تأثیر تغذیه سیلیکونی بر پارامترهای فیزیولوژیک گیاه ذرت

کورش دلاور[۱]، فائزه قناتی[۱*]، حسن زارع مایوان[۱] و مهرداد بهمنش[۲]

[۱] دانشگاه تربیت مدرس تهران، دانشکده علوم زیستی، گروه زیست شناسی گیاهی

[۲] دانشگاه تربیت مدرس تهران، دانشکده علوم زیستی، گروه ژنتیک

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۰۵، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۶/۰۳/۳۰)

چکیده

سیلیکون اگرچه هنوز در زمره عناصر ضروری برای گیاهان قرار نمی‌گیرد و از آن بیشتر تحت عنوان "شبه ضروری" یاد می‌شود اما اثرات مفید آن در بسیاری از گیاهان به خوبی شناخته شده است. در پژوهش حاضر اثر غلظت‌های صفر، ۰/۲، ۱، ۲، ٤ و ٦ میلی مولار سیلیکون بر روی تعدادی از پارامترهای رشدی و فیزیولوژیک گیاهان ۵ هفته‌ای ذرت در شرایط کشت هیدروپونیک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سیلیکون در غلظت‌های متوسط (۱ و ۲ میلی مولار) باعث افزایش رشد گیاه و محتوای رنگدانه ای آن شد و بر این اساس احتمال دارد که افزایش محتوای رنگدانه‌ای گیاه توسط سیلیکون سبب افزایش رشد گیاه شده باشد. همچنین سیلیکون در این غلظت‌ها فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان (CAT، SOD و APX) را افزایش داد، در حالیکه سبب کاهش محتوای پرولین اندام‌های هوایی شد. سیلیکون جذب پتاسیم را در گیاه افزایش داد و با توجه به وجود همبستگی مثبت بین محتوای پتاسیم و میزان بیوماس گیاه احتمال می‌رود که از این طریق نیز در بهبود رشد گیاه تأثیر داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های آنتی اکسیدان، ذرت، سیلیکون

مقدمه

در طول چند دهه اخیر نتایج تعدادی زیادی از پژوهش‌های مزرعه ای، گلخانه‌ای و آزمایشگاهی اثرات مفید کاربرد کودهای سیلیکونی را بر گیاهان مختلف از جمله برنج، ذرت، گندم، جو و نیشکر نشان داد. استفاده از کودهای سیلیکونی از یک سو موجب تقویت سیستم حفاظتی گیاه در برابر بیماری‌ها، حمله حشرات و شرایط نامساعد محیطی می‌شود، و از سوی دیگر تیمار خاک با ترکیبات حاوی سیلیکون فعّال از نظر ژئوشیمیایی سبب بهبود وضعیّت آب در خاک، بهبود ویژگی های شیمیایی و فیزیکی خاک و افزایش قابلیّت دسترسی عناصر غذایی برای گیاه شده و از این طریق حاصلخیزی خاک را افزایش می‌دهد (Snyder *et al.*, 2006).

سیلیکون (Si) بر اساس تعریف Arnon and Stout (۱۹۳۹) جزو عناصر ضروری برای گیاهان محسوب نمی‌شود زیرا شواهد قاطعی در زمینه نقش سیلیکون در متابولیسم وجود ندارد. البته Epstein عقیده دارد که اثبات غیر ضروری بودن سیلیکون امری دشوار است زیرا حذف کامل آن از محیط غذائی و بنابراین فراهم سازی گروه شاهد واقعی در عمل امکان پذیر نیست (Epstein, 1994). مطالعات نشان می‌دهد که حتی آب کاملاً خالص نیز حاوی حدود 20 nM سیلیکون است

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: ghangia@modares.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1397.7.27.6.7]

(Warner and Roth, 1983). با این وجود، تعریف جدیدی برای عناصر ضروری توسط Epstein and Bloom (۲۰۰۳) ارائه شده است که بر اساس آن عنصری که یک یا هر دو شرط زیر را داشته باشد جزو عناصر ضروری برای گیاهان محسوب می‌شود:

(۱) آن عنصر بخشی از یک ملکول باشد که خود آن ملکول بطور طبیعی در ساختار یا متابولیسم گیاه نقش داشته باشد. (۲) کمبود شدید آن در گیاه اختلالاتی را در رشد، نمو یا تولید مثل، و یا بطور خلاصه "عملکرد" گیاه در مقایسه با گیاهی که با کمبود متوسط آن عنصر مواجه است بوجود بیاورد. بنابراین با توجه به اینکه کمبود سیلیکون اختلالات مختلفی را در طیف متنوعی از گیاهان ایجاد می‌کند، می‌توان آن را یک عنصر " شبه ضروری" (quasi-essential) به شمار آورد (Epstein and Bloom 2003).

سیلیکون در بافت‌های اپیدرمی به صورت یک لایه نازک سیلیکون–سلولز همراه با پکتین و یون‌های کلسیم تجمع پیدا می‌کند. این کوتیکول دو لایه علاوه بر نقش حفاظتی، در افزایش استحکام گیاه نیز نقش دارد. همچنین مطالعات نشان می‌دهد که سیلیکون از طریق القای واکنش‌های دفاعی در گیاهان در تعدیل انواع تنش‌های زیستی نقش مهمی را ایفا می کند (Snyder *et al.*, 2006). در گیاه ذرت نیز به کارگیری کودهای سیلیکونی در تعدیل انواع تنش‌های غیر زیستی نظیر تنش شوری (Xie *et al.*, 2015)، آلومینیوم (Hodson and Evans, 1995) و منگنز (Sahebi *et al.*, 2015) نقش دارد. در سایر گیاهان نیز نقش مثبت سیلیکون در تعدیل انواع تنش‌های زیستی و غیر زیستی گزارش شده است (Ma and Yamaji, 2008).

در پژوهش حاضر به منظور درک چگونگی عملکرد سیلیکون در گیاه ذرت، اثر غلظت‌های مختلف آن بر روی تعدادی از پارامترهای رشدی و فیزیولوژیک گیاه در شرایط کشت هیدروپونیک مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. در انتخاب پارامترها به جنبه‌های مختلف فیزیولوژی گیاه توجه گردید و همچنین به دلیل تعداد زیاد تیمارها و پارامترها، علاوه بر محاسبات آماری معمول، از تصاویر Heatmap نیز کمک گرفته شد.

مواد و روش‌ها

آماده سازی و کشت گیاهان: بذرهای ذرت واریته مریت (*Zea mays* var. Merit) پس از ضد عفونی در بستر حاوی پرلیت استریل کشت شده و به مدت یک هفته با آب مقطر استریل آبیاری شدند. سپس دانه رست‌های هم اندازه و سالم انتخاب و به محیط کشت هیدروپونیک انتقال یافتند. محیط کشت هیدروپونیک شامل ظرف‌های پلاستیکی تیره رنگ ۱/۵ لیتری بود که با محلول غذائی لانگ اشتون (Long Ashton) (Hewitt, 1966) و تیمار مورد نظر سیلیکون پر شده بودند. محلول ظرف‌ها دائماً هوا دهی شده و هر ۵ روز یکبار تعویض می‌شدند. شرایط pH تمامی محلول‌های غذائی ۵/۵ در نظر گرفته شد. هر ظرف حاوی ۲ دانه رست بوده که مجموعاً به عنوان یک تکرار در نظر گرفته می‌شد. گیاهان در محیط کنترل شده گلخانه با دوره نوری ١٦ ساعت روشنایی و ٨ ساعت تاریکی و دمای شب و روز ٢ ± ١٦ و ٢ ± ٢٤ درجه سانتی‌گراد و متوسط شدت نور 250 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$، نگهداری شدند.

محلول‌های غذائی حاوی غلظت‌های صفر، ۰/۲، ۱، ۲، ٤ و ٦ میلی‌مولار سیلیکون تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند. سیلیکون به صورت متاسیلیکات سدیم ($Na_2SiO_3.5H_2O$) به کار برده شد. گیاهان به مدت ٤ هفته تحت تیمارهای ذکر شده قرار گرفته و سپس برداشت شده و پارامترهای مختلف در آنها اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد و تعداد تکرار برای هر تیمار ۵ ظرف ۱/۵ لیتری بود و هر ظرف نیز حاوی دو گیاه بود. در پایان هر آزمایش نیز یکی از دو گیاه هر ظرف بصورت تصادفی انتخاب و پس از اندازه‌گیری وزن تر و خشک جهت سنجش‌هایی که نیاز به ماده‌ی خشک داشتند مورد استفاده قرارگرفت. گیاه دوم نیز بلافاصله در ازت مایع فریز و به فریزر 80ºC- منتقل می‌شد

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1397.7.27.6.7]

تا در سنجش‌هائی که نیاز به ماده گیاهی تازه دارند مورد استفاده قرار بگیرد.

