ارزیابی برهمکنش سالیسیلات پتاسیم و سیلیکات پتاسیم بر عملکرد، وضعیت تغذیه‌ای و کیفیت خیار گلخانه‌ای در شرایط تنش سرمایی

مجید بصیرت[1]، سید مجید موسوی و مجید عباسپور

استادیار بخش تحقیقات شیمی، حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه؛ موسسه تحقیقات خاک و آب؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران؛
majid_basirat@yahoo.com

استادیار بخش تحقیقات شیمی، حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه؛ موسسه تحقیقات خاک و آب؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران؛
majid62mousavi@gmail.com

کارشناس بخش تشکیل و طبقه‌بندی خاک؛ موسسه تحقیقات خاک و آب؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران؛
mabbaspour25@gmail.com

دریافت: **1400/4/14** و پذیرش: **1400/9/29**

چکیده

هدف هر گلخانه‌دار اتخاذ راهکارهایی است که گیاه بتواند در شرایط تنش دمایی عملکرد خود را حفظ نماید. این آزمایش با هدف بررسی تأثیر سطوح مختلف سالیسیلات پتاسیم ($C_7H_5KO_3$) (0، 0/5 و 1 میلی‌مولار) و سیلیکات پتاسیم (0 و 4 در هزار) بر روی عملکرد و وضعیت تغذیه‌ای خیار گلخانه‌ای(*Cucumis sativus*) در شرایط تنش سرمایی (در محدوده دمایی 15 تا 17 درجه سانتی‌گراد به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در شرایط گلخانه‌ای در کرج اجرا گردید. نتایج نشان داد که سالیسیلات پتاسیم و سیلیکات پتاسیم در اکثر موارد بطور معنی‌داری غلظت نیترات و عناصر غذایی در گیاه و کیفیت و عملکرد خیار را تحت تأثیر قرار دادند. همچنین، محلول‌پاشی همزمان آنها به طور معنی‌داری بر عملکرد کل خیار و عملکرد بازارپسند تأثیر گذاشت و بیشترین افزایش عملکرد کل و عملکر بازارپسند نسبت به تیمار شاهد به ترتیب با 94/91% و 96/01% افزایش در تیمار 0/5 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم بدست آمد. در نتیجه‌ی محلول‌پاشی سالیسیلات و سیلیکات پتاسیم، عناصری مانند نیتروژن، بور، و منگنز در برگ ($P<0/05$) در مقایسه با تیمار شاهد بطور معنی‌داری افزایش نشان دادند. علاوه بر این، تیمارهای محلولپاشی باعث کاهش معنی‌دار محتوای نیترات در ماده خشک برگ خیار شدند: از حدود 11% در تیمار 1 میلی‌مولار سالیسیلات+4 در هزار سیلیکات پتاسیم تا 78% در تیمار 0/5 میلی‌مولار سالیسیلات+4 در هزار سیلیکات پتاسیم. به‌طورکلی، یافته‌های این تحقیق نشان داد که استفاده از سالیسیلات و سیلیکات پتاسیم در شرایط تنش سرما می‌تواند موجب افزایش عملکرد و ارتقای کیفیت بازارپسندی محصول خیار گردد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت تغذیه‌ای خیار؛ تنش دمای پایین

---

[1]. نویسنده مسئول: کرج، موسسه تحقیقات خاک و آب، بخش تحقیقات شیمی، حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه

مقدمه

تنظیم درجه حرارت در گلخانه نقش مهمی بر عملکرد محصول دارد که در اکثر موارد به دلایل مختلف ازجمله گرانی انرژی برای گرم کردن و یا برق برای خنک کردن، مدیریت مناسبی اعمال نمی‌شود و گیاهان در فصل سرما و گرما عمدتاً دچار تنش و کاهش عملکرد شده و گلخانه‌داران از این وضعیت دچار خسارت‌های فراوان می‌شوند (حقیقی و ابوالقاسمی، 1398).

خیار با نام علمی *Cucumis sativus* L.، گیاهی یک ساله و از خانواده کدوئیان بوده و یکی از محصولات گلخانه‌ای عمده‌ی کشور محسوب می‌شود. قرارگیری این گیاه در معرض دماهای سرمازدگی (در محدوده‌ی دمایی کمتر از 17 درجه سانتی‌گراد) ممکن است سبب توقف رشد گیاه، تحریک پژمردگی و آسیب برگ‌ها و افزایش حساسیت گیاه به بیماری‌ها و پاتوژن‌ها شود (جوانمردی، 1388). از طرفی تنش دمایی ممکن است به شدت به نمو زایشی گیاهان آسیب بزند (بنی‌نصب، 2009؛ جوانمردی، 1388). زمانی که گیاهان حساس به سرما در معرض دمای پایین قرار می‌گیرند، یک سری واکنش‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی از قبیل عدم یکنواختی در رسیدن محصول، فرورفتگی‌های سطحی برگ یا میوه، بی رنگ شدن محصول، از دست دادن آب و افزایش سرعت تنفس رخ می‌دهد که در نهایت سبب کاهش کیفیت محصول و کاهش بازارپسندی آن شده و در موارد پیشرفته از بین رفتن آن را به دنبال دارد (لونگویلای و همکاران، 2012). بنابراین، هدف اصلی مقاوم‌سازی گیاه در گلخانه، جلوگیری از افت عملکرد است و اگر گیاه را تا حدی به این تغییرات بتوان مقاوم کرد و جلوی افت عملکرد را گرفت، در هزینه تمام شده و مصرف انرژی صرفه جویی بزرگی درسطح کلان کشور می‌شود.

استفاده از مواد شیمیایی برای تحریک رشد و باردهی بیشتر در محصولات کشاورزی همواره از نگرانی های مصرف کنندگان است. بنابراین، اگر قرار است از ترکیبات محرک رشد یا مقاوم کننده گیاه استفاده شود، می‌بایست منشاء خطرناکی نداشته و یا از لحاظ شیمیایی بی‌خطری آن اثبات شده باشد و یا آلاینده همراه نداشته باشد. سالیسیلیک اسید یک هورمون گیاهی است که منشاء طبیعی و گیاهی داشته و مصرف آن بی خطر شناخته شده است (نظر و همکاران، 2011؛ میورا و تادا، 2014). اسید سالیسیلیک نقش مهمی در برابر تنش‌های زنده و غیرزنده و افزایش مقاومت گیاهان ایفا می‌کند و آسیب‌های ناشی از دماهای پایین را با مکانیسم‌های مختلفی مثل افزایش فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی کاهش می‌دهد (سلطانی دلربا و همکاران، 1390).

بیات و همکاران (1390) با مطالعه‌ی اثر سالیسیلیک اسید بر خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی دانهال‌های خیار تحت شرایط تنش خشکی بیان کردند که سالیسیلیک اسید مصرفی بطور معنی‌داری باعث افزایش رشد گیاه و بیوماس تولیدی در مقایسه با تیمار شاهد شد که این خود بطور معنی‌داری افزایش عملکرد خیار را به دنبال دارد. اثر کاربرد سالیسیلیک اسید بر کاهش تنش شوری در گوجه‌فرنگی نشان داد که در شرایط تنش شوری، این ترکیب باعث افزایش مقاومت به تنش و در نتیجه افزایش عملکرد میوه‌ی تولیدی می‌شود (محمدآبادی و همکاران، 1393). اسید سالیسیلیک از طریق تنظیم ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان تحت تنش‌های غیرزیستی، سبب افزایش مقاومت گیاه می‌شود (هاشم‌پور و همکاران، 2014). کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط بروز تنش همچنین فتوسنتز گیاه را از طریق عوامل روزنه‌ای، رنگریزه‌ها و ساختار کلروپلاست و آنزیم‌های دخیل در مراحل فتوسنتز اعمال کرده (قای، 2002) و از طریق افزایش معنی‌دار سطح برگ و نیز محتوای کلروفیل باعث افزایش عملکرد می‌شود (آروین و همکاران، 1390).

