University of Birjand

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Vol. 17, No. 3, pp. 569-581 (Fall 2024)

https://doi.org/10.22077/ESCS.2024.6197.2200

Original article

The effect of salicylic acid foliar application on improving shoot and root growth of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) under cadmium stress conditions

H. Kakaei[1], A.A. Amirinejad[2*], M. Ghobadi[3]

1. M.Sc. Graduate of Soil Resources Management, Department of Soil Science and Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran
2. Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran
3. Associate Professor, Department of Plant Genetics and Production, Razi University, Kermanshah, Iran

Received 7 March 2023; Accepted 20 May 2023

Extended abstract

Introduction

Heavy metals are non-biodegradable and persistent in nature thereby disrupting the environment and causing huge health threats to humans. Cadmium (Cd) is a toxic heavy metal that enters the environment through various anthropogenic sources, and inhibits plant growth and development. Cadmium toxicity may result from disturbance in plant metabolism as a consequence of disturbance in the uptake and translocation of mineral nutrients. The use of plant hormones has been introduced as a simple and suitable strategy to reduce the effect of heavy metals in plants. A new method for reducing the effect of cadmium on plants is the use of growth regulators such as salicylic acid (SA). Tomato (*Lycopersicon esculentum*) is an important vegetable that is rich in minerals, various vitamins and antioxidant compounds. Since the cultivation of tomatoe, as an important and highly productive crop, is very common in many parts of Iran, there is a possibility of contamination of the soil under cultivation with cadmium. Therefore, the present study was conducted to evaluate the the effects of foliar spraying of salicylic acid on reducing Cd-induced stress in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.).

Materials and methods

A factorial experiment based on a complete randomized design with three replications was conducted in a greenhouse of Razi University. Factors included Cd at three levels (0, 15 and 30 mg kg^{-1} as $Cd(NO_3)_2$) and SA at three levels (0, 250, and 500 µM). The solutions containing Cd-(NO3)2 were sprayed uniformly on the sub-samples separated from the original soil sample according to the desired concentrations. The samples were kept moist for 30 days at moisture conditions close to field capacity. At the four-leaf stage, SA solutions were sprayed three times on the foliage of the plants, until the beginning of flowering. After harvesting, some characteristics including soluble sugars and proline contents, plant height, dry weights of shoots and roots, and root volume and length were determined. All plant parameters were then averaged for each pot. Also, Cd concentrations in extracts obtained from the digestion of leaf tissues, were measured by Varian AA220 atomic absorption spectrophotometer. The analysis of variance (ANOVA) and comparison of means (Duncan's multiple range test) were performed using SPSS-16 software.

* Corresponding author: Aliashraf Amirinejad; E-Mail: aliamirinejad@yahoo.co.uk

© 2024, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Results and discussion

The results revealed that Cd stress reduced all plant characteristics, such as plant height, root volume and root length, as well as, dry weights of shoots and roots, and elevated leaf Cd concentration, proline content and soluble sugars in tomato. However, the SA application resulted in improvements in growth parameters. Also, the results showed that the interaction effects of Cd and SA on the most growth characteristics such as plant length, shoot and root dry weights, stem diameter, leaf area, and proline content, soluble sugars and Cd concentration were significant ($P < 0.01$). The highest amount of soluble sugars (0.48 mg kg^{-1}), proline content (26.3 mmol g^{-1}) and Cd concentration (0.685 mg) were obtained in 30 mg kg^{-1} of Cd and 0 µM SA. Also, the highest amount of soluble sugars (0.53 mg kg^{-1}), plant length (44.6 cm), root length (19.6 cm), shoot dry weight (7.51 g), and leaf area (268.2 cm^2) were found in the treatment of 500 µM SA and 0 mg kg^{-1} Cd.

Conclusion

The application of salicylic acid effectively increased the all measured growth parameters, including plant biomass, and total root volume. Cd stress reduced growth indices and, increased proline content and soluble sugars in tomato. Also, it seems that under Cd-induced stress, SA is an effective approach for improving crop growth by increasing plant resistance. In general, the application of appropriate concentration of salicylic acid (500 µM), as a plant hormone, is an effective, simple and low-cost strategy to reduce the adverse effects of Cd (30 mg kg^{-1} soil) stress in tomato.