سنجش‌ها: پس از برداشت گیاه و اندازه‌گیری وزن تر ریشه و اندام‌های هوایی، وزن خشک آنها نیز پس از خشک کردن نمونه‌ها در آون در دمای ۷۰ درجه سانتیگرد به مدت ٤٨ ساعت تا رسیدن نمونه‌ها به وزن ثابت اندازه‌گیری گردید. میزان کلروفیل‌های a و b به روش Porra و همکاران (۱۹۸۹) و کاروتنوئید به روش Holm (۱۹٥٤) اندازه‌گیری شد. بر اساس این روش‌ها پس از تهیه عصاره گیاهی، شدت جذب آن در طول موج‌های 440.5، 646.6 و 663.6 نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر RAYLEIGH مدل UV-1601 خوانده شد. در پایان غلظت رنگیزه‌های مورد نظر با استفاده از فرمول‌های مربوطه محاسبه گردید. برای اندازه‌گیری مقدار پرولین از روش Bates و همکاران (۱۹۷۳)استفاده شد. در این روش مقدار معینی نمونه گیاهی تر با استفاده از محلول اسید سولفوسالسیلیک، معرف نین هیدرین و اسید استیک و طی مراحل مختلف عصاره‌گیری و آماده سازی شده و در نهایت شدت جذب ماده رنگی حاصل در طول موج ۵۲۰ نانومتر خوانده شده و با استفاده از منحنی استاندارد غلظت پرولین محاسبه گردید. برای اندازه‌گیری پروتئین کل از روش Bradford (۱۹۷٦) استفاده شد و میزان قندهای احیاکننده در برگ‌ها نیز با استفاده از روش (Somogy – Nelson, 1952) اندازه‌گیری شد. در روش اخیر از محلول‌های سولفات مس و فسفومولبیدیک اسید جهت تهیه عصاره رنگین استفاده شد که در این حالت شدت جذب محلول در طول موج ٦۰۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر خوانده شده و غلظت قندهای احیاکننده بر اساس آن محاسبه گردید.

برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌ها ابتدا بافت گیاهی تر را با محلول بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی مولار (pH=۷/۵) که حاوی تریتون ۱ درصد بود بر روی یخ سائیده و سپس نمونه‌ها به مدت یک ساعت در یخچال قرار داده شدند. پس از آن عصاره‌ها به مدت ۱۵ دقیقه با شدت g ۱۵۰۰۰ و در دمای ٤ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شدند. از محلول رویی جهت اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌ها استفاده شد. فعالیت آنزیم کاتالاز با استفاده از روش Aebi (۱۹۸٤) اندازه‌گیری شد. در این روش به مخلوط واکنش (شامل بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار pH ۷، و آب اکسیژنه ۱۵ میلی‌مولار) عصاره‌ی آنزیمی اضافه و تغییرات جذب در ۲٤۰ نانومتر به مدت یک دقیقه ثبت شد. میزان فعالیت آنزیم با استفاده از ضریب خاموشی معادل ۳/۹٤ $mM^{-1}cm^{-1}$ محاسبه و بر حسب یک واحد (میکرومول پراکسید هیدروژن مصرف شده در دقیقه) به ازای میلی‌گرم پروتئین بیان گردید. برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز از روش Gianopolitis و Ries (۱۹۷۷) و با استفاده از سنجش مهار احیا نوری نیتروبلوتترازولیوم (NBT) در طول موج ٥٦۰ نانومتر استفاده شد. مخلوط واکنش در این روش شامل EDTA ۰/۱ میلی مولار، نیتروبلوتترازولیوم (NBT) ۷۵ میکرومولار، متیونین ۱۳ میلی‌مولار و ریبوفلاوین ٤ میکرومولار و بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی مولار (pH=۷/۵) بود. پس از اضافه کردن عصاره گیاهی و قرار دادن آن در معرض روشنایی لامپ فلورسنت (٤۰W) و گذشت ۸ دقیقه جذب نمونه‌ها در طول موج ٥٦۰ نانومتر خوانده شد. با اندازه‌گیری اختلاف جذب نمونه‌ها و شاهد در ٥٦۰ و استفاده از فرمول‌های مربوطه، فعالیت آنزیمی بر حسب واحد آنزیم در مقدار پروتئین کل محاسبه گردید. برای سنجش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز از روش Nakano و Asada (۱۹۸۱) استفاده شد. مخلوط واکنش شامل بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار (pH ۷)، آسکوربات (۰/۵ mM)، H_2O_2 (۱mM)، اتیلن دی‌آمین - ترا استیک اسید (EDTA) (۰/۱mM) و عصاره آنزیمی بود. برای اندازه‌گیری پیشرفت واکنش آنزیمی در زمان، دستگاه اسپکتروفتومتر UV-visible بر روی حالت Kinetic در طول موج ۲۹۰ نانومتر تنظیم شد. سرعت واکنش آنزیمی به صورت تغییرات جذب در واحد زمان (OD/min) در طول موج ۲۹۰ نانومتر برای مدت یک دقیقه ثبت و میزان فعالیت آنزیم محاسبه شد.

جهت اندازه‌گیری محتوای عناصر معدنی، ابتدا ۰/۵ گرم بافت گیاهی خشک (ریشه و برگ) را در ۱۰ میلی‌لیتر اسید

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1397.7.27.6.7]

نیتریک غلیظ به مدت ۲٤ ساعت قرار داده تا نمونه گیاهی به خوبی در اسید حل شود. سپس عصاره حاصل را بر روی بستر شن داغ گرم کرده تا بخارات اسیدی از محلول خارج شوند. پس از آن حجم محلول را با آب مقطر به ۳۰ میلی‌لیتر رسانده و از کاغذ صافی عبور داده شدند. از عصاره به دست آمده جهت اندازه‌گیری مقدار عناصر سدیم، پتاسیم، آهن، کلسیم و منیزیم بوسیله دستگاه جذب اتمی مدل AASpect 203 استفاده شد (امامی، ۱۳۷۵).

تجزیه و تحلیل آماری: محاسبات آماری بر اساس طرح فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تا ۵ تکرار انجام شد. آنالیز داده‌ها با کمک نرم افزار SPSS و رسم نمودارها نیز با کمک نرم افزار EXCEL صورت گرفت. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن و T-test در سطح احتمال ۵٪ انجام گرفت. علاوه بر محاسبات آماری فوق، کلیه داده‌ها با کمک نرم افزار MeatataboAnalyst که به صورت آنلاین در سایت www.metaboanalyst.ca قرار داشت، به صورت تصاویر Heatmap ترسیم شدند. برای اینکار ابتدا فایل داده‌ها بصورت یک فایل اکسل یا فرمت CSV (Comma delimited) تنظیم شده و در سایت ذکر شده آپلود شدند. پس از انجام محاسبات توسط نرم افزار، فایل نتایج به صورت zip شده دانلود گردید و از بین داده‌ها اشکال مربوط به Correlation و Heatmaps استخراج و از آنها در تجزیه و تحلیل داده و تفسیر نتایج استفاده شد.