سیلیسیم نیز به عنوان یک عنصر مفید برای گیاه شناخته شده است که نقش مثبت آن در تعدیل آثار

نامطلوب تنش‌های مختلف زیستی و غیر زیستی بوسیله‌ی تعدادی از محققین بر روی محصولاتی نظیر گندم، جو، برنج، آفتابگردان، ذرت، پنبه، گوجه‌فرنگی و خیار گزارش شده است (خان و همکاران، 2015؛ صاحبی و همکاران، 2015؛ موسوی و همکاران، 2018a،b). مکانیسم اثر گذاری سیلیسیم بر تعدیل آثار تنش‌های زیستی و غیرزیستی در گیاهان بیشتر به نقش آن در استحکام دیواره سلولی، تنظیم فعالیت‌های آنزیمی گیاه، تشکیل کمپلکس-های پایدار با عناصر سمی و افزایش زیست فرآهمی عناصر غذایی ضروری گیاه از طریق اثرگذاری بر خصوصیات خاک گزاش شده است (موسوی، 2021). اما نکته‌ای که باید توجه داشت این است که غلظت مصرف این مواد، زمان استفاده و نوع گیاه در اثر بخشی آنها بر روی گیاه بسیار موثر است. برای مثال، کواچیک و همکاران (2009) گزارش کردند که اسید سالیسیلیک در سطح غلظتی پایین (50 میکرومولار) باعث بهبود و در سطح غلظتی بالا (250 میکرومولار) مانع از رشد گیاه *Matricaria Chamomilla* می‌شود. در مطالعه‌ای با هدف بررسی اثرات متقابل سیلیسیم و سالیسیلیک اسید بر پاسخ‌های دفاعی گیاه خیار به تنش شوری (جعفری و همکاران، 1390)، برهمکنش مثبت این دو ترکیب در القاء مقاومت به تنش شوری در گیاه خیار مشاهده شد. اثر مصرف سیلیسیم بر میزان مقاومت کدوی پوست کاغذی به تنش اکسیداتو ناشی از سفیدک سطحی توسط محمدخانی و همکاران (1394) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نیز نشان داد که کاربرد سیلیسیم، فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی را به طور معنی-داری افزایش داد و دلیل آن را به اثر سیلیسیم بر کاهش اکسیداسیون لیپیدهای غشاء نسبت دادند.

بنابراین، هدف از پژوهش حاضر، مطالعه‌ی اثر محلول‌پاشی نمک‌های پتاسیمی سالیسیلات و سیلیکات بر میزان عملکرد و بازارپسندی خیار گلخانه‌ای در شرایط تنش دمای پایین بوده و اینکه غلظت عناصر غذایی و غلظت نیترات در گیاه خیار تا چه میزان می‌تواند تحت تأثیر این نوع مدیریت تغذیه‌ای در شرایط تنش دمای پایین قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال‌های 1397 تا 1398 در گلخانه‌های تحقیقاتی موسسه تحقیقات خاک وآب که دارای سیستم گرمایش و سرمایش کنترل شده بودند بر روی خیار گلخانه‌ی (*Cucumis sativus* L) اجرا شد. برای بهتر نشان دادن اثر تنش سرمایی بر تغییرات عملکرد، بذر خیار انتخابی از نوع پر گل وارداتی شرکت Meridiem (https://meridiemseeds.com/en/company/) بود. این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار در شرایط کشت هیدروپونیک (در بستر مخلوط پرلیت 30 درصد– کوکوپیت 70 درصد) اجرا شد. این مواد دارای ویژگی‌های استانداردی به شرح ذیل بودند: پرلیت: دارای قابلیت هدایت الکتریکی 1/6 دسی-زیمنس بر متر؛ pH 6/1؛ ظرفیت تبادل کاتیونی صفر؛ وزن مخصوص ظاهری 0/15 گرم بر سانتی‌مترمکعب؛ خلل و فرج کل 0/88 سانتی‌مترمکعب در سانتی‌مترمکعب؛ ظرفیت نگهداشت رطوبت 0/56 سانتی‌مترمکعب در سانتی‌متر مکعب و کوکوپیت استفاده شده دارای قابلیت هدایت الکتریکی 0/90 دسی‌زیمنس بر متر؛ pH 6/7؛ ظرفیت تبادل کاتیونی 64/4 سانتی‌مول‌بار بر کیلوگرم؛ وزن مخصوص ظاهری 0/11 گرم بر سانتی‌مترمکعب؛ خلل و فرج کل 0/97 سانتی‌مترمکعب در سانتی‌مترمکعب؛ ظرفیت نگهداشت رطوبت 0/87 سانتی‌مترمکعب در سانتی‌متر مکعب بودند. ویژگی‌های شرایط رشدی خیار در گلخانه از مرحله کاشت تا تشکیل میوه که درجه حرارت برای اعمال تنش سرمایی مجدداً تنظیم شد، شامل درجه حرارت 3±25 درجه سانتیگراد در روز و 2±18 درجه سانتی‌گراد در شب؛ دوره‌ی روشنایی شامل 14 ساعت روشنایی و 10 ساعت تاریکی؛ رطوبت نسبی 65 درصد و شدت نور بین 95 تا 155 وات بر متر مربع نوسان داشت (نومن سلام و همکاران، 2021)

برای کودآبیاری گلدان‌های خیار، محلول غذایی مورد استفاده برای کودآبیاری با سه فورمولاسیون متفاوت و متناسب با نیازهای تغذیه‌ای خیار گلخانه‌ای تهیه و در اختیار گیاه قرار گرفت (اوسانماز و آباک، 2019) که شامل: (1) مرحله نشاءکاری [نیترات پتاسیم 444 میلی‌گرم در کیلوگرم، مونوپتاسیم فسفات 333 میلی‌گرم در کیلوگرم، سولفات آهن 13 میلی‌گرم در کیلوگرم، سولفات منگنز 7 میلی‌گرم در کیلوگرم؛ سولفات روی چهار میلی‌گرم در کیلوگرم، سولفات مس یک میلی‌گرم در کیلوگرم، سولفات مولیبدن 0/4 میلی‌گرم در کیلوگرم، نیترات کلسیم 333 میلی‌گرم در کیلوگرم، نیترات منیزیم 111 میلی‌گرم در کیلوگرم، آمونیوم 333 میلی‌گرم در کیلوگرم، اسیدفسفریک 10 درصد 0/1 میلی‌گرم در کیلوگرم]؛ (2)

مرحله‌ی گلدهی [نیترات پتاسیم 1000 میلی‌گرم در کیلوگرم، مونوپتاسیم فسفات 333 میلی‌گرم در کیلوگرم، بوراکس 10درصد به میزان چهار میلی‌گرم در کیلوگرم، سولفات آهن 13 میلی‌گرم در کیلوگرم، سولفات منگنز هفت میلی‌گرم در کیلوگرم؛ سولفات روی چهار میلی‌گرم در کیلوگرم، سولفات مس 1/1 میلی‌گرم در کیلوگرم، سولفات مولیبدن 0/4 میلی‌گرم در کیلوگرم، نیترات کلسیم 333 میلی‌گرم در کیلوگرم، نیترات منیزیم 111 میلی‌گرم در کیلوگرم، آمونیوم 333 میلی‌گرم در کیلوگرم، اسیدفسفریک 10 درصد 0/1 میلی‌گرم در کیلوگرم] و (3) مرحله‌ی برداشت [نیترات پتاسیم 1111 میلی‌گرم در کیلوگرم، مونوپتاسیم فسفات 444 میلی‌گرم در کیلوگرم، بوراکس 10درصد به میزان چهار میلی‌گرم در کیلوگرم، سولفات آهن 13 میلی‌گرم در کیلوگرم، سولفات منگنز هفت میلی‌گرم در کیلوگرم؛ سولفات روی چهار میلی‌گرم در کیلوگرم، سولفات مس 1.1 میلی‌گرم در کیلوگرم، سولفات مولیبدن 0/4 میلی‌گرم در کیلوگرم، نیترات کلسیم 333 میلی‌گرم در کیلوگرم، نیترات منیزیم 111 میلی‌گرم در کیلوگرم، آمونیوم 333 میلی‌گرم در کیلوگرم، اسیدفسفریک 10 درصد به میزان 0/1 میلی‌گرم در کیلوگرم]. همچنین، برخی از مهمترین خصوصیات آب مورد استفاده برای تهیه محلول غذایی مصرفی در کودآبیاری گلدان‌ها شامل بی‌کربنات 116 میلی‌گرم در لیتر، کلرلید 13/5 میلی‌گرم در لیتر، سدیم 12/6 میلی-گرم در لیتر، منیزیم 4/9 میلی‌گرم در لیتر، کلسیم 55/2 میلی‌گرم در لیتر، سیلیسیم 9/4 میلی‌گرم در لیتر، pH 7/5، EC 0/39 دسی‌زیمنس بر متر، نسبت جذب سدیم 0/44 بودند.