Keywords: Growth characteristics, Heavy metals, Plant hormone

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد هفدهم، شماره سوم، پائیز ۱۴۰۳

https://doi.org/10.22077/ESCS.2024.6197.2200

مقاله پژوهشی

تأثیر محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید بر بهبود رشد اندام هوایی و ریشه گوجه فرنگی (*Lycopersicon esculentum* L.) در شرایط تنش کادمیوم

حدیث کاکایی[۱]، علی‌اشرف امیری‌نژاد[۲*]، مختار قبادی[۳]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد مدیریت منابع خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه رازی، کرمانشاه
۲. استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه رازی، کرمانشاه
۳. دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
فلزات سنگین
ویژگی‌های رشدی
هورمون‌گیاهی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۱۲/۱۶

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۲/۳۰

تاریخ انتشار:
پائیز ۱۴۰۳

۱۷(۳): ۵۶۹-۵۸۱

چکیده

یک روش جدید کاهش اثر فلزات سنگین بر ویژگی‌های رشدی گیاهان، استفاده از مواد تنظیم‌کننده رشد مانند اسید سالیسیلیک است. به‌منظور بررسی اثرات سالیسیلیک اسید بر کاهش تنش کادمیوم در گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* L.)، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل کادمیوم در سه سطح (صفر، ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از نمک نیترات کادمیوم) و سالیسیلیک اسید در سه سطح (۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میکرومولار) بودند. نتایج نشان داد که اثرات متقابل کادمیوم و سالیسیلیک اسید بر بیشتر ویژگی‌های رشدی از قبیل ارتفاع بوته، وزن خشک شاخساره و ریشه، قطر ساقه، سطح برگ و نیز مقادیر پرولین، قندهای محلول و غلظت کادمیوم اندام هوایی معنی‌دار بود ($P \leq ۰/۰۱$). بیش‌ترین مقدار پرولین (۲۶/۳ میلی‌مول بر گرم) و کادمیوم اندام هوایی (۰/۶۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم و بدون سالیسیلیک اسید به دست آمد. همچنین، بیشترین مقدار قندهای محلول (۰/۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، ارتفاع گیاه (۴۴/۶ سانتی‌متر)، طول ریشه (۱۹/۶ سانتی‌متر)، وزن خشک شاخساره (۷/۵۱ گرم) و سطح برگ (۲۶۸/۲ سانتی‌متر مربع) در تیمار ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و بدون کادمیوم حاصل شد. به‌طورکلی، کاربرد سالیسیلیک اسید، به‌عنوان یک هورمون گیاهی، راه‌حلی مؤثر، ساده و کم‌هزینه برای کاهش اثرات منفی تنش کادمیوم در گوجه‌فرنگی است.

مقدمه

فلزات سنگین به دلیل غیرقابل‌تجزیه بودن و نیز آثار زیان‌بار فیزیولوژیک بر موجودات زنده، حتی در غلظت‌های کم، اهمیت ویژه‌ای از نظر آلودگی محیط‌زیست دارند (Ferronato and Torretta, 2019). از متداول‌ترین فلزات سنگین در خاک‌های آلوده کادمیوم است (Emamverdian et al., 2015). کادمیوم به دلیل تحرک و پویایی زیاد در خاک، امکان جذب زیاد به‌وسیله ریشه گیاهان، سمیت قابل‌توجه و نیز نیمه‌عمر بیولوژیکی حدود ۳۰ سال، از فلزات سمی و خطرناک محسوب می‌گردد (Fuleky and Barna, 2008). کادمیوم به طور عمده از طریق فرایندهای صنعتی و کودهای فسفاته وارد خاک و زنجیره غذایی می‌شود؛ به عبارت دیگر، کادمیوم بعد از جذب به‌وسیله ریشه، تشکیل کمپلکس-های پیچیده با ترکیبات آلی مانند پروتئین‌ها داده و از فعالیت ضروری سلول‌ها جلوگیری می‌کند (Popova et al., 2009). همچنین، با افزایش پراکسیداسیون لیپیدها و تولید گونه‌های فعال‌اکسیژن، تخریب غشاء را فراهم می‌سازد (Poortabrizi et al., 2018). تاکنون از روش‌های متفاوتی برای کاهش آثار سوء آلودگی فلزات سنگین خاک بر گیاهان استفاده شده است

