., Husain, S., Rivelli, A. R., James, R., Condon, A. G., Lindsay, M., Lagudah, E., Shachtman, D. and Hare, R. (2002) Avenues for increasing salt tolerance of crops, and the role of physiologically-based selection traits. *Plant and Soil* 247: 93-105.

Neumann, D. and De Figueiredo, C. (2002) A novel mechanism of silicon uptake. *Protoplasma* 220: 59-67.

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. *Pakistani Journal of Botany* 42(3): 1675-1684.

Pavlovic, J., Samardzic, J., Maksimović, V., Timotijevic, G., Stevic, N., Laursen, K. H. ... and Nikolic, M.

- (2013) Silicon alleviates iron deficiency in cucumber by promoting mobilization of iron in the root apoplast. *New Phytologist* 198(4): 1096-1107.
- Richmond, K.E. and Sussman, M. (2003) Got Silicon? The non-essential beneficial plant nutrition. *Current Opinion in Plant Biology* 6: 268-272.
- Rodrigues, F.A., Benhamou, N., Datnoff, L.E., Jones, J.B. and Be'langer, R.R. (2003) Ultrastructural and cytochemical aspects of silicon-mediated rice blast resistance. *Phytopathology*, 93: 535-546.
- Roshandel, P. (2005) Physiology and gene expression of two genotypes of rice differing in tolerance to salinity. PhD thesis. Sussex University, Brighton, UK.
- Sharma, K.D. and Kuhad, M.S. (2006) Influence of Potassium level and soil moisture regime on biochemical metabolites of Brassica Species. *Brassica Journal* 8: 71-74.
- Shi, Y., Zhang, Y., Yao, H., Wu, J., Sun, H. and Gong, H. (2014) Silicon improves seed germination and alleviates oxidative stress of bud seedlings in tomato under water deficit stress. *Plant Physiology and Biochemistry* 78: 27-36.
- Lichtenthaler, H. K. and Buschmann, C. (2001) Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. In: *Current protocols in food analytical chemistry*, F4.3.1-F4.3.8. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Tuna, A.L., Kaya, G., Higgs, D., Bernardo, M.D., Aydemir, S. and Girgin, A.R. (2008) Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. *Environmental and Experimental Botany* 62:10-16.
- Wang, Y., Stass, A. and Horst, W. (2004) Apoplastic binding of aluminium is involved in silicon-induced amelioration of aluminium toxicity in maize. *Plant Physiology* 136: 3762-3770.
- 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.
- Yin, L., Wang, S., Liu, P., Wang, W., Cao, D., Deng, X. and Zhang, S. (2014) Silicon-mediated changes in polyamine and 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid are involved in silicon-induced drought resistance in *Sorghum bicolor* L. *Plant Physiology and Biochemistry* 80: 268-277.
- Zarafshar, M., Akbarinia, M., Askari, H., Hosseini, S. M., Rahaie, M. and Struve, D. (2015) Insignificant acute toxicity of SiO₂ nanoparticles to pear seedlings. *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 11 (1): 13-22.
- Zhu, Z.J., Wei, G.Q., Li, J., Qian, Q.Q. and Yu, J.Q. (2004) Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Science* 167: 527-533.
- Zuccarini, P. (2008) Effects of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of *Phaseolus vulgaris* under NaCl stress. *Biologia Plantarum* 52(1): 157- 160.