کنترل شرایط محیطی توسط سنسورهای محیطی قابل تنظیم بود. کودآبیاری گلدان‌ها نیز بصروت روزانه و هر روز سه مرتبه انجام شد. بسته به مرحله‌ی رشد بوته‌ها، حجم محلول مصرفی برای گلدان ها به نحوی تنظیم شده بود که حدود 30درصد زهاب در ته گلدان‌ها جمع شود. در طی مرحله‌ی داشت کنترل دقیق شرایط محیطی گلخانه، تنظیم pH و EC زهاب گلدان‌ها، مبارزه با آفات و همچنین هرس شاخه‌های جانبی تا استقرار و رشد کامل بوته‌های خیار انجام شد. از آنجایی‌که، بیشترین و موثرترین زمان فتوسنتز گیاه در ساعات 10 صبح تا 3 بعد از ظهر می‌باشد (بصیرت و همکاران، 2019)، برای القای تنش سرمایی در گلخانه، در ساعات روشنایی درجه حرارت در محدوده 15 تا 17 درجه سانتی‌گراد تنظیم گردید تا تنش سرمایی لازم برای خیار تأمین شود. تیمارهای محلول‌پاشی در این تحقیق شامل شامل سالیسیلات پتاسیم ($C_7H_5KO_3$) در سه سطح صفر (SA0)، 0/5 (SA0.5) و 1 (SA1) میلی‌مولار و سیلیکات پتاسیم در دو سطح صفر (Si0) و 4 (Si4) در هزار بودند که سیلیکات پتاسیم از شرکت صنایع سیلیکات ایران و سالیسیلات پتاسیم گرید دارویی داشته و از هند تهیه شد (https://dir.indiamart.com/impcat/salicylic-acid.html).

تیمارهای ذکر شده در طی دوره‌ی زمانی اعمال تنش سرمایی و به صورت محلول‌پاشی در مرحله‌ی باردهی در طی سه تکرار و به فاصله‌ی دو هفته مصرف شدند. همچنین، به منظور خنثی‌سازی اثر پتاسیم ورودی به گلدان‌ها همراه با تیمارهای اعمال شده، مقدار پتاسیم به

طور دقیق محاسبه و در تمامی گلدان‌ها (از جمله گلدان-های شاهد) در مرحله‌ی اعمال تیمارها، محلول‌پاشی شد. در طول مدت اعمال تنش، عملکرد کل و عملکرد بازارپسند (وزن کل تعداد خیار سالم در هر گلدان) تعیین و با نمونه‌گیری از برگ و میوه‌ی خیار و انتقال به بخش آزمایشگاه‌ها، مطابق با استانداردهای مورد تأیید موسسه تحقیقات خاک و آب عملیات آماده‌سازی نمونه‌ها انجام و غلظت عناصر غذایی شامل نیتروژن کل با روش کجلدال (جونز و همکاران، 1999)، فسفر کل به روش رنگ‌سنجی با استفاده از اسپکتروفتومتر (باتاگلیا و همکاران، 1993)، سیلیسیم با روش الیوت و اشنایدر، (1991) و اعمال چند اصلاح در این روش بر اساس اصلاحات کورندورفر و همکاران (2004)، غلظت عناصر پتاسیم، کلسیم، منیزیم، آهن، منگنز، مس، روی و بور در نمونه‌های برگ با استفاده از روش هضم تر با ترکیب اسید نیتریک: اسیدپرکلریک (7:3) (گریگر و همکاران، 2018) و غلظت نیترات در ماده خشک برگ و بافت تازه میوه (فوداستافس، 1997) تعیین شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها نیز بعد از بررسی داده‌ها و اطمینان از نرمال بودن آنها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه 22 و مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح 5 درصد انجام گرفت. لازم به ذکر است از آنجایی که شرایط اجرای آزمایش و امکانات موجود اجازه‌ی اجرای همزمان این آزمایش را با شرایط کاملاً یکسان در دو شرایط اعمال تنش سرمایی و عدم اعمال تنش سرمایی نمی‌داد، از وضعیت صفات تعداد خیار سالم، تعداد خیار بدشکل، عملکرد بازارپسند و غلظت نیترات در برگ و میوه‌ی خیار به عنوان شاخص‌ها و شواهد اعمال تنش سرمایی بهره برده شد و اثر تیمارهای اعمال شده بر روی وضعیت این صفات در شرایط اعمال تنش سرمایی مورد توجه قرار گرفت.

نتایج و بحث

اثر تیمارها بر عملکرد خیار

نتایج اثر سطوح مختلف سالیسیلات پتاسیم و سیلیکات پتاسیم بر عملکرد خیار در جدول (1) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، تنها وزن کل خیار در گلدان به طور معنی‌داری تحت تأثیر سطوح سالیسیلات پتاسیم قرار گرفت و در مورد سایر صفات اثر معنی‌داری مشاهده نشد. این در حالی‌است که برهمکنش سالیسیلات و سیلیکات پتاسیم به جز در مورد تعداد کل خیار بدشکل که هیچ اثر معنی‌داری از تیمارهای اعمال شده بر روی آن مشاهده نشد، در مورد سایر صفات معنی‌دار شد (جدول 1).

جدول 1- نتایج تجزیه واریانس اثر محلول‌پاشی تیمارهای سالیسیلات پتاسیم و سیلیکات پتاسیم بر روی عملکرد خیار در تنش سرمایی

منبع تغییرات	تعداد کل خیار در گلدان	وزن کل خیار در گلدان	تعداد کل خیار سالم در گلدان	تعداد کل خیار بدشکل در گلدان	عملکرد بازارپسند
	میانگین مربعات				
سالیسیلات پتاسیم (A)	38ns	272879*	26/06ns	3/72ns	174814ns
سیلیکات پتاسیم (B)	14/22ns	2001ns	2/00ns	5/56ns	4461ns
A × B	49/56*	340561*	51/50*	1/72ns	338166*
تکرار	3/50ns	3961/50ns	12/40ns	3/56ns	13198/11ns
ضریب تغییرات	12/54	18/21	13/88	38/65	19/77

ns: غیر معنی‌دار؛ *: معنی دار در سطح 5 درصد؛ **: معنی‌دار در سطح یک درصد، ***: معنی‌دار در سطح یک هزارم.

نتایج مقایسه میانگین‌های اثر مصرف همزمان سالیسیلات پتاسیم و سیلیکات پتاسیم بر روی عملکرد و اجزای عملکرد خیار در شرایط تنش سرمایی نشان داد که تیمارهای مصرفی به طور معنی‌داری تعداد کل خیار در گلدان را در مقایسه با تیمار شاهد (عدم مصرف سالیسیلات پتاسیم و سیلیکات پتاسیم) افزایش دادند و از

این جهت بین تیمارهای محلول‌پاشی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد در حالی‌که با تیمار شاهد دارای اختلاف معنی‌داری بودند (جدول 2). وزن کل خیار در گلدان نیز به طور قابل توجهی در تیمارهای اعمال شده در مقایسه با تیمار شاهد افزایش نشان داد (از 49/1 درصد در تیمار 1 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم+ 4 در هزار سیلیکات پتاسیم تا 94/88 درصد در تیمار 0/5 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم) (جدول 2) که به استثنای تیمار 1 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم+ 4 در هزار سیلیکات پتاسیم، سایر تیمارها اگرچه فاقد اختلاف معنی‌داری با یکدیگر بودند اما با تیمار شاهد دارای اختلاف معنی‌داری بودند.

اثر تیمارهای اعمال شده بر افزایش تعداد خیار بدشکل در شرایط تنش سرمایی در مقایسه با تیمار شاهد نشان داد که بیشترین افزایش در این صفت در تیمار 1 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم+ 4 در هزار سیلیکات پتاسیم مشاهده شد که معادل 2/29 برابر تیمار شاهد بود و این تیمار ضمن نداشتن اختلاف معنی‌دار با سایر تیمارهای محلول‌پاشی، تنها تیماری بود که دارای اختلاف معنی-داری با تیمار شاهد بود. شاید این سوأل به ذهن خطور کند چرا تیمارهای محلول‌پاشی که با هدف کنترل آثار نامطلوب تنش دمای پایین مصرف شده‌اند، در این مورد نتیجه عکسی داشته‌اند؛ همانطور که در بخش‌های قبل مطرح شد، تیمارهای محلول‌پاشی باعث افزایش معنی‌دار تعداد کل خیار در مقایسه با تیمار شاهد شدند و این کاملاً طبیعی است که در کنار این افزایش تعداد کل خیار در گلدان، به موازات آن تعداد خیار بدشکل نیز افزایش یابد، به همین دلیل و برای نشان دادن اثر خالص تیمارها بر روی کنترل آثار نامطلوب تنش دمای پایین، از شاخص دیگری به نام عملکرد بازارپسند بهره برده می‌شود.