* نگارنده پاسخگو: علی اشرف امیری‌نژاد. پست الکترونیک: aliamirinejad@yahoo.co.uk

که اغلب آن‌ها علاوه بر داشتن هزینه زیاد، سبب تخریب ساختار فیزیکی و شیمیایی و یا کاهش فعالیت‌های حیاتی خاک می‌شوند. در این راستا، کاربرد هورمون‌های گیاهی می‌تواند یک راه‌حل ساده و مناسب برای غلبه بر اثرات مخرب این فلزات باشد (Popova et al., 2009). به‌عبارت‌دیگر، می‌توان از هورمون‌های گیاهی مانند سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک راهکار مناسب برای تعدیل اثرات منفی تنش کادمیوم در گیاهان استفاده کرد (Vaculík et al., 2019).

سالیسیلیک اسید یا اورتوهیدروکسی بنزوئیک‌اسید یک ترکیب فنولی و از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی است که در گیاهان تحت تنش‌های محیطی، می‌تواند نقش حفاظتی داشته و مقاومت گیاه را در برابر تنش افزایش دهد. به عبارتی، این ماده در گیاهان تحت تنش‌های محیطی نقش آنتی اکسیدان را عمل کرده و باعث حذف رادیکال‌های آزاد در گیاهان می‌شود (Taheri Oshtrinani and Fathi, 2016). همچنین سالیسیلیک اسید می‌تواند تأثیرات تخریبی فلزات سنگین بر رشد گیاهان را تعدیل کند. در این راستا، سالیسیلیک اسید با مکانیزم‌های متعددی، از جمله اثر بر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند کاتالاز و پراکسیدازها و متابولیت‌هایی مانند اسید آسکوربیک و گلوتاتیون می‌تواند اثرات ناشی از تنش فلزات سنگین را کاهش دهد (Abbasi et al., 2020). همچنین به دلیل داشتن گروه هیدروکسیل آزاد بر روی حلقه بنزوئیک‌اسید، قادر به کلاته کردن فلزات سنگین است (Popova et al., 2009). البته اثرات سالیسیلیک اسید بر فرایندهای رشدی گیاهان تحت تنش بستگی به نوع و گونه گیاهی، دوره رشد، غلظت به‌کاررفته و شرایط محیطی دارد (Abbasi et al., 2020).

گوجه‌فرنگی با نام علمی *Licopersicon esculentum* از خانواده بادمجانیان (Solanaceae) است. این سبزی در سطح بیش از پنج میلیون هکتار در دنیا کشت شده و تولید سالانه آن حدود ۱۶۱ میلیون‌تن است (FAO, 2021). گوجه‌فرنگی سرشار موادمعدنی، انواع ویتامین‌ها و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی بوده و از مهم‌ترین محصولات‌زراعی جهان در ارتباط با سلامت و تغذیه انسان به شمار می‌آید (Veselina and Dinev, 2020). کشت گوجه‌فرنگی در بسیاری از نقاط ایران به‌عنوان یک محصول‌زراعی مهم و پربازده رایج است؛ بنابراین احتمال تجمع کادمیوم در خاک مناطقی که به‌طور غیراصولی از پساب مراکزصنعتی یا بی‌رویه از کودهای فسفاته استفاده می‌کنند، دور از انتظار نیست.