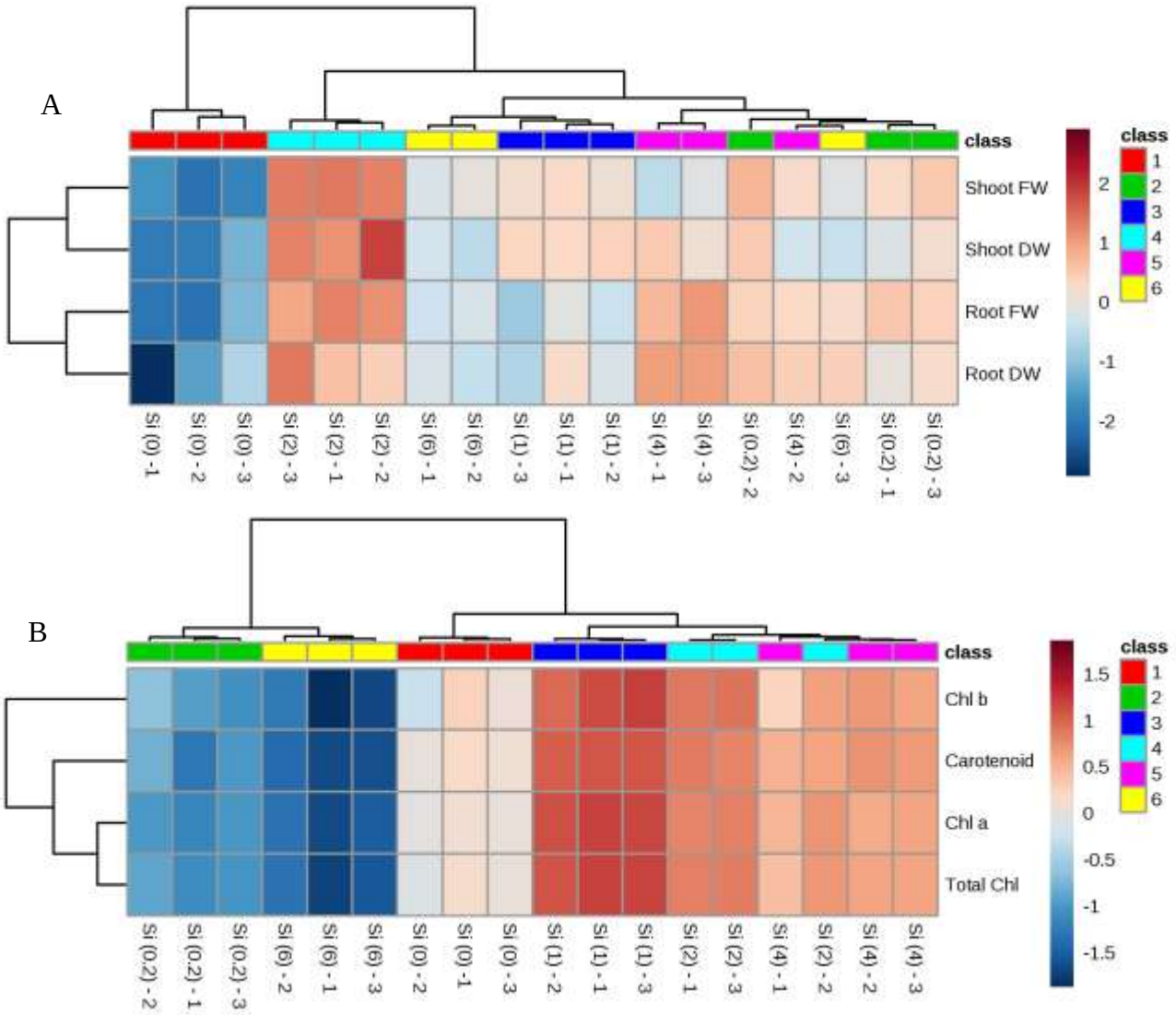
نتایج و بحث

سیلیکون و رشد گیاه ذرت: نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش غلظت سیلیکون تا حد ۲mM رشد گیاه (شامل وزن تر و خشک) افزایش پیدا کرد و سپس با افزایش غلظت سیلیکون (تا ٤ و سپس ٦ میلی مولار) از میزان رشد کاسته شد (شکل A-۱ و جدول ۱). این نتایج تأثیر وابسته به غلظت (dose dependent) سیلیکون را بر روی رشد گیاه ذرت نشان می‌دهد. غلظت بهینه سیلیکون بر اساس این نتایج غلظت ۲mM بود. در این زمینه Moussa (۲۰۰٦) در گیاه ذرت مشاهده کرد که تیمار ۳mM سیلیکون وزن خشک برگ‌ها را افزایش داد اما بر روی وزن خشک ساقه‌ها و ریشه‌ها اثری نداشت. همچنین Corrales و همکاران (۱۹۹۷) نیز گزارش کردند که اعمال تیمار ۱mM سیلیکون وزن خشک ریشه‌ها و ساقه‌های ذرت را بطور مشخصی بالا برد. اما Gao و همکاران (۲۰۰٤) هیچ افزایشی را در وزن تر و خشک ریشه‌ها و اندام‌های هوایی ذرت هنگام اعمال تیمار ۱mM سیلیکون مشاهده نکردند. در گیاهان دیگر نظیر سویا نیز تیمار ۱/۷mM سیلیکون اگرچه روی وزن خشک ساقه‌ها اثری نداشت اما وزن خشک ریشه‌ها را افزایش داد (Shen *et al.*, 2010). البته Lee و همکاران (۲۰۱۰) نیز افزایش وزن خشک گیاه سویا را هنگام اعمال تیمار ۲/۵mM سیلیکون گزارش کردند. در مجموع می‌توان گفت که بیشتر گزارش‌ها حاکی از اثر مثبت سیلیکون در افزایش رشد گیاه ذرت می‌باشند. در مورد مکانیسم اثر سیلیکون در افزایش رشد گیاهان در شرایط عادی (بدون تنش) اطلاعات زیادی موجود نیست و بیشتر تحقیقات در مورد مکانیسم عمل این عنصر در شرایط تنش صورت گرفته است. با این وجود برخی گزارش‌ها بهبود ساختاری گیاه، و افزایش استحکام و برافراشتگی آن توسط سیلیکون را که منجر به دریافت بهتر نور و بهبود فتوسنتز گیاه می‌شود به عنوان یکی از مکانیسم‌های اثر این عنصر عنوان کرده‌اند (Lana *et al.*, 2003).

سیلیکون و محتوای رنگدانه‌ها: غلظت‌های متوسط و بهینه سیلیکون باعث افزایش محتوای هر سه رنگدانه مورد بررسی یعنی کلروفیل‌های a و b و کاروتنوئیدهای گیاه شد، اما غلظت بالای و پایین این عنصر محتوای این رنگدانه‌ها را کاهش دادند (شکل B-۱ و جدول ۱). بطور مشابهی Shen و همکاران (۲۰۱۰) در گیاه سویا اثر مثبت سیلیکون را در افزایش محتوای کلروفیلی گیاه مشاهده کردند. اما Mussa (۲۰۰٦) گزارش کرد که اعمال تیمار سیلیکون ۳mM باعث کاهش محتوای کلروفیل‌های a و b در گیاه ذرت گردید. همچنین Farshidi و همکاران (۲۰۱۲) در گیاه کانولا تغییری را در محتوای کلروفیل‌های a و b هنگام اعمال تیمار ۱/۷mM سیلیکون مشاهده نکردند. بنابراین نتایج کاملاً متفاوتی در زمینه اثر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1397.7.27.6.7]



شکل ۱- طرح Heatmap مربوط به تأثیر غلظت‌های مختلف سیلیکون بر روی وزن تر و خشک ریشه‌ها و اندام‌های هوایی (A) و محتوای رنگدانه‌ای (B) گیاه ذرت. رنگ‌های قهوه‌ای تیره بیان‌گر مقادیر بالاتر و رنگ‌های آبی تیره بیان‌گر مقادیر کمتر هر رنگدانه می‌باشند. کلیه اعداد نرمالیزه شده‌اند. محور افقی پایین تکرارهای ۱ تا ۳ از تیمارهای ۰، ۰/۲، ۱، ۲، ٤ و ٦ میلی‌مولار سیلیکون را نشان می‌دهند (به عنوان مثال ستون Si (4) – 3 یعنی تکرار سوم از تیمار حاوی سیلیکون ٤ mM). محور عمودی سمت راست نیز پارامترهای مورد اندازه‌گیری (در اینجا وزن تر و خشک یا محتوای رنگدانه‌ای گیاه) را نشان می‌دهد. دندروگرام‌های بالای شکل میزان شباهت و نزدیکی بین تکرارها و تیمارها، و دندروگرام‌های سمت چپ شکل نیز میزان شباهت و نزدیکی بین پارامترهای مورد بررسی را نشان می‌دهند.

سیلیکون بر روی محتوای رنگدانه‌ای گیاهان وجود دارد. علت این تفاوت‌ها ممکن است به تفاوت در نوع گیاهان و یا غلظت سیلیکون بکار رفته و یا تفاوت در شرایط آزمایش برگردد. اینکه سیلیکون چگونه سبب افزایش محتوای رنگدانه‌ای گیاه می‌شود هنوز مشخص نیست.