بالاترین عملکرد بازارپسند در تیمار 0/5 میلی-مولار سالیسیلات پتاسیم اتفاق افتاد که عملکرد بدست آمده حدود 2 برابر مقدار اندازه‌گیری‌شده در تیمار شاهد بود و این تیمار تنها با تیمارهای شاهد و 1 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم + 4 در هزار نمک سیلیکات پتاسیم دارای اختلاف معنی‌داری بود (جدول 2). نتایج وانگ و لی (2006) نشان داد که کاربرد اسید سالیسیلیک با غلظت 1 میلی‌مولار باعث کاهش خسارت تنش سرمایی و بهبود عملکرد می‌شود. آنها بیان کردند که کاربرد اسید سالیسیلیک مقاومت بافت‌های حساس به سرمازدگی را افزایش داده و بدین طریق باعث کاهش خسارت سرمازدگی می‌شود. اکبری و همکاران (1394) در مطالعه-ای با هدف افزایش مقاومت به سرما در گیاهچه‌های خیار با کاربرد برخی از مواد تنظیم‌کننده رشد گیاهی، گزارش کردند که اسید سالیسیلیک از طریق افزایش محتوای کلروفیل و پرولین و جلوگیری از افزایش نشت یونی و محتوای مالون دی‌آلدهید سبب بهبود پارامترهای رشدی و افزایش مقاومت به تنش سرمایی در گیاهچه‌ها در مراحل اولیه رشد و درنتیجه افزایش عملکرد محصول می‌شود.

در هر ستون حروف مشابه نشان دهنده‌ی عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون دانکن است ($P<0/05$).

اثر تیمارها بر وضعیت تغذیه‌ای خیار

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر روی غلظت عناصر غذایی و نیز غلظت نیترات در گیاه در شرایط تنش سرمایی نشان داد که به استثنای غلظت پتاسیم در برگ و نیترات در ماده‌ی تازه (میوه خیار)، سایر عناصر به طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمارهای اعمال شده قرار گرفتند (جدول 3). برهمکنش تیمارهای سالیسیلات پتاسیم و سیلیکات پتاسیم نیز تنها در مورد غلظت نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم و مس در برگ و غلظت نیترات در ماده‌ی تازه میوه‌ی خیار معنی‌دار نبود (جدول 3).

با بررسی میانگین‌های غلظت عناصر برگ در حضور سطوح مختلف سالیسیلیک و سیلیسیلک اسید در شرایط تنش سرمایی مشخص شد که تیمار سالیسیلات پتاسیم، بر نیتروژن کل معنی‌دار نبود. نیتروژن کل برگ در تمام تیمارها در سطح غلظتی بیشتر از دامنه مطلوب گزارش شده توسط د-کریج و همکاران (1992) قرار داشت.

جدول 2- مقایسه میانگین‌های اثر مصرف همزمان سالیسیلات پتاسیم و سیلیکات پتاسیم بر روی عملکرد و اجزای عملکرد خیار در تنش سرمایی

تیمار	تعداد کل خیار در گلدان	وزن کل خیار در گلدان (گرم در گلدان)	تعداد کل خیار بدشکل در گلدان	عملکرد بازارپسند
SaA0-SiA4	26/33a 1±/53	1471/5a77±/67	3/00ab1±	1302/9ab124±/06
SaA0.5-SiA0	29/00a2±	1759/8a30±/29	3/67ab1±/53	1541/1a93±/08
SaA0.5-SiA4	25/67a2±/08	1459/8a141±/69	4/00ab2±	1230/5ab229±/98
SaA1-SiA0	24/00a4±	1551/5a319±/36	3/00ab2±	1358/3ab279±/57
SaA1-SiA4	24/67a4±/73	1346/2ab223±/89	5/33a1±/15	1057/6bc379±/07
شاهد	18/33b1±/53	903/0b29±/95	2/33b0±/58	786/2c42±/82

SaA0-SiA4: 4 در هزار نمک سیلیکات پتاسیم؛ SaA0.5-SiA0: 0/5 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم؛ SaA0.5-SiA4: 0/5 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم + 4 در هزار نمک سیلیکات پتاسیم؛ SaA1-SiA0: 1 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم؛ SaA1-SiA4 : 1 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم + 4 در هزار نمک سیلیکات پتاسیم؛ شاهد: بدون مصرف سالیسیلیک و نمک سیلیکات پتاسیم.

این فرضیه‌ی قوی مطرح است که در شرایط تنش سرمایی ممکن است نیتروژن به اسید آمینه تبدیل نشده باشد زیرا، فعالیت گیاه در اثر درجه حرارت پایین کاهش یافته است، در نتیجه غلظت نیتروژن در برگ در سطح بیشبود تجمع یافته است (لونگویلای و همکاران، 2012). مصرف یک میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم به طور معنی‌داری باعث کاهش غلظت فسفر برگ در مقایسه با تیمار شاهد شد (جدول 4). در مطالعات گذشته نیز نشان داده شده است که کاربرد سطوح بالای سالیسیلیک اسید به دلیل ایجاد اختلال در فعالیت‌های آنزیمی گیاه و نیز اختلال در قابلیت گیاه در جذب عناصر غذایی، می‌تواند باعث کاهش رشد و حتی در مواردی متوقف شدن رشد گیاه شود (کرد و هاتوت، 1992؛ شهاتا و همکاران، 2001).

در نتیجه‌ی مصرف نمک سیلیکات پتاسیم غلظت فسفر و مس در برگ به طور معنی‌داری در مقایسه با تیمار شاهد افزایش نشان داد (به ترتیب 29/33 و 40/71 درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد). میزان افزایش غلظت این عناصر نیز در دامنه‌ی مطلوب غلظتی قرار داشت (جدول 4). سیلیسیم از طریق اثرگذاری بر روی سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه سبب افزایش مقاومت گیاه به تنش سرمایی و کاهش اثرات مخرب سرما در گیاه می‌شود (آذرفام و همکاران، 1399) عنصر مس در ساختار آنزیم سوپراکسیددیسموتاز حضور دارد. این آنزیم که جزو سیستم دفاع آنتیاکسیدانت‌های آنزیمی محسوب می‌شود، در شرایط وقوع تنش‌های مختلف زیستی و غیرزیستی افزایش یافته و با متعادل نگه داشتن میزان گونه‌های اکسیژنی واکنشگر (ROS)، باعث افزایش مقاومت گیاه به تنش می‌شود (تولالی و همکاران، 2010). همچنین فسفر که وظیفه ذخیره‌سازی و انتقال انرژی در گیاه را بر عهده دارد نقش بسزایی در افزایش رشد و عملکرد گیاه و نیز مقاومت به تنش‌های مختلف زیستی و غیرزیستی ایفا می‌کند. نقش ترکیبات سیلیسیمی در افزایش ترشح اسیدهای آلی و مواد آلی محلول، تغییر pH محیط ریشه، تغییر فعالیت جامعه زیستی منطقه ریزوسفر (برای مثال میکروارگانیسم های حل‌کننده فسفات) و در نتیجه افزایش جذب عناصر غذایی در مطالعات گذشته اثبات شده است (فان و همکاران، 2016؛ موسوی و همکاران، 2018a؛ لی و همکاران، 2019؛ اسکالر و همکاران، 2021، 2019). با این وجود اثر سیلیسیم بر روی فراهمی عناصر غذایی برای گیاه به عوامل مختلفی از جمله میزان سیلیسیم مصرفی نیز بستگی دارد (هو و همکاران، 2021). نباید از نظر دور داشت که اخیراً نقش سیلیسیم بر روی افزایش بیان ژن‌های مرتبط با جذب فسفر معدنی در گیاهانی نظیر گندم اثبات شده است (کاستیک و همکاران، 2017) و بوسنیچ و همکاران

(2019 a,b) نیز شواهدی مبنی بر پیوند مس با پروتئین-های کلاته کننده مس نظیر روی/مس سوپراکسیددیسموتاز در ریشه‌ها و پلاستوسیانین برگ‌های خیار ارائه کرده‌اند. آنها همچنین بیان کردند که مصرف سیلیسیم در خیار ظرفیت پیوند مس با دیواره سلولی ریشه‌ها و همچنین تجمع لیگاندهای مس مانند اسیدهای آلی و آمینواسیدهای مس در برگ را افزایش می‌دهد.