در این تحقیق، تأثیر محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید، به عنوان یک آنتی اکسیدان و کاهنده اثرات زیان‌بار فلزات سنگین، بر بهبود پارامترهای رشد، مانند ارتفاع بوته، وزن خشک شاخساره و ریشه و سطح برگ گیاه گوجه فرنگی (*Lycopersicon esculentum* L.) و نیز مقادیر پرولین و قندهای محلول، در شرایط تنش کادمیوم بررسی شد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری اراضی دانشگاه رازی با مشخصات جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۹ دقیقه و ۱۴ ثانیه شمالی و ۴۷ درجه و ۶ دقیقه و ۱۴ ثانیه شرقی انجام گرفت. آنالیزهای خاک شامل تعیین بافت به روش هیدرومتر، pH گل اشباع و هدایت الکتریکی عصاره آن (EC) به‌وسیله دستگاه‌های مربوطه، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسیدکلریدریک، کربن آلی به روش اصلاح شده واکلی و بلاک و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش استات آمونیوم صورت گرفت (Klute, 1986). جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورداستفاده را نشان می‌دهد.

آزمایش به‌صورت فاکتوریل، در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی انجام گرفت. تیمارها شامل کادمیوم در سه سطح (۰، ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم‌خاک از نمک نیترات‌کادمیوم) و سالیسیلیک‌اسید در سه سطح (۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میکرومولار) بودند.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورداستفاده

Table 1. Physical and chemical properties of the soil used

کادمیوم Cd	CEC	آهک $CaCO_3$	N_t	کربن آلی OC	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	EC	pH
mg kg^{-1}	Cmol kg^{-1}	----------%----------						ds m^{-1}	
0.08	18	31.2	0.08	0.83	25	64.5	10.5	0.28	7.8

انتخاب سطوح تیمارها بر اساس نتایج تحقیقات قبل در خصوص گوجه‌فرنگی و سایر گیاهان مشابه صورت گرفت (Arvin et al., 2014; Vaculík et al., 2019; Guo et al., 2018). برای اعمال تیمار کادمیوم، ابتدا بر مبنای سطوح آلودگی، مقدار نیترات کادمیوم برای هر گلدان محاسبه گردید. بعد ۴ هفته قبل از عملیات کاشت، نمونه خاک هر گلدان (به‌میزان ۸ کیلوگرم) با محلول نیترات‌کادمیوم اسپری گردید. طی این مدت (حدود ۳۰ روز)، نمونه‌های خاک ضمن بهم‌زدن، در شرایط نزدیک به رطوبت ظرفیت‌زراعی در گلخانه نگه‌داشته شد.

سپس، نمونه‌های خاک در گلدان‌هایی با گنجایش ۱۰ کیلوگرم (ارتفاع ۳۰ و قطر دهانه و کف به ترتیب ۲۳ و ۱۸ سانتی‌متر) ریخته شد. به‌منظور انجام زهکشی، حدود دو سانتی‌متر ماسه درشت در کف هر گلدان ریخته شد. بعد تعداد ۸ عدد نشاء گوجه‌فرنگی رقم کیان در مرحله ۴ برگی به هر گلدان منتقل گردید. دو هفته پس از استقرار کامل نشاء¬ها، ۵ گیاهچه را باقی گذاشته و بقیه تنک شدند. سپس تیمار سالیسیلیک اسید به‌صورت محلول‌پاشی برگی تا خیس شدن کامل سطح برگ‌های گیاه در ساعات غروب آفتاب صورت گرفت. این عملیات در سه مرحله بافاصله ده روز یک‌بار ادامه یافت. تیمار شاهد با آب مقطر اسپری گردید. وجین علف‌های هرز به‌صورت روزانه و آبیاری مطابق با نیاز آبی گیاه دو یا سه بار در هفته انجام شد.

در پایان رشد رویشی گیاه (قبل از گلدهی)، مقدار قندهای محلول، پرولین و کادمیوم اندام هوایی و نیز وزن خشک اندام هوایی و ریشه (خشک شده در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت)، سطح برگ (با استفاده از کاغذ شطرنجی)، قطر ساقه هر بوته (توسط کولیس دیجیتالی)، حجم ریشه (با تغییر حجم آب در یک استوانه مدرج) و سطح ریشه (با استفاده از رابطه اتکینسون) تعیین و بر مبنای میانگین هر بوته محاسبه شد.