سیلیکون و فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان: اثر غلظت های مختلف سیلیکون بر میزان فعالیت هر سه آنزیم کاتالاز، سوپر اکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز به طرز جالبی تقریباً مشابه بوده است. نتایج نشان داد که سیلیکون در غلظت های کم (۰/۲ و ۱ میلی مولار) تقریبا در بیشتر موارد باعث

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1397.7.27.6.7]

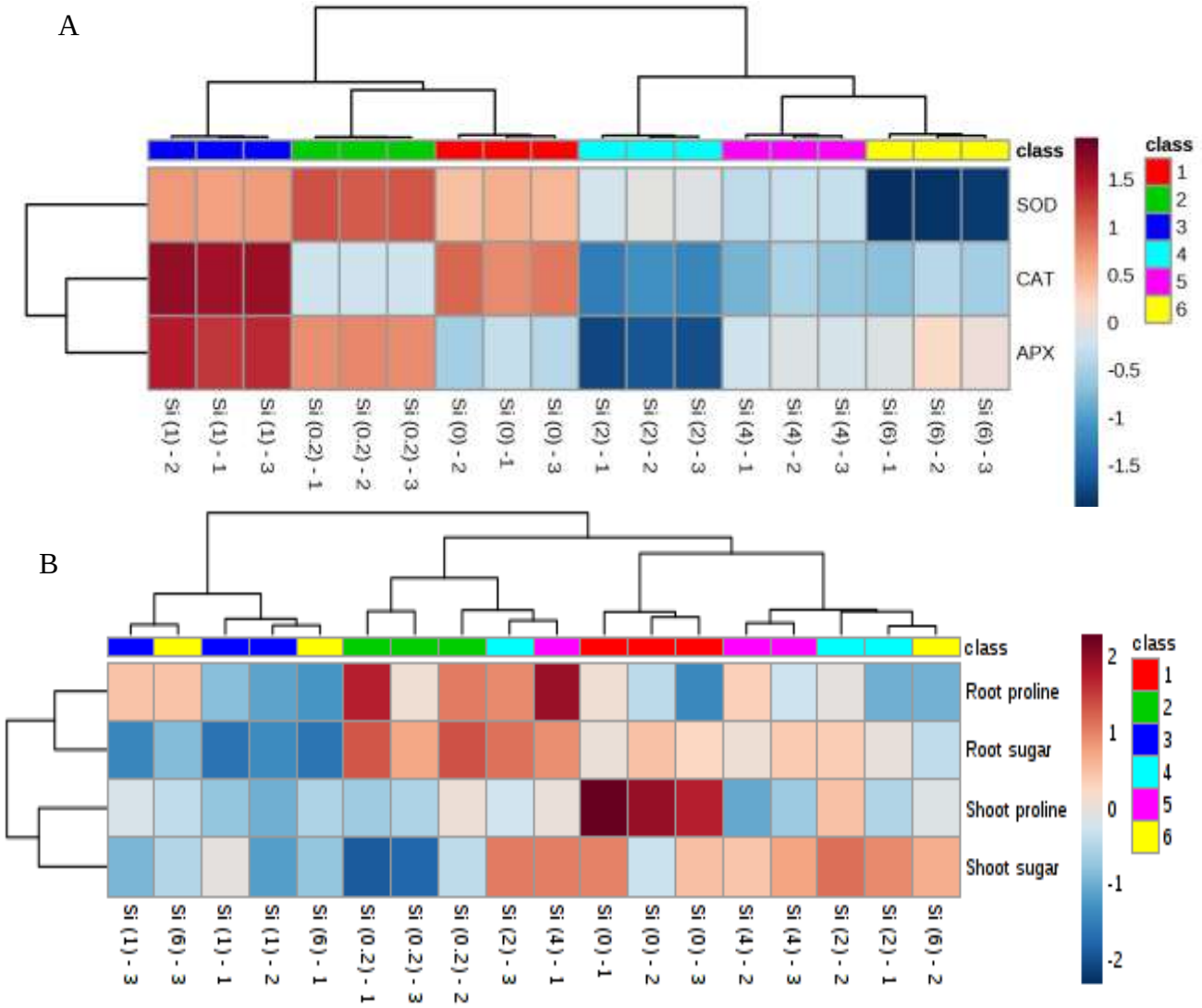
جدول ۱- اثر غلظت‌های مختلف سیلیکون بر وزن تر و خشک، محتوی رنگدانه‌ها، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، محتوای اسمولیت‌های سازگار و محتوای عناصر معدنی گیاه ذرت

پارامتر	غلظت سیلیکون (میلی مولار)					
	صفر	۰/۲	۱	۲	٤	٦
وزن تر ساقه (میلی گرم بر گیاه)	۵/۵۲ ± ۰/۲۵^{d}	۸/٦۷ ± ۰/۳۸^{b}	۸/۱٤ ± ۰/۱٦^{bc}	۱۰/۰۹ ± ۰/۰۸^{a}	۷/٦۸ ± ۰/۵٦^{c}	۷/٦۹ ± ۰/۱٤^{c}
وزن تر ریشه (میلی گرم بر گیاه)	٤/٦ ± ۰/۳۵^{e}	٦/۲٤ ± ۰/۰۷^{bc}	۵/۵۲ ± ۰/۲۹^{d}	٦/۸٤ ± ۰/۱۷^{a}	٦/٤۷ ± ۰/۳۵^{ab}	۵/۷۸ ± ۰/۲٦^{cd}
وزن خشک ساقه (میلی گرم بر گیاه)	۰/٤۱ ± ۰/۰۲^{d}	۰/۵٦ ± ۰/۰۳^{bc}	۰/۵۷± ۰/۰۱^{b}	۰/٦۸ ± ۰/۰٤^{a}	۰/۵۷ ± ۰/۰۳^{bc}	۰/۵۱ ± ۰/۰۱^{c}
وزن خشک ریشه (میلی گرم بر گیاه)	۰/۲۳ ± ۰/۰٤^{c}	۰/۳۱ ± ۰/۰۱^{ab}	۰/۲۹ ± ۰/۰۲^{b}	۰/۳٤ ± ۰/۰۲^{a}	۰/۳٤ ± ۰/۰۱^{a}	۰/۲۹ ± ۰/۰۲^{ab}
محتوی کلروفیل a (میکروگرم بر گرم وزن تر)	۰/۸۲ ± ۰/۰۲^{d}	۰/۵٦ ± ۰/۰۲^{e}	۱/۲۵ ± ۰/۰۲^{a}	۱/۰۸ ± ۰/۰۳^{b}	۱/۰۰ ± ۰/۰۲^{c}	۰/٤۷ ± ۰/۰۳^{f}
محتوی کلروفیل b (میکروگرم بر گرم وزن تر)	۰/٤۳ ± ۰/۰۳^{c}	۰/۳٤ ± ۰/۰۲^{d}	۰/۵٦ ± ۰/۰۲^{a}	۰/۵۲ ± ۰/۰۲^{ab}	۰/٤۸ ± ۰/۰۳^{b}	۰/۲۸ ± ۰/۰۲^{e}
محتوی کلروفیل کل (میکروگرم بر گرم وزن تر)	۱/۲٦ ± ۰/۰۵^{d}	۰/۹ ± ۰/۰۳^{e}	۱/۸۱ ± ۰/۰۳^{a}	۱/٦۱ ± ۰/۰٤^{b}	۱/٤۹ ± ۰/۰۵^{c}	۰/۷٦ ± ۰/۰۵^{f}
محتوی کاروتن (میکروگرم بر گرم وزن تر)	۰/۵ ± ۰/۰۱^{c}	۰/۳۳ ± ۰/۰۳^{d}	۰/۷۲ ± ۰/۰۱^{a}	۰/٦٤ ± ۰/۰۳^{b}	۰/٦۱ ± ۰/۰۲^{b}	۰/۲۷ ± ۰/۰۱^{e}
فعالیت کاتالاز (میکرومول بر دقیقه بر گرم وزن تر)	۹۸/۲ ± ٤/۱^{b}	٦۱/۹ ± ۰/۹^{c}	۱۳۱/۲ ± ۲/۲^{a}	٤۱/۸ ± ۱/٤^{e}	۵۲/۸ ± ۳/٤^{d}	۵٤/٦ ± ۳/۲^{d}
فعالیت SOD (میکرومول بر دقیقه بر گرم وزن تر)	۲۵/۵ ± ۲/٦۲^{c}	٦۵/۰ ± ۳/۱۷^{a}	۳٤/۸ ± ۱/۰۳^{b}	۱۱/۵ ± ۱/۰۵^{d}	۸/۷ ± ۰/٤۷^{d}	۰/۹۱ ± ۰/۰٦^{e}
فعالیت APX (میکرومول بر دقیقه بر گرم وزن تر)	۲/٤ ± ۰/۱۹^{e}	۵/٤٦ ± ۰/۰۹^{b}	۸/۲٤ ± ۰/٤۲^{a}	۱/۰۰ ± ۰/۰٤^{f}	۲/۸۵ ± ۰/۱۱^{d}	۳/۳ ± ۰/٤۳^{c}
محتوی پرولین ساقه (میکروگرم بر گرم وزن تر)	۵۱/۱ ± ۲/۵۷^{a}	۳۳/۹ ± ۲/۳۲^{b}	۳۲/٤ ± ۲/۳۳^{b}	۳۵/۷ ± ۳/۲۸^{b}	۳۲/۸ ± ۳/۱٦^{b}	۳٤/۰۰ ± ۱/۲۵^{b}
محتوی پرولین ریشه (میکروگرم بر گرم وزن تر)	۳۱/۳ ± ۲/۲۸^{a}	۳٦/٤ ± ۲/۸۷^{a}	۳۱/٦ ± ۲/٦۳^{a}	۳۳/۱ ± ۳/۱۲^{a}	۳۵/٤ ± ٤/۰۳^{a}	۳۱/۳ ± ۲/۸٦^{a}
محتوی قند ساقه (میلی گرم بر گرم وزن خشک)	۲۱/۷ ± ۱/۷۱^{ab}	۱۷/٦ ± ۱/۷۹^{c}	۱۹/۰ ± ۱/۳۹^{c}	۲۳/۵ ± ۰/۳^{a}	۲۲/٦ ± ۰/۸^{ab}	۲۰/۳ ± ۱/۸۸^{bc}
محتوی قند ریشه (میلی گرم بر گرم وزن خشک)	۱۷/٤ ± ۰/٦٦^{b}	۲۰/۲ ± ۱/۲^{a}	۱۳/۰ ± ۰/۳۱^{c}	۱۸/۲ ± ۱/۷۹^{ab}	۱۸/۰۰ ± ۱/۲۹^{a}	۱٤/۲ ± ۱/٤٦^{c}
محتوی منیزم ساقه (میلی گرم بر گرم وزن خشک)	۲/۰۵ ± ۰/۰٦^{b}	۱/۲۵ ± ۰/۰۷^{d}	۱/۳۷ ± ۰/۱۳^{d}	۱/۱۹ ± ۰/۱۱^{d}	۲/٤۱ ± ۰/۱۲^{a}	۱/۷۵ ± ۰/۰٦^{c}
محتوی منیزم ریشه (میلی گرم بر گرم وزن خشک)	۲/۱٤ ± ۰/۰۸^{c}	۲/۵ ± ۰/۱۷^{b}	۳/۰۰ ± ۰/۱۷^{a}	۱/۹٤ ± ۰/۰۳^{c}	۲/۹٤ ± ۰/۲٦^{a}	۲/۲۳ ± ۰/۱۲^{bc}
محتوی کلسیم ساقه (میلی گرم بر گرم وزن خشک)	٤/۹۷ ± ۰/۱۵^{c}	٦/۱۱ ± ۰/۲٤^{a}	۳/۵٤ ± ۰/۲۲^{d}	۲/٦ ± ۰/۳۱^{e}	۵/٦۵ ± ۰/۲۲^{b}	۵/٤٤ ± ۰/۲۲^{b}
محتوی کلسیم ریشه (میلی گرم بر گرم وزن خشک)	۲/٤۵ ± ۰/۳۳^{b}	٤/۸۵ ± ۰/۳۰^{c}	۵/٦۵ ± ۰/۳^{ab}	۵/۸۸ ± ۰/۲۰^{ab}	٦/۱۱ ± ۰/۲٤^{a}	۳/٤۲ ± ۰/٤^{d}
محتوی پتاسیم ساقه (میلی گرم بر گرم وزن خشک)	۲/۹٤ ± ۰/۲۳^{d}	۷/٦۲ ± ۰/۵٦^{b}	۱۱/٤۱ ± ۰/۵۱^{a}	۷/٦٤ ± ۱/۱۹^{b}	٤/۰۰ ± ۰/٤^{cd}	٤/۸۲ ± ۰/۳۲^{c}
محتوی پتاسیم ریشه (میلی گرم بر گرم وزن خشک)	۵/۷٦ ± ۰/۲٦^{d}	۷/۲۹ ± ۰/۳۵^{bc}	۱۰/۱ ± ۰/۱۵^{a}	۷/۷٤ ± ۰/۳٤^{b}	٦/۸۲ ± ۰/٤۸^{c}	۵/۲۹ ± ۰/۲۳^{d}
محتوی آهن ساقه (میلی گرم بر گرم وزن خشک)	۰/۱۳ ± ۰/۰۱^{b}	۰/۱٤ ± ۰/۰۲^{b}	۰/۱٦ ± ۰/۰۳^{a}	۰/۱۷ ± ۰/۰۲^{a}	۰/۱۱ ± ۰/۰۱^{c}	۰/۱۱ ± ۰/۰۲^{c}
محتوی آهن ریشه (میلی گرم بر گرم وزن خشک)	۰/۲ ± ۰/۰۱^{a}	۰/۱٦ ± ۰/۰۱^{bc}	۰/۱۷ ± ۰/۰۲^{abc}	۰/۱۵ ± ۰/۰۱^{c}	۰/۱۹ ± ۰/۰۲^{ab}	۰/۱۷ ± ۰/۰۲^{abc}