برهمکنش همزمان سالیسیلات پتاسیم و سیلیکات پتاسیم بر روی وضعیت تغذیه‌ای برگ در جدول 5 ارائه شده است. اطلاعات این جدول نشان می-دهد که در نتیجه‌ی مصرف همزمان این دو تیمار در شرایط اعمال تنش سرمایی، غلظت نیترات در ماده‌ی خشک برگ به طور معنی‌داری در مقایسه با تیمار شاهد کاهش یافته است. بیشترین کاهش نیز با حدود 77/58 درصد به تیمار 0/5 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم + 4 در هزار نمک سیلیکات پتاسیم اختصاص داشت و در رتبه‌ی دوم از این نظر تیمار 1 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم با حدود 51/99 درصد کاهش نسبت به تیمار شاهد قرار داشت. به استثنای تیمار 1 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم که باعث کاهش غلظت کلسیم برگ شد و از این نظر اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت، در سایر تیمارها، افزایش معنی‌دار غلظت کلسیم ثبت گردید. اگرچه این میزان افزایش غلظت کمتر از دامنه‌ی غلظتی مطلوب گزارش شده توسط د-کریج و همکاران (1992) بودند. کاهش غلظت کلسیم برگ در سطوح بالای مصرف سالیسیلات پتاسیم می‌تواند به عنوان یک اثر نامطلوب محسوب شود زیرا کلسیم با اتصال به فسفولیپیدها، لایه-های چربی را پایدار کرده و در نهایت از طریق یکپارچگی ساختار غشاهای سلولی می‌تواند اثر نامطلوب تنش‌های غیرزیستی از جمله سرما را کاهش دهد. اثر مثبت کلسیم در بهبود تحمل به تنش‌های غیرزیستی به تنظیم روابط آبی، فعالیت سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، انباشت اسمولیت-ها، بهبود محتوی رنگدانه‌های فتوسنتزی و تعادل تغذیه‌ای نسبت داده شده است (ابراهیم و همکاران، 2016). همچنین، کاهش رشد و کاهش مقاومت گیاه به شرایط تنش در نتیجه کاربرد سطوح بالای سالیسیلات پتاسیم توسط کرد و هاتوت (1992) گزارش شده است. بیشترین افزایش در غلظت کلسیم به تیمار 4 در هزار نمک سیلیکات پتاسیم اختصاص داشت که نسبت به تیمار شاهد افزایش معنی‌دار داشت (جدول 5)، پاولوویچ و همکاران (2021) نیز به نقش کاربرد ترکیبات سیلیسیمی در ارتقای وضعیت تغذیه ای کلسیم گیاه تأکیده داشته اند. افزایش جذب کلسیم بوسیله‌ی گیاه در نتیجه کاربرد ترکیبات سیلیسیمی و تحت شرایط تنش را اینگونه توضیح داده‌اند که سیلیسیم با اثرگذاری بر ترمیم و یکپارچگی غشای پلاسمایی و همچنین افزایش فعالیت پمپ پروتونی H^+-ATPase باعث افزایش جذب کلسیم توسط گیاه می‌شود (لیانگ، 1999 و کایا و همکاران، 2006).

غلظت منیزیم برگ نیز از وضعیت تقریباً مشابهی با کلسیم تبعیت می‌کرد به طوری‌که تیمار 1 میلی-مولار سالیسیلات پتاسیم بیشترین کاهش غلظت منیزیم برگ را سبب شد (13/21 درصد کاهش نسبت به تیمار شاهد) به نحوی که فاقد اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد بود. بالاترین غلظت منیزیم برگ با حدود 33/96 درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد در تیمار 4 در هزار نمک سیلیکات پتاسیم اندازه‌گیری شد که دارای اختلاف معنی-داری با سایر تیمارها بود. منیزیم عنصر مرکزی در مولکول کلروفیل بوده و کمبود آن کاهش محتوای کلروفیل برگ و در نتیجه کاهش سوخت و ساز نوری گیاه را در پی دارد که از این طریق منجر به کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌شود. در مطالعات شهاتا و همکاران (2001) گزارش شد که سالیسیلات پتاسیم در سطوح بالای مصرف منجر به کاهش غلظت کلروفیل برگ و کاهش رشد گیاه می‌شود.

جدول 3- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر روی ترکیب شیمیایی برگ و میوه‌ی خیار در شرایط تنش سرمایی

منبع تغییرات	نیتروژن کل	فسفر	پتاسیم	کلسیم	منیزیم	آهن	منگنز	مس	روی	بور	نیترات در ماده خشک	نیترات در ماده تازه‌ی میوه خیار
						میانگین مربعات						
سالیسیلات پتاسیم (A)	0/218*	0/11**	0/082^{ns}	0/35**	0/01**	4387/39**	84332/40**	3/87ns	2744/26**	1834/78^{ns}	59228961/58**	0/23ns
سیلیکات پتاسیم (B)	0/020^{ns}	19/10**	0/009^{ns}	1/78**	0/03**	3528**	321267/92**	61/05**	15138**	11653/56***	25613948/80**	0/22ns
A × B	0/003^{ns}	0/55^{ns}	0/135^{ns}	0/79**	0/02**	3287/17**	73106/36**	2/53ns	640/042**	2693/72**	100043075/00**	2/04ns
تکرار	0/101^{ns}	0/04^{ns}	0/20^{ns}	0/06^{ns}	0/006ns	45/39^{ns}	1176/67^{ns}	0/26^{ns}	45/60^{ns}	59/06^{ns}	234386/01^{ns}	0/10^{ns}
ضریب تغییرات	3/25	12/46	5/66	12/78	7/42	11/11	8/60	9/60	7/77	11/26	8/69	6/63

*: معنی‌دار در سطح 5 درصد، **: معنی‌دار در سطح یک درصد

جدول 4- مقایسه میانگین‌های اثر تیمارها بر روی غلظت عناصر غذایی در برگ خیار در شرایط تنش سرمایی

فاکتور		نیتروژن کل	فسفر کل	مس کل
	سطح		درصد	
سالیسیلات پتاسیم (Sa)	صفر	6/414b± 0/36	0/94a± 0/14	10/27b
	0/5 میلی‌مولار	6/786a± 0/35	0/95a± 0/04	11/79a
	1 میلی‌مولار	6/525^{ab}	0/71b	10/58ab
سیلیکات پتاسیم (Si)	صفر	6/608a±0/ 13	0/75b± 0/14	9/04b± 0/72
	4 در هزار	6/542a±0/ 23	0/97a± 0/15	12/72a± 1/53
استانداردهای مربوط به غلظت عناصر غذایی در برگ خیار (د-کریج و همکاران، 1992)				
		نیتروژن کل	**فسفر کل**	**مس کل**
			درصد	
سطح کمبود		<1/8	< 0/47	<5
سطح مطلوب		4/2-5/6	0/6 -0/9	5-17
سطح بیشبود		-	-	-

*: به دلیل عدم مشاهده اثر معنی‌دار تیمارهای اعمال شده بر روی این صفات، نتیجه‌ی عددی ارائه نشده است.

جدول 5- مقایسه‌میانگین‌های اثر مصرف همزمان نمک‌های پتاسیمی سالیسیلیک و سیلیسیلیک اسید بر روی ترکیب شیمیایی برگ خیار در شرایط تنش سرمایی

تیمار	نیترات در ماده خشک (%)	کلسیم کل (%)	منیزیم کل (%)	آهن کل (mg/kg)	بور کل (mg/kg)	روی کل (mg/kg)	منگنز کل (mg/kg)
SaA0-SiA4	9361/18cd ± 1112/52	2/17a ± 0/17	0/71a ± 0/07	124bc ± 16/93	196a ± 9/54	169/33 a ± 16/01	788/25a ± 74/75
SaA0.5-SiA0	10418/65c ± 1005/70	1/29b ± 0/25	0/58b ± 0/05	139/67b ± 13/50	134/67b ± 14/50	94/50c ± 3/77	339/17c ± 18/24
SaA0.5-SiA4	3795/03e ± 942/11	1/19b ± 0/22	0/53b ± 0/66	127/33bc ± 13/50	144/33b ± 21/01	129/33b ± 9/02	427b ± 28/84
SaA1-SiA0	8124/62d ± 445/70	0/7c ± 0/001	0/46c ± 0/001	129bc ± 17/93	100c ± 3/31	57d ± 3/03	197e
SaA1-SiA4	15153/36b ± 1143/81	1/34b ± 0/22	0/59b ± 0/06	208/33a ± 29/01	148/67b ± 20/11	121/67b ± 7/64	397bc ± 21/17
شاهد	16923/67a ± 236/61	0/82c ± 0/04	0/53bc ± 0/04	107c ± 6	101/67c ± 10/60	94/83c ± 2/84	274/50d ± 3/5

استانداردهای مربوط به غلظت عناصر غذایی در برگ خیار (د-کریج و همکاران، 1992)

	نیترات در ماده خشک	کلسیم کل	منیزیم کل	آهن کل	بور کل	روی کل	منگنز کل
سطح کمبود	++	<1/2	<0/37	<15	<43	<26	<15
سطح مطلوب	++	4/2 -5/6	0/15-0/3	85-300	50-76	50-140	55-300
سطح بیشبود	++	-	0/3-1/5	-	108	300	550

SaA0-SiA4: 4 در هزار سیلیکات پتاسیم؛ SaA0.5-SiA0: 0/5 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم؛ SaA0.5-SiA4: 0/5 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم+ 4 در هزار سیلیکات پتاسیم؛ SaA1-SiA0: 1 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم؛ SaA1-SiA4: 1 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم+ 4 در هزار سیلیکات پتاسیم؛ شاهد: بدون مصرف سالیسیلیک و سیلیکات پتاسیم.