در تعیین مقدار قندهای محلول، ۱/۵ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد به ۰/۵ گرم نمونه خشک گیاهی افزوده و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه نگهداری شد. بعد نمونه‌ها با دور ۱۳۰۰۰ به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شدند. فاز مایع را در یک لوله‌آزمایش قرار داده تا اتانول آن تبخیر شود. به هر نمونه ۱/۵ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه و تکان داده شد. بعد ۱۰ میکرولیتر از نمونه را در یک فالکون ریخته و به آن ۲۵۰ میکرولیتر محلول ۰/۵ درصد فنول و ۱۲۵۰ میکرولیتر اسیدسولفوریک ۹۸ درصد اضافه شد. بعد شدت جذب نور در طول‌موج ۴۸۵ نانومتر با اسپکتروفتومتر قرائت و از روی منحنی استاندارد، مقدار قندهای محلول تعیین شد (Dubois et al., 1956).

برای تعیین مقدار پرولین، ۰/۵ گرم پودر خشک و ۱۰ میلی‌لیتر سولفوسالیسیلیک سه درصد را در یک لوله‌آزمایش ریخته و محتویات به مدت ۴۸ ساعت در دمای پایین نگهداری و بعد صاف گردید. یک میلی‌لیتر از محلول حاصل را با یک میلی‌لیتر معرف ناین هیدرین و یک میلی‌لیتر اسید استیک ترکیب و به مدت یک ساعت در بن ماری با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. دو میلی‌لیتر تولوئن به هر نمونه اضافه و بعد شدت جذب نور با اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر قرائت و از روی منحنی استاندارد، مقدار پرولین تعیین شد (Bates et al., 1973).

برای اندازه‌گیری مقدار کادمیوم، ۰/۵ گرم پودر خشک گیاهی را با بوته چینی در کوره الکتریکی قرار داده شد. دمای کوره به‌تدریج و در عرض ۲ ساعت به ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد رسانده و تا ۶ ساعت نگه داشته شد. بعد به خاکستر حاصل ۲/۵ میلی‌لیتر اسیدکلریدریک ۲ مولار افزوده و محتویات در یک بالن ژوژه ۲۵ میلی‌لیتری صاف و جمع‌آوری و با آب مقطر به حجم رسانیده شد. غلظت کادمیم عصاره‌ها توسط دستگاه جذب اتمی (مدل AA220 شرکت Varian استرالیا) قرائت شد (Klute, 1986).

آنالیز آماری داده‌ها با نرم‌افزار SPSS-18 و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ایی دانکن (در سطح احتمال پنج درصد) صورت گرفت.

نتایج و بحث

تاثیرکادمیوم و سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های بخش هوایی گوجه‌فرنگی

مطابق نتایج تجزیه واریانس، اثر متقابل کادمیوم و سالیسیلیک اسید بر پارامترهای ارتفاع بوته، وزن خشک اندام هوایی، قطر ساقه، سطح برگ و غلظت کادمیوم، پرولین و قندهای محلول در سطح یک درصد معنی‌دار شده است (جدول ۲).

جدول ۲. تجزیه واریانس اثرات کادمیوم و سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های هوایی گوجه‌فرنگی (میانگین مربعات)

Table 2. Analysis of variance for effects of Cd and salisilic acid on the aerial characteristics of tomato

S.O.V منابع تغییرات	درجه آزادی df	غلظت کادمیوم Cd concentration	قندهای محلول Soluble sugars	پرولین Proline	سطح برگ Leaf area	قطر ساقه Stem diameter	وزن خشک برگ Leaf dry weight	ارتفاع گیاه Plant height
کادمیوم Cd	2	0.916**	1.38**	0.021*	8286**	14.4**	13.3**	201.5**
سالیسیلیک اسید Salisilic acid (SA)	2	0.023**	0.99**	0.157**	6652**	5.02**	25.6**	234.7**
کادمیوم × سالیسیلیک اسید Cd × SA	4	0.005**	1.62**	0.05**	449.7**	0.39**	0.46**	6.27**
خطا Error	18	0.001	0.32	0.004	92.2	0.083	0.08	1.07
ضریب تغییرات CV(%)	-	*11.4*	*17.3*	*1.7*	*5.2*	*6.2*	*6.0*	*3.0*

ns، *و**: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار بودن در سطح پنج و یک درصد را نشان می‌دهد.

ns, **, * represent non-significant and significant at the probability levels of 1% 5%, respectively

.