مقادیر بیان‌گر میانگین سه تکرار ± SD (انحراف معیار) می‌باشند. حروف متفاوت نشان دهنده معنی‌دار بودن تفاوت‌ها در سطح $P \leq ۰/۰۵$ است.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1397.7.27.6.7]



شکل ۲- طرح Heatmap مربوط به تاثیر غلظت‌های مختلف سیلیکون بر روی فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان (A) و محتوای اسمولیت‌های سازگار (B) گیاه ذرت. رنگ‌های قهوه ای تیره بیانگر مقادیر بالاتر و رنگ‌های آبی تیره بیانگر مقادیر کمتر هر رنگدانه می‌باشند. کلیه اعداد نرمالیزه شده‌اند. محور افقی پایین تکرارهای ۱ تا ۳ از تیمارهای ۰، ۰/۲، ۱، ۲، ٤ و ٦ میلی‌مولار سیلیکون را نشان می‌دهند (به عنوان مثال ستون Si (4) – 3 یعنی تکرار سوم از تیمار حاوی سیلیکون 4 mM). محور عمودی سمت راست نیز پارامترهای مورد اندازه‌گیری (در اینجا فعالیت آنزیم‌ها یا محتوای اسمولیت‌های سازگار) را نشان می‌دهد. دندروگرام‌های بالای شکل میزان شباهت و نزدیکی بین تکرارها و تیمارها، و دندروگرام‌های سمت چپ شکل نیز میزان شباهت و نزدیکی بین پارامترهای مورد بررسی را نشان می‌دهند.

افزایش فعالیت آنزیم‌های فوق گردید اما در غلظت‌های ۲mM و بالاتر غالباً فعالیت این سه آنزیم را کاهش داد (شکل A-۲ و جدول ۱). به نظر می‌رسد که غلظت‌های کم سیلیکون باعث افزایش و غلظت‌های متوسط و بالای سیلیکون موجب کاهش فعالیت این آنزیم‌ها گردید.

Shi و همکاران (۲۰۱٤) در گوجه فرنگی، و Shen و همکاران (۲۰۱۰) در سویا نشان دادند که اعمال تیمار سیلیکون به ترتیب با غلظت‌های ۰/۵mM و ۱/۷mM تأثیری در میزان فعالیت دو آنزیم SOD و CAT نداشت. همچنین Farshidi و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که اعمال تیمار ۱/۷mM سیلیکون تأثیری در شدت فعالیت آنزیم‌های CAT و APX گیاه کانولا ندارد. با این وجود گزارش‌هایی هم مبنی بر افزایش

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1397.7.27.6.7]

فعالیت آنزیم SOD در جو (Liang, 1999) و ذرت (Moussa, 2006) نیز وجود دارد. همچنین Torabi و همکاران (۲۰۱۵) غلظت‌های ۰/۵تا ۲/۵ میلی‌مولار سیلیکون را بر گیاه گاوزبان مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که با افزایش غلظت سیلیکون فعالیت آنزیم‌های SOD و APX متناسب با آن افزایش یافت اما از شدت فعالیت آنزیم کاتالاز به تدریج کاسته شد. بنابراین بر اساس گزارش‌های فوق نمی‌توان نتیجه مشخصی در زمینه تأثیر یا عدم تأثیر سیلیکون بر فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی در گیاهان در شرایط رشد نرمال (بدون تنش) گرفت اگرچه نتایج پژوهش حاضر تأثیر سیلیکون را به روشنی تأیید می‌کند.

سیلیکون و محتوای اسمولیت‌های سازگار: بررسی اثر سیلیکون بر محتوای پرولین گیاه ذرت آشکار ساخت که اعمال تیمار سیلیکون در تمامی غلظت‌ها باعث کاهش محتوای پرولین اندام‌های هوایی گیاه گردید اما بر روی محتوای پرولین ریشه‌ها تأثیری نداشت (شکل B-۲ و جدول ۱). در این رابطه Shen و همکاران (۲۰۱۰)، و Lee و همکاران (۲۰۱۰) به ترتیب با اعمال تیمارهای ۱/۷mM و ۲/۵mM سیلیکون بر گیاه سویا نشان دادند که محتوای پرولین این گیاه تغییری نکرد. اما Moussa (۲۰۰۶) مشاهده کرد که تیمار ۳mM سیلیکون باعث افزایش محتوای پرولین در گیاه ذرت گردید. همچنین Torabi و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که با افزایش تدریجی غلظت سیلیکون محلول غذایی، محتوای پرولین برگ-های گیاه گاوزبان نیز افزایش پیدا کرد. بنابراین نتایج حاصل از این پژوهش در مورد محتوای پرولین گیاه ذرت با گزارش‌های فوق تا حدود زیادی متفاوت می‌باشد.