در هر ستون حروف مشابه نشان دهنده‌ی عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون دانکن است (P<0/05).

افزایش در غلظت آهن برگ در نتیجه‌ی مصرف سطوح مختلف سالیسیلات پتاسیم و سیلیکات پتاسیم اتفاق افتاد که تنها تیمارهای 0/5 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم (با حدود 30/53 درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد) و 1 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم + 4 در هزار سیلیکات پتاسیم (با حدود 94/7 درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد)، دارای اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد بودند.

افزایش قابل توجه در غلظت بور در برگ از جمله نتایج قابل تأملی بود که در شرایط تنش سرمایی در حضور مصرف سالیسیلات پتاسیم و سیلیکات پتاسیم اتفاق افتاد. بالاترین افزایش غلظت بور در تیمار 4 در هزار نمک سیلیکات پتاسیم اتفاق افتاد (92/78 درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد) و در رتبه‌ی دوم معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد، به ترتیب تیمارهای 1 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم + 4 در هزار نمک سیلیکات پتاسیم، 0/5 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم + 4 در هزار سیلیکات پتاسیم و 0/5 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم قرار داشتند (جدول 5). غلظت بور اندازه‌گیری‌شده در تمام تیمارها در شرایط تنش سرمایی، در دامنه‌ی بیشبود قرار داشتند (د-کریج و همکاران، 1992). که احتمالاً به نوعی به پاسخ-های دفاعی گیاه در مقابله با آثار نامطلوب تنش سرمایی مربوط می‌شود. همانطور که در جدول 4 ارائه شده است، گیاه برای مقابله با این افزایش غلظت بور در شرایط تنش سرمایی، اقدام به افزایش غلظت نیتروژن در برگ در حضور سطوح نمک سالیسیلات پتاسیم نمود. درست است که تفاوت معنی‌داری میان تیمارهای محلولپاشی و شاهد از نظر افزایش غلظت نیتروزن در برگ مشاهده نشد، اما همانطور که داده‌های این جدول نشان می‌دهد، در شرایط تنش سرمایی غلظت نیتروزن برگ حتی در تیمار شاهد بیشتر از حدود استاندارد گزارش شده است و این خود به پاسخ دفاعی گیاه مربوط می شود نه تیمارهای محلول‌پاشی. درباره ارتباط بین افزایش غلظت نیتروژن برای مقابله با افزایش غلظت بور پژوهش های متعددی انجام شده و همگی در این مورد اتفاق نظر داشتند که افزایش غلظت نیتروژن یک راهبرد کارآمد برای کاهش مسمومیت بور می باشد و بیان داشته اند که احتمالاً به دلیل اثر نیتروژن در افزایش رشد گیاه و در نتیجه وقوع اثر رقت، کاهش غلظت بور و در نتیجه کاهش مسمومیت آن در گیاه اتفاق می افتد (گوپتا و همکاران، 1973؛ وودراف و همکاران، 1987؛ کوهکن و مفتون، 2016).

تیمارهای اعمال شده غلظت روی در برگ را نیز به طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار دادند. به‌طوری‌که مصرف جداگانه و تلفیقی نمک سیلیکات پتاسیم بیشترین افزایش غلظت روی در برگ را سبب شد. بعبارت دیگر، نمک سیلیکات پتاسیم در مقایسه با سالیسیلات پتاسیم اثر بیشتری در افزایش غلظت روی در برگ نشان داد که نقش مهم ترکیبات سیلیسیمی در ارتقای وضعیت تغذیه‌ای گیاهان بطور مفصل توسط پائولیچ و همکاران (2021) تشریح شده است. بیشترین افزایش غلظت روی با حدود 78/56 درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد، در تیمار 4 در هزار سیلیکات پتاسیم اتفاق افتاد. اثر مثبت سیلیسیم در افزایش کارایی جذب عناصر بویژه روی و منگنز بواسطه-ی اثرگذاری سیلیسیم در افزایش ترشح اسیدهای آلی بوسیله‌ی ریشه گیاه و افزایش اسیدیته توسط محققین مختلف اثبات شده است (نئو و همکاران، 2017 و کوئونگ و همکاران، 2017). افزایش در سطح مصرف سالیسیلات پتاسیم منجر به کاهش در غلظت روی برگ شد این در حالی‌است که مصرف تلفیقی آن با نمک سیلیکات پتاسیم، افزایش معنی‌دار غلظت روی را در مقایسه با تیمار شاهد سبب گردید. عنصر روی فعال-کننده‌ی آنزیم کربنیک آنهیدراز بوده و در ساختار سوپراکسید دیسموتاز نیز حضور دارد (مارشنر، 1995). این آنزیم‌ها که در شرایط تنش غلظت آنها در گیاه افزایش می‌یابد منجر به افزایش مقاومت گیاه می‌گردد (مارشنر، 1995). بر اساس نتایج این مطالعه، افزایش در سطح مصرف سالیسیلات پتاسیم باعث کاهش غلظت روی در برگ شد و این یعنی افزایش اعمال تنش به گیاه.

سالیسیلات پتاسیم برخی فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه را بسته به غلظت مصرف آن، گونه‌ی گیاهی، مرحله رشد و شرایط محیطی افزایش می‌دهد (آق‌مسجدی و یارنیا، 1395). در مطالعاتی نیز گزارش شد که سالیسیلات پتاسیم در غلظت‌های بالا رشد گیاه و غلظت کلروفیل در گوجه‌فرنگی را کاهش می‌دهد (کرد و هاتوت، 1992).

وضعیت تقریباً مشابهی برای افزایش غلظت منگنز برگ در حضور سطوح نمک سیلیکات پتاسیم اتفاق افتاد به طوری‌که مصرف تلفیقی و جداگانه‌ی نمک سیلیکات پتاسیم افزایش قابل توجه غلظت منگنز برگ را در مقایسه با سایر تیمارها سبب شد. به استثنای تیمار 1 میلی‌مولار سالیسیلات پتاسیم که باعث کاهش معنی‌دار غلظت منگنز برگ در مقایسه با سایر تیمارها (و از جمله تیمار شاهد) شد، سایر تیمارها افزایش معنی‌دار غلظت منگنز را سبب شدند. بالاترین غلظت منگنز اندازه‌گیری شده در تیمار 4 در هزار نمک سیلیکات پتاسیم اتفاق افتاد که حدود 2/87 برابر غلظت اندازه‌گیری شده در تیمار شاهد بود، همچنین در دامنه‌ی غلظتی بالای گزارش شده توسط د-کریج و همکاران (1992) قرار داشت (بیشتر از 550 میلی‌گرم در کیلوگرم). این افزایش در کارایی جذب عناصر غذایی بوسیله‌ی سیلیسیم خود می‌تواند یکی از مکانیسم‌های محتمل سیلیسیم در تعدیل آثار تنش در نظر گرفته شود.

نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داد که تنش سرمایی اثر نامطلوبی بر غلظت نیترات، وضعیت عناصر غذایی برگ، بازارپسندی و عملکرد بوته‌های خیار داشت. در این تحقیق، سطوح سالیسیلات پتاسیم و سیلیکات پتاسیم، بطور معنی‌داری عملکرد کل، عملکرد بازارپسند و وضعیت تغذیه‌ای خیار را بهبود دادند. نتایج مربوط به پاسخ‌های تغذیه‌ای خیار به تیمارهای اعمال شده در شرایط تنش سرمایی نشان داد که، غلظت عناصر غذایی در برگ خیار در شرایط تنش سرمایی در نتیجه‌ی اعمال سیلیکات پتاسیم افزایش معنی‌دار نشان داد در حالی‌که سطوح سالیسیلات پتاسیم مصرفی (بویژه سطح 1 میلی‌مولار) باعث کاهش غلظت این عناصر در برگ شد. همچنین، غلظت بور در برگ تا سطوح غلظتی بیشبود افزایش یافت که به نوعی به پاسخ‌های دفاعی گیاه در شرایط تنش سرمایی مربوط می‌شود. در مقابل، نتایج نشان داد که غلظت نیتروژن در تیمارهای مذبور افزایش یافته است و این به معنی پاسخ گیاه برای مقابله با این افزایش غلظت بور در شرایط تنش سرمایی می‌باشد. بنابراین، اگرچه گیاه بسته به شدت و مدت زمان تنش، بخش مهمی از تعدیل آثار تنش اعمال شده را انجام می‌دهد اما نمی‌توان از نقش معنی‌دار مدیریت تغذیه‌ای در شرایط بروز تنش (در اینجا تنش سرمایی)، برای افزایش مقاومت گیاه و دستیابی به عملکردهای اقتصادی، بازارپسند و ایمن غافل شد.

فهرست منابع:

1. اکبری، س.، م. سیاری، و ف. قنبری. 1394. افزایش مقاومت به سرما در گیاهچه های خیار با کاربرد برخی از مواد تنظیم کننده رشد گیاهی. تولید فرآوری محصولات زراعی و باغی، 5(16): 36-25.
2. آذرفام، س.پ.، ح. نادیان، ع.ا .معزی، و ع. غلامی. 1399. تأثیر سطوح مختلف سیلیسیم از منبع سیلیسیلیک اسید بر بهبود صفات رویشی گیاه دارویی آلوئه ورا تحت تنش سرما. تحقیقات آب و خاک ایران، 51(12): 3113-3103.
3. آق‌مسجدی، پ.، و م. یارنیا. 1395. تأثیر رژیم‌های آبیاری و اسیدسالیسیلیک بر عملکرد دانه و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک ذرت. مجله علمی پژوهشی اکوفیزیولوژی گیاهی، 11 (37): 25-13.

4. بیات، ح.، ح. مردانی، ح. آرویی، و ی. سلاح‌ورزی. 1390. تأثیر سالیسیلیک اسید بر خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی دانهال های خیار *(Cucumis sativus cv. Super Dominus)* تحت شرایط تنش خشکی. پژوهش‌های تولید گیاهی (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، 18(3): 63-76.
5. جعفری، س.ر.، م.ج. آروین، و خ. منوچهری. 1390. بررسی اثرات متقابل سیلیس و سالیسیلیک اسید بر پاسخ های دفاعی گیاه خیار به تنش شوری،یازدهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر،کرمان.
6. جوانمردی، ج. 1388. مبانی علمی و عملی تولید نشای سبزی. انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد، 256 صفحه.
7. حقیقی، م.، و ر. ابوالقاسمی. 1398. اثر تنش دمای بالا و پایین بر تغییرات رشد، فتوسنتز و فعالیت آنتی اکسیدانی گوجه فرنگی در مرحله رشد رویشی. علوم سبزی‌ها، 3(1): 53-65.
8. سلطانی دلربا، ن.، ر. کرمیان، و م. رنجبر. 1390. اثر برهمکنش سالیسیلات پتاسیم و تنش سرما بر فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی در گیاه شیرین بیان (*Glycyrrhiza glabra* L.). داروهای گیاهی، 2 (1): 13-7.
9. محمد آبادی، ب.، ط. سیماکار، و غ. افشارمنش. 1393. بررسی تاثیر اسید سالیسیلیک بر کاهش تنش شوری در گوجه فرنگی (*Lycopersicon esculentum Mill.* L). اولین همایش ملی کشاورزی، محیط زیست و امنیت غذایی،جیرفت.
10. محمدخانی، ع.، پ. محقق، و ع.ا. فدائی تهرانی. 1395. اثر سیلیسیم بر افزایش مقاومت به تنش اکسیداتیو ناشی از سفیدک سطحی در کدوی پوست کاغذی(*Cucurbita pepo, var. styriaca*). علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای، 7(27): 53-61.
11. Baninasab, B. 2009. Amelioration of chilling stress by paclobutrazol in watermelon seedlings. Scientia horticulturae 121(2): 144-148.
12. Basirat, M., S.M. Mousavi, S. Abbaszadeh, M. Ebrahimi and M. Zarebanadkouki. 2019. The rhizosheath: a potential root trait helping plants to tolerate drought stress. Plant and Soil, 445(1), 565-575.
13. Bataglia, O.C., A.M.C. Furlani, J.P.F. Teixeira, P.R. Furlani, J.R. Gallo. 1983. Métodos de análise química de plantas. Instituto Agronômico, Campinas.
14. Bosnic, D., D. Nikolic, G. Timotijevic, J. Pavlovic, M. Vaculík, J. Samardzic, et al. 2019b. Silicon alleviates copper (Cu) toxicity in cucumber by increased Cu-binding capacity. Plant Soil 441, 629–641. doi: 10.1007/s11104-019-04151-5
15. Bosnic, D., P. Bosnic, D. Nikolic, M.nNikolic, and J. Samardzic. 2019a. Silicon and iron differently alleviate copper toxicity in cucumber leaves. Plants (Basel) 8:554. doi: 10.3390/plants8120554.
16. Cuong, T.X., H. Ullah, A. Datta, and T.C. Hanh. 2017. Effects of silicon-based fertilizer on growth, yield and nutrient uptake of rice in tropical zone of Vietnam. Rice Scienc, 24 (5): 283-290.
17. de Kreij, C., C. Sonneveld, M.G. Warmenhoven, and N.A. Straver. 1992. Guide values for nutrient element contents of vegetables and flowers under glass. 3rd Ed.
18. Elliott, C.L., and G.H. Snyder. 1991. Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. J Agric Food Chem. 39, 1118–1119. https://doi.org/10.1021/jf00006a024.
19. Fan, X., X. Wen, F. Huang, Y. Cai, and K. Cai. 2016. Effects of silicon on morphology, ultrastructure and exudates of rice root under heavy metal stress. Acta Physiologiae Plantarum, 38 (197), https://doi.org/10.1007/s11738-016-2221-8.
20. Foodstuffs. 1997. Determination of nitrate and / or nitrate content. Part 2. HPLC/IC method for the determination of nitrate content of vegetables and vegetable products. BS EN 12014-2.