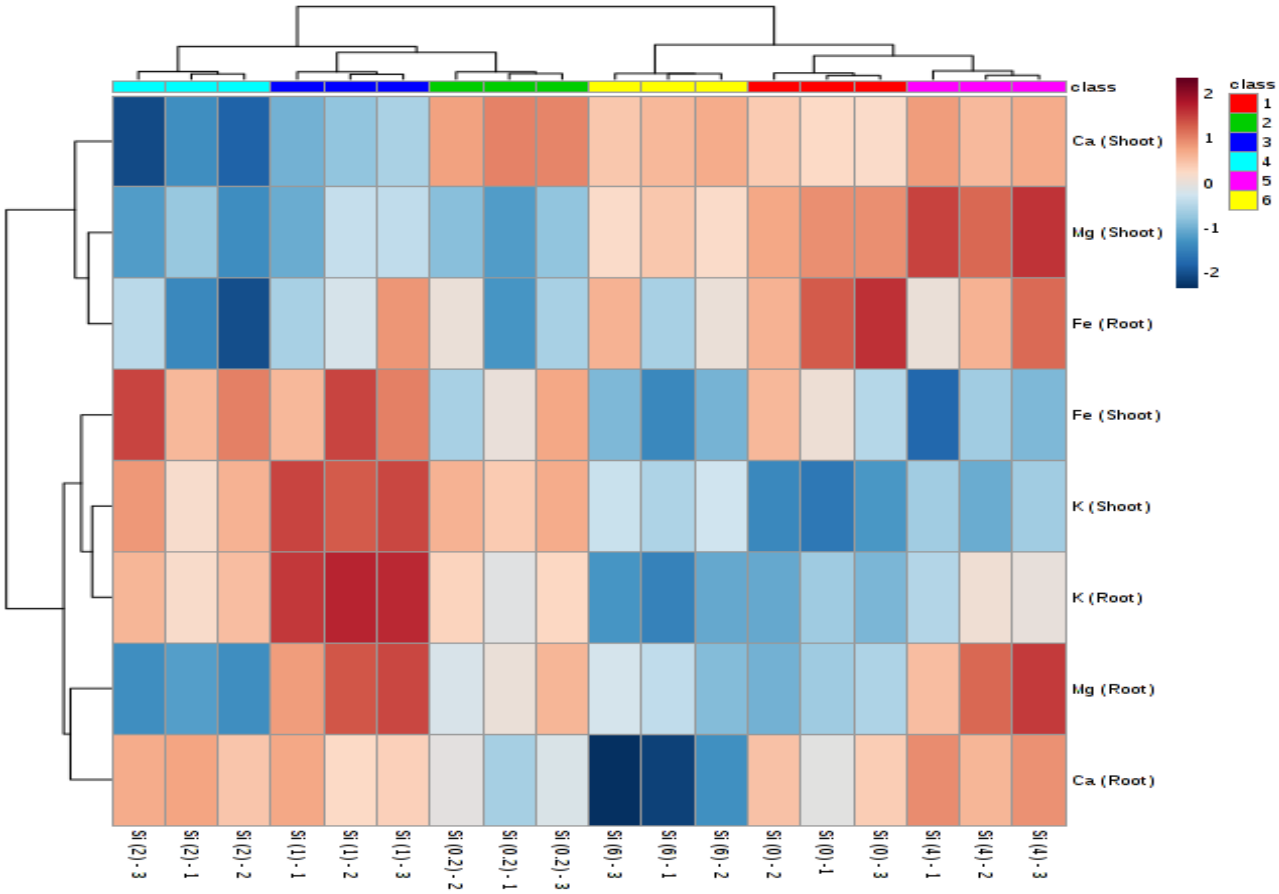
محتوای قند احیای گیاه چه در ریشه‌ها و چه در برگ‌ها چندان تحت تأثیر سیلیکون قرار نگرفت به طوریکه اعمال تیمار سیلیکون غالباً اثری بر آن نداشت، اگرچه در برخی موارد سبب کاهش مقدار این قندها گردید (شکل B-۲ و جدول۱). بنابراین در مجموع بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان گفت که تیمارهای سیلیکونی تأثیر چندانی بر محتوای اسمولیت‌های سازگار (پرولین و قند احیا) گیاه ذرت نداشتند و اگر هم اثری داشتند این اثر کاهشی بود.

سیلیکون و محتوای عناصر معدنی گیاه: محتوای یون‌های پتاسیم گیاه (ریشه و اندام‌های هوایی) متناسب با افزایش غلظت یون سیلیکون در محلول غذایی افزایش پیدا کرده و در غلظت ۱mM سیلیکون به حداکثر خود رسید و سپس با افزایش بیشتر غلظت سیلیکون شروع به کاهش نموده و در غلظت ۱mM سیلیکون کمترین مقدار خود را نشان داد (شکل ۳ و جدول ۱). بنابراین می‌توان گفت که غلظت مناسب سیلیکون باعث افزایش جذب پتاسیم شده و در غلظت‌های کم یا زیاد این یون از جذب پتاسیم کاسته شد. در این رابطه گزارش‌های مختلفی وجود دارد. اعمال تیمار ۲mM سیلیکون در ذرت (Gao, *et al.*, 2004)، تیمار ۱mM سیلیکون در دو واریته جو (Liang, 1999) و تیمار ۳mM سیلیکون در برنج (Gong, *et al.*, 2006) تأثیری در محتوای پتاسیم ریشه‌ها و اندام‌های هوایی گیاهان ذکر شده نداشتند. همچنین Farshidi و همکاران (۲۰۱۲) تغییری را در محتوای پتاسیم گیاه کانولا هنگام اعمال تیمار ۱/۷mM سیلیکون مشاهده نکردند اما از طرف دیگر Liang و همکاران (۲۰۰۱) شاهد کاهش محتوای پتاسیم ریشه‌های جو هنگام اعمال تیمار سیلیکون ۱mM بودند، هر چند نظیر این حالت را در ساقه‌ها مشاهده نکردند. همچنین Delavar و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که تیمار گیاه گاوزبان با سیلیکون سبب افزایش محتوای پتاسیم اندام های هوایی گیاه شده اما میزان پتاسیم ریشه‌ها را کاهش می دهد. Miao و همکاران (۲۰۱۰) نیز نقش سیلیکون را در جذب پتاسیم در گیاه سویا مطالعه کرده و اعلام کردند که سیلیکون (در غلظت ۲mM) جذب پتاسیم را خصوصاً در شرایط کمبود این عنصر به طور قابل توجهی بالا می‌برد. بنابراین بر اساس گزارش‌های فوق و نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان به این نتیجه رسید که بعضی از غلظت‌های سیلیکون باعث افزایش محتوای پتاسیم گیاه می‌شود.

تغییرات یون منیزیم دو نکته مهم را مشخص می‌سازد: اول اینکه در غلظت‌های کم و متوسط سیلیکون محتوای منیزیم ریشه‌ها کاهش و محتوای منیزیم اندام‌های هوایی افزایش پیدا

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1397.7.27.6.7]



شکل ۳- طرح Heatmap مربوط به تأثیر غلظت‌های مختلف سیلیکون بر روی محتوای عناصر معدنی در ریشه‌ها و اندام‌های هوایی گیاه ذرت. رنگ‌های قهوه‌ای تیره بیان‌گر مقادیر بالاتر و رنگ‌های آبی تیره بیان‌گر مقادیر کمتر هر رنگدانه می‌باشند. کلیه اعداد نرمالیزه شده‌اند. محور افقی پایین تکرارهای ۱ تا ۳ از تیمارهای ۰، ۰/۲، ۱، ۲، ٤ و ٦ میلی‌مولار سیلیکون را نشان می‌دهند (به عنوان مثال ستون Si (4) – 3 یعنی تکرار سوم از تیمار حاوی سیلیکون 4 mM). محور عمودی سمت راست نیز پارامترهای مورد اندازه‌گیری (در اینجا محتوای عناصر معدنی) را نشان می‌دهد. دندروگرام‌های بالای شکل میزان شباهت و نزدیکی بین تکرارها و تیمارها، و دندروگرام‌های سمت چپ شکل نیز میزان شباهت و نزدیکی بین پارامترهای مورد بررسی را نشان می‌دهند.

کرد. به عبارت دیگر می‌توان اینطور عنوان کرد که تیمار سیلیکون باعث انتقال یون‌های منیزیم ریشه به اندام‌های هوایی گردید. نکته دوم اینکه در تیمار ٤mM سیلیکون محتوای منیزیم گیاه هم در ریشه‌ها و هم در اندام‌های هوایی بطور مشخصی افزایش یافت. به عبارت دیگر در این غلظت از سیلیکون جذب منیزیم بهتر صورت گرفت (شکل ۳ و جدول ۱). در زمینه تأثیر سیلیکون بر محتوای منیزیم پژوهش‌های اندکی صورت گرفته است. در این زمینه Gao و همکاران (۲۰۰٤) مشاهده کردند که اعمال تیمار سیلیکون ۲mM هیچ تأثیری بر محتوای منیزیم شیره خام در آوندهای چوبی گیاه ذرت نداشت.

تغییرات کلسیم گیاه در تیمارهای مختلف سیلیکونی تا حدودی نامنظم بود بطوریکه در غلظت‌های متوسط سیلیکون (۱ و ۲ میلی مولار) محتوای کلسیم اندام‌های هوایی کاهش پیدا کرد اما در سایر غلظت‌ها از جمله غلظت‌های بالای سیلیکون، بر مقدار کلسیم اندام‌های هوایی افزوده شد. در ریشه‌ها نیز وضعیت تا حدودی ناهمگون بود، به این ترتیب که غلظت‌های کم و زیاد سیلیکون موجب کاهش کلسیم ریشه‌ها شدند اما غلظت ٤mM سیلیکون سبب افزایش کلسیم ریشه‌ها گردید. در سایر غلظت‌ها نیز محتوای کلسیم تغییری پیدا نکرد

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1397.7.27.6.7]

(شکل ۳ و جدول ۱). بر این اساس یک نتیجه‌گیری جامع در مورد اثر سیلیکون بر محتوای کلسیم گیاه ذرت به آسانی امکان‌پذیر نیست. تنها نکته قابل استنباط این است که سیلیکون در غلظت ٤mM باعث افزایش محتوای کلسیم گیاه، هم در ریشه‌ها و هم در اندام‌های هوایی گردید، نظیر همان اثری که بر روی پتاسیم گیاه بر جای گذاشت. در این رابطه Gao و همکاران (۲۰۰٤) با اندازه‌گیری غلظت کلسیم در شیره خام آوندهای چوبی ذرت، شاهد کاهش شدید محتوای کلسیم در این آوندها هنگام اعمال تیمار سیلیکون ۲mM بودند. همچنین Liang (۱۹۹۹) نیز با اعمال تیمار سیلیکون ۱mM بر دو رقم حساس و مقاوم در برابر تنش شوری گیاه جو مشاهده کرد که در رقم حساس، تیمار سیلیکون محتوای کلسیم ساقه‌ها را حدود ۱۰٪ کاهش داد اما تیمار رقم مقاوم با سیلیکون، مقدار این یون را حدود ٦٪ بالا برد. از سوی دیگر Delavar و همکاران (۲۰۱٦) گزارش کردند که اعمال تیمارهای سیلیکون باعث افزایش محتوای کلسیم برگ‌ها و ریشه‌های گیاه گاوزبان می‌گردد.

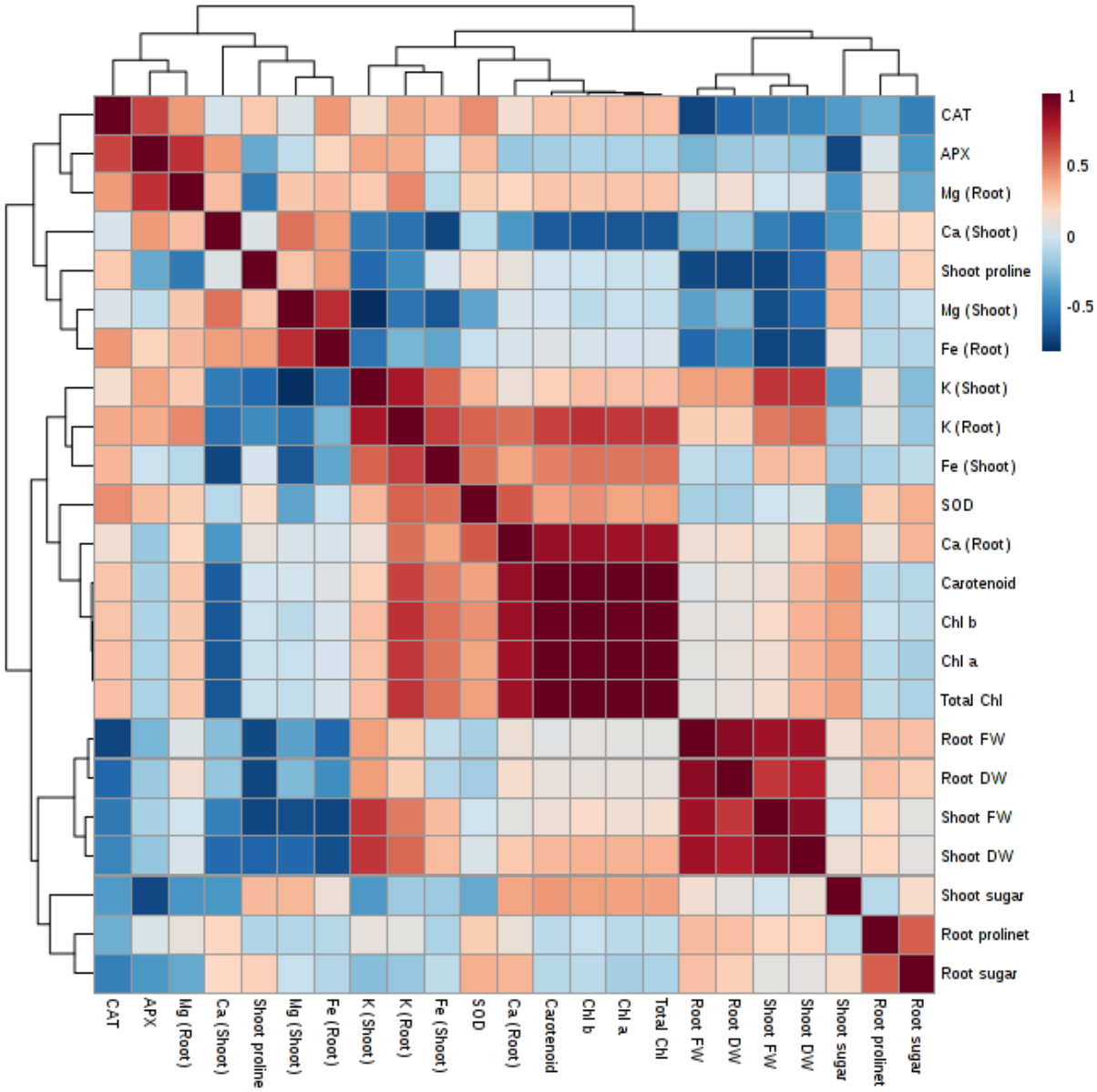
سیلیکون در غلظت‌های متوسط (در واقع بهینه) سبب افزایش محتوای آهن اندام‌های هوایی گردید اما در غلظت‌های بالا محتوای آهن این اندام‌ها را کاهش داد. در ریشه‌ها نیز ظاهراً سیلیکون تأثیر چندانی بر محتوای آهن گیاه نداشت و تنها در تیمار ۲mM مقدار آن را کاهش داد (شکل ۳ و جدول ۱). در این زمینه Farshidi و همکاران تغییر معنی‌داری را در محتوی آهن ساقه‌ها و ریشه‌های گیاه کانولا هنگام اعمال تیمار و ۱/۷mM سیلیکون مشاهده نکردند. اما Gonzalo و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که تیمار گیاه سویا با سیلیکون ۱mM باعث کاهش محتوای آهن در برگ‌ها، ریشه‌ها و ساقه‌ها شد. آنها اعلام کردند که تیمار گیاه سویا با سیلیکون ۰/۵ mMدر شرایط کمبود آهن باعث جلوگیری از بروز علایم کمبود آهن گردید. ظاهراً سیلیکون از طریق بازگسیل (remobilization) آهن مانع تخریب کلروفیل در برگ‌ها می‌شود. در خیار نیز سیلیکون باعث بر طرف شدن اثرات کمبود آهن شد اما مکانیسم آن متفاوت است (Gonzalo *et al.*, 2013). سیلیکون باعث افزایش تبدیل Fe^{2+} به Fe^{3+} شده و از این طریق مانع جذب بیش از حد آهن می‌گردد (Ma and Takahashi 2002). علاوه بر این سیلیکون می‌تواند در خاک‌های اسیدی از طریق افزایش ترشح OH^- توسط ریشه‌ها جذب آهن را کنترل کند (Wallace, 1993). بنابراین با توجه به گزارش‌های فوق و نیز نتایج حاصل از این پژوهش که نشان می‌دهد سیلیکون در غلظت بهینه جذب آهن را افزایش و در غلظت‌های بالا جذب آن را کاهش می‌دهد، احتمال دارد که سیلیکون نقشی کنترل کننده و تنظیمی در جذب آهن داشته باشد.