21. Ghai, N., R.C. Setia, and N. Setia. 2002. Effect of paclobutrazol and salicylic acid on chlorophyll content, hill activity and yield components in *Brescia napus* L. (cv. GSL-1) Phytomorphol, 52: 83-87.
22. Greger, M., T. Landberg, and M. Vaculik. 2018. Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. Plants, 7, 41, doi:10.3390/plants7020041.
23. Gupta, U.C., J.D.E. Sterlinga, and H.G. Nass. 1973. Influence of various rates of compost and nitrogen on the boron toxicity symptoms in barley and wheat. Canadian Journal of Plant Science 53: 451-456.
24. Hashempour, A., M. Ghasemzhad, G. Fotouhi, and M.M. Sohani. 2014. The physiological and biochemical response to freezing stress olive plants treated with salicylic acid. Russian J. Plant Physio.61(4): 443-450.
25. Hu, A.Y., S.N. Xu, D.N. Qin, W. Li, and X.Q. Zhao. 2021. Role of silicon in mediating phosphorus imbalance in plants. Plants 10:51. doi: 10.3390/plants10010051.
26. Ibrahim, M.F.M., A. Faisal, and S.A. Shehata. 2016. Calcium chloride alleviates water stress in sunflower plants through modifying some physio-biochemical parameters. American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences 16 (4): 677-693
27. Jones, J.B., B. Wolf, and H,A. Mills. 1999. Plant analysis Handbook, Micro-Macro publishing, Inc, Athens, GA., pp: 110.
28. Kaya, C., L. Tuna, and D. Higgs. 2006. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. J. Plant Nutr. 29, 1469–1480. doi: 10.1080/01904160600837238.
29. Khan, M.I.R., M. Fatma, T.S. Per, N.A. Anjum, and N.A. Khan. 2015. Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. Frontiers in Plant Science, Volume 6, doi: 10.3389/fpls.2015.00462.
30. Koohkan, H., and M. Maftoun. 2016. Effect of Nitrogen– Boron Interaction on Plant Growth and Tissue Nutrient Concentration of Canola (*Brassica napus* L.). Journal of Plant Nutrition, DOI: 10.1080/01904167.2016.1143492.
31. Kord, M., and T. Hathout. 1992. Changes on some growth criteria, metabolic ac-tivities and endogenous hormones in tomato plants consequent to spray-ing with different concentrations of salicyladhyde. Egyptian Journal of Physiological Sci. 1992; 16:117.
32. Korndörfer, G.H., H.S. Pereira, and A. Nolla. 2004. Análise de silício no solo, planta e fertilizante. GPSi, Uberlândia.
33. Kostic, L., N. Nikolic, D. Bosnic, J. Samardzic, and M. Nikolic. 2017. Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions. Plant Soil. 419, 447–455. doi: 10.1007/s11104-017-3364-0.
34. Kováˇcik, J., J. Grúz, M. Baèkor, M. Strnad, and M. Repcák. 2009. Salicylicacid- induced changes to growth and phenolic metabolism in *Matricaria chamomilla* plants. Plant Cell Reports, 28, 135–143. doi:10.1007/s00299-008-0627-5.
35. Li, M., Q. Wang, Z. Liu, X. Pan, and Y. Zhang. 2019. Silicon application and related changes in soil bacterial community dynamics reduced ginseng black spot incidence in Panax ginseng in a short-term study. BMC Microbiol. 19:263. doi: 10.1186/s12866-019-1627-z.
36. Liang, Y. 1999. Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. Plant Soil 209, 217–224. doi: 10.1023/A:1004526604913.
37. Luengwilai, K., M. Saltveit, and D.M. Beckles. 2012. Metabolite content of harvested Micro-Tom tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit is altered by chilling and protective heat-shock treatments as shown by GC–MS metabolic profiling. *Postharvest Biology and Technology*, 63, 116-122.

38. Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants (2nd Ed.). Academic Press Inc., London, UK.
39. Miura, K., and Y. Tada. 2014. Regulation of water, salinity, and cold stress responses by salicylic acid. *Front. Plant Sci.* 5:4. doi:10.3389/fpls.2014. 00004.
40. Mousavi, S.M., B. Motesharezadeh, H.M. Hosseini, H. Alikhani, and A.A. Zolfaghari. 2018a. Root-induced changes of Zn and Pb dynamics in the rhizosphere of sunflower with different plant growth promoting treatments in a heavily contaminated soil. Ecotoxicology and environmental safety, 147, pp.206-216.
41. Mousavi, S.M., B. Motesharezadeh, H.M. Hosseini, H. Alikhani, and A.A. Zolfaghari. 2018b. Geochemical fractions and phytoavailability of zinc in a contaminated calcareous soil affected by biotic and abiotic amendments. Environmental geochemistry and health, 40(4), pp.1221-1235.
42. Nazar, R., N. Iqbal, S. Syeed, and N.A. Khan. 2011. Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under salt stress by enhancing nitrogen and sulfur assimilation and antioxidant metabolism differentially in two mungbean cultivars. Journal of Plant Physiology, 168, 807–815. doi:10.1016/j.jplph.2010.11.001.
43. Neu, S., J. Schaller, and G. Dudel. 2017. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). Scientific reports, 7:40829; DOI: 10.1038/srep40829.
44. Noman Sallam, B., T. Lu, H. Yu, Q. Li, Z. Sarfraz, M. Shahid Iqbal, S. Khan, H. Wang, P. Liu, and W. Jiang. 2021. Productivity Enhancement of Cucumber (Cucumis sativus L.) through Optimized Use of Poultry Manure and Mineral Fertilizers under Greenhouse Cultivation. Horticulture, 7, 256.
45. Pavlovic, J., L. Kostic, P. Bosnic, E.A. Kirkby, and M. Nokolic. 2021. Interactions of Silicon With Essential and Beneficial Elements in Plants. Front. Plant Sci., 23 June 2021 | https://doi.org/10.3389/fpls.2021.697592
46. Sahebi, M., M.M. Hanafi, A. Siti Nor Akmar, M.Y. Rafii, P. Azizi, F. Tengoua, J. Nurul Mayzaitul Azwa, and M. Shabanimofrad. 2015. Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. BioMed Res. Int.
47. Schaller, J., D. Puppe, D. Kaczorek, R. Ellerbrock, and M. Sommer. 2021. Silicon cycling in soils revisited. Plants 10:295. doi: 10.3390/plants10020295.
48. Schaller, J., S. Faucherre, H. Joss, M. Obst, M. Goeckede, B. Planer-Friedrich, et al. 2019. Silicon increases the phosphorus availability of Arctic soils. Sci. Rep. 9:449. doi: 10.1038/s41598-018-37104-6.
49. Shehata, S.A.M., S.I. Ibrahim and A.M. Zaghlool, 2001. Physiological response of flag leaf and ears of maize plant induced by foliar application of kinetin (Kin) and salicylic acid (SA). Annals Agric. Sci. Ain Shams Univ. Cairo, 46(2): 435-449.
50. Tavallali, V., M. Rahemi, S. Eshghi, B. kholdebarin, and A. Ramezanian. 2010. Zinc alleviates salt stress and increases antioxidant enzyme activity in the leaves of pistachio (*Pistacia vera* L. Badami) seedlings. Turkish Journal Agriculture Forestry, 34(4): 349-359.
51. Usanmaz, S., and K. Abak. 2019. Plant growth and yield of cucumber plants grafted on different commercial and local rootstocks grown under salinity stress. Saudi Journal of Biological Sciences, 26, 1134-1139.
52. Wang, L.J., and S.H. Li. 2006. Salicylic acid-induced heat or cold tolerance in relation to Ca^{2+} homeostasis and antioxidant systems in young grape plants. Plant Science 170(4):685-694.
53. Woodruff, J.R., F.W. Moore, and H.L. Musen. 1987. Potassium, boron, nitrogen, and lime effects on corn yield and earleaf nutrient concentration. Agronomy Journal 79: 520-524.

Evaluation of the Interaction of Potassium Salicylate and Potassium Silicate on Yield, Nutritional Status, and Quality of Greenhouse Cucumber under Cold Stress Condition

M. Basirat[1], S. M. Mousavi, and M. Abbaspour

Assistant Professor, Department of Soil Chemistry, Fertility and Plant Nutrition Researches; Soil and Water Research Institute; Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran;
E-mail: majid_basirat@yahoo.com

Assistant Professor, Department of Soil Chemistry, Fertility and Plant Nutrition Researches; Soil and Water Research Institute; Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran;
E-mail: majid62mousavi@gmail.com

Soil Expert, Department of Soil Genesis, and Classification; Soil and Water Research Institute; Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran;
E-mail: mabbaspour25@gmail.com

Received: July, 2021, and Accepted: September, 2021

Abstract

The goal of any greenhouse owner is to adopt strategies that can maintain the plant's yield under temperature stress conditions. The aim of this study was to investigate the effect of different levels of potassium salicylate $C_7H_5KO_3$ (0, 0.5, and 1 mM) and potassium silicate (0 and 4 parts per thousand (ppt)) on the yield and nutritional status of greenhouse cucumber (*Cucumis sativus)* under cold stress conditions (in the temperature range of 15-17 ℃). This experiment was conducted as factorial arrangement based on a completely randomized design with 3 replications under greenhouse condition in Karaj, Iran. The results showed that the treatments significantly affected the concentration of nitrate and nutrients in the plant tissue, quality, and yield of cucumber. Also, simultaneous foliar application of potassium salicylate and silicate significantly affected the total yield and marketable yield of cucumber. The highest increase in total yield and marketable yield compared to the control (94.91% and 96.01%, respectively) were measured in 0.5 mM potassium salicylate treatment. Also, concentrations of N, B, and Mn in leaf significantly increased compared to the control ($P<0.05$). Furthermore, compared to the control treatment, the spray treatments significantly reduced nitrate content of leaf dry matter: 11% in 1 mM potassium salicylate+4 ppt potassium silicate and 78% in 0.5 mM potassium salicylate+4 ppt potassium silicate. Generally, the findings of this study showed that application of potassium salicylate and potassium silicate can increase the yield and promote the marketable yield of greenhouse cucumber under cold stress conditions.

Keywords: Cucumber nutritional management; Low temperature stress.

[1]. Corresponding author: Department of Soil Chemistry, Fertility, and Plant Nutrition Researches; Soil and Water Research Institute; Karaj, Iran.