سیلیکون و همبستگی بین پارامترها: نتایج به دست آمده نشان داد که همبستگی مثبتی بین محتوای رنگدانه‌ای گیاه و وزن خشک اندام‌های هوایی آن وجود دارد. با توجه به اینکه پیش‌تر اثر مثبت غلظت‌های بهینه سیلیکون، هم در افزایش رشد گیاه و هم در افزایش محتوای رنگدانه‌ای آن مشاهده شده بود می‌توان این طور نتیجه‌گیری کرد که شاید سیلیکون در غلظت‌های مناسب از طریق افزایش محتوای رنگدانه‌ای گیاه سبب افزایش رشد گیاه شد. علاوه بر این بین محتوای رنگدانه‌ای و قند احیای گیاه نیز همبستگی مثبتی مشاهده گردید که می‌تواند نشان دهنده افزایش نرخ فتوسنتز در گیاه باشد. با این حال در غلظت‌های بهینه سیلیکون که در آنها هم رشد گیاه و هم میزان رنگدانه‌ها بیشتر بود افزایش مشخصی در محتوای قند برگ‌ها مشاهده نگردید. در این رابطه می‌توان گفت که شاید این قند در برگ‌ها تجمع نیافته و به سایر بخش های گیاه منتقل شدند (شکل ٤).

نکته مهم دیگر وجود همبستگی مثبت بین محتوای آهن اندام‌های هوایی و میزان رنگدانه‌های آنها بود که این مسئله با توجه به نقشی که آهن در بیوسنتز کلروفیل ایفا می‌کند قابل توجیه می‌باشد. همچنین همبستگی مثبت قابل توجهی بین میزان بیوماس گیاه، خصوصاً اندام‌های هوایی و محتوای پتاسیم گیاه (هم ریشه‌ها و هم ساقه‌ها) مشاهده گردید. نکته جالب توجه این است که سیلیکون در همان غلظت‌هایی که موجب افزایش رشد گیاه شد، محتوای پتاسیم گیاه را نیز افزایش داد. بنابراین افزایش جذب پتاسیم در گیاه توسط سیلیکون (در

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1397.7.27.6.7]



شکل ٤- طرح Heatmap مربوط به همبستگی بین کل پارامترهای اندازه‌گیری شده گیاه ذرت تحت تیمارهای حاوی غلظت‌های مختلف سیلیکون. رنگ‌های قهوه‌ای تیره بیان‌گر همبستگی مثبت و رنگ‌های آبی تیره بیان‌گر همبستگی منفی بین پارامترهای متقاطع از محورهای افقی و عمودی هستند. دندروگرام‌های بالا یا سمت چپ شکل میزان شباهت و نزدیکی بین پارامترهای مورد بررسی را نشان می‌دهند.

غلظت‌های مناسب) را می‌توان مکانیسم احتمالی دیگری دانست که سبب افزایش رشد گیاه می‌گردد (شکل ٤).

نتیجه‌گیری کلی

بطور خلاصه می‌توان گفت که سیلیکون در غلظت‌های متوسط ضمن افزایش رشد گیاه، محتوای رنگدانه‌ای آن را نیز افزایش داد و احتمالاً از این طریق موجب افزایش رشد گیاه گردید. علاوه بر این فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی گیاه نیز در غلظت متوسط سیلیکون افزایش یافت. از سوی دیگر سیلیکون سبب بالا رفتن جذب پتاسیم در گیاه شده و با توجه به وجود همبستگی مثبت بین میزان پتاسیم گیاه و رشد آن، احتمالاً بالا بردن محتوای پتاسیم گیاه یکی از مکانیسم‌هایی است که سیلیکون از طریق آن سبب افزایش رشد گیاه گردید.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1397.7.27.6.7]

منابع

امامی، ع. (۱۳۷۵) روش‌های تجزیه گیاه. جلد اول. نشریه فنی شماره ۹۸۲. موسسه تحقیقات خاک و آب. انتشارات دانشگاه تهران ۲۵۲-۲۴۸.

Aebi, H. (1984) Catalase *in vitro*. Methods in Enzymology 105: 121-126.

Arnon, D. I. and Stout, P. R. (1939) The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. Plant Physiology 14: 371–375.

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

Bradford, M. 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.

Corrales, I., Poschenrieder, C. and Barcelo, J. (1997) Influence of silicon pretreatment on aluminium toxicity in maize roots. Plant and Soil 190: 203–209.

Delavar, K., Enteshari, S., Gagoonani, S .and Kamali, S. (2016) Effect of silicon on the mineral content of borage (*Borago officinalis* L.) under aluminum stress. Journal of Biological Science 16: 128-135.

Epstein, E. (1994) The anomaly of silicon in plant biology. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 91: 11–17.

Epstein, E. and Bloom, A. J. (2003) Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives. 2nd Edn, John Wiley & Sons, New York.

Farshidi, M., Abdolzadeh, A., and Sadeghipour, H. R. (2012) Silicon nutrition alleviates physiological disorders imposed by salinity in hydroponically grown canola (*Brassica napus* L.) plants. Acta Physiologiae Plantarum 34: 1779–1788.

Gao, X., Zou, C., Wang, L. and Zhang, F. (2004) Silicon improves water use efficiency of maize plant. Journal of Plant Nutrition 27: 1457–1470.

Giannopolitis, C. N. and Ries, S. K. (1977) Superoxide dismutase occurrence in higher plants. Plant Physiology 59: 309-314.

Gong, H. J., Randall, D. P. and Flowers, T. J. (2006) Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by reducing bypass flow. Plant, Cell and Environment 29: 1970–1979.

Gonzalo, M. J., Lucena, J. J. and Hernandez-Apaolaza, L. (2013) Effect of silicon addition on soybean (*Glycine max*) and cucumber (*Cucumis sativus*) plants grown under iron deficiency. Plant Physiology and Biochemistry 70: 455-461.

Hewitt, E. J. (1966) Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition. Tech. Commun. 22, Common wealth Bureaux of Hort. and Plantation Crops, East Malling, England.

Hodson, M. J., and Evans, D. E. (1995) Aluminium/silicon interactions in higher plants. Journal of Experimental Botany 46: 161-171.

Holm, G. (1954) Chlorophyll mutations in barley. Acta Agriculturae Scandinacica 4: 457-461.

Lana, R. M. Q., Korndorfer, G. H., Zanao Junior, L. A., Silva, A. F. and Lana, A. M. Q. (2003) Effect of calcium silicate on the productivity and silicon accumulation in the tomato plant. Bioscience Journal 19: 15-20.

Lee, S. K., Sohn, E. Y., Hamayun, M., Yoon, J. Y. and Lee, I. J. (2010) Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. Agroforestry Systems 80: 333–340.

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., Yang, C. G. and Shi, H. H. (2001) Effects of silicon on growth and mineral composition of barley grown under toxic levels of aluminum. Journal of Plant Nutrition 24: 229-243.

Ma, J. F. and Takahashi, E. (2002) Soil, fertilizer, and plant silicon research in japan. Elsevier, Amsterdam.

Ma, J. F., and Yamaji, N. (2008) Functions and transport of silicon in plants. Cellular and Molecular Life Sciences 65: 3049 -3057.

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

Moussa, H. R. (2006) Influence of exogenous application of silicon on physiological response of salt-stressed maize (*Zea mays* L.). International Journal of Agriculture & Biology 8: 293-297.

Nakano, Y. and Asada, K. (1981) Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. Plant and Cell Physiology 22: 867-880.

Porra, R. J., Thampson, W. A. and Kriedelman, P. E. (1989) Determination of accurate extraction and simultaneously equation for assaying chlorophyll a and b extracted with different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. Biochimica et Biophysica Acta 975: 384-394.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1397.7.27.6.7]

Sahebi, M., Hanafi, M. M., Nor Akmar, A. S., Rafii, M. Y., Azizi, P., Tengoua, F. F., Azwa, J. N. M. and Shabanimofrad, M. (2015) Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. Hindawi Publishing Corporation BioMed Research International 2015: 1-16.

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.

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.

Snyder, H. G., Matichenkov, V. V. and Datnoff, E. L. (2006) Chaper 19: Silicon. Handbook of Plant Nutrition CRC Press

Somogyi, M. (1952) Notes on sugar estimation. The Journal of Biological Chemistry 200: 245-247.

Torabi, F., Majd, A. and Enteshari, S. (2015) The effect of silicon on alleviation of salt stress in borage (*Borago officinalis* L.*).* Soil Science and Plant Nutrition 61: 788-798.

Wallace, A. (1993) Participation of silicon in cation–anion balance as a possible mechanism for aluminum and iron tolerance in some Gramineae. Journal of Plant Nutrition 16: 547–553.

Werner, D. and Roth, R. (1983) Silica metabolism. In "Encyclopedia of Plant Physiology, New Series" Springer-Verlag, Berlin and New York.

Xie, Z., Song, R., Shao, H., Song, F., Xu, H. and Lu, Y. (2015) Silicon improves Maize photosynthesis in saline-alkaline soils.The Scientific World Journal 2015: 1-7.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1397.7.27.6.7]