غلظت کادمیوم اندام هوایی

طبق نتایج مقایسه میانگین، بیش‌ترین غلظت کادمیوم اندام هوایی (۰/۶۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم و بدون استفاده از سالیسیلیک اسید و کم‌ترین آن (۰/۰۵۱) در تیمار ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و بدون کاربرد کادمیوم به دست آمد (جدول ۳). به عبارتی، با افزایش کاربرد کادمیوم در خاک، غلظت آن در اندام هوایی افزایش، اما با افزایش غلظت سالیسیلیک اسید کاربردی، مقدار کادمیوم اندام هوایی کاهش پیدا کرد. نتایج پژوهش پور تبریزی و همکاران (Poortabrizi et al., 2018) نیز نشان داده که با افزایش غلظت کادمیوم در محیط ریشه، مقدار کادمیوم برگ و ریشه افزایش‌یافته است. مشابه این نتایج نیز توسط بلوچی و همکاران (Balouchi et al., 2017) ارائه شده است. همچنین، در برخی پژوهش‌ها گزارش شده که غلظت ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید سبب کاهش مقدار کادمیوم ریشه و اندام هوایی سویا (Drazic and Mihailovic, 2005)، نخود (Popova et al., 2009) و ذرت (Vaculík et al., 2019) گردیده است.

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل کادمیوم × اسید سالیسیلیک از نظر ویژگی‌های هوایی گوجه‌فرنگی

Table 3. Mean comparisons of interaction of Cd × salicylic acid on the aerial characteristics of tomato

سطوح سالیسیلیک اسید Salisilic Acid level	سطوح کادمیوم Cd levels	وزن خشک شاخساره Leaf dry weight	قطر ساقه Stem diameter	سطح برگ Leaf area	ارتفاع گیاه Plant height	پرولین Proline	کادمیوم Cd	قندهای محلول Soluble sugars
µmol l^{-1}	mg kg^{-1}	g	mm	cm^2	cm	µmol g^{-1}	----------mg kg^{-1}---------	
0	0	5.46^{c} ±0.5	4.2^{d} ±0.43	188.9^{b}±5.4	32.2^{c}±2.25	8.7^{e}±1.1	0.071^{f}±0.01	0.05 ^{b}±0.01
	15	3.18^{e} ±0.3	3.6^{e} ±0.22	165.1^{c}±3.1	28.6^{d}±2.6	15.21^{c}±1.8	0.33^{c}±0.06	0.30 ^{ab}±0.05
	30	1.55^{f} ±0.5	2.64^{f}±0.19	142.7^{d}±5.7	23.7^{e}±4.75	26.3^{a}±2.3	0.685^{a}±0.1	0.34^{ab}±0.0.06
250	0	6.67^{b}±0.6	5.8^{b} ±0.51	193.8^{b}±9.8	39.8^{b}±4.8	3.31^{g}±0.7	0.067^{f}±0.02	0.31^{ab}±0.02
	15	4.65^{d}±0.55	4.1^{d} ±0.32	171.2^{c}±4.2	32.1^{c}±2.0	10.33^{d}±1.07	0.22^{d}±0.01	0.33^{ab}±0.07
	30	3.13^{e} ±0.21	3.6^{e} ±0.21	156.0^{cd}±5	28.6^{d}±3.65	18.39^{b}±1.4	0.57^{b}±0.03	0.38^{ab}±0.05
500	0	7.51^{a} ±0.5	7.1^{a}±0.55	268.2^{a}±7.2	44.6^{a}±3.48	2.1^{h}±0.2	0.051^{f}±0.01	0.32^{ab}±±0.08
	15	5.61^{c} ±0.6	5.51^{b}±0.3	191.4^{b}±8.4	39.5^{b}±2.5	8.38^{f}±0.45	0.16^{e}±0.03	0.37^{ab}±0.07
	30	4.65^{d} ±0.4	4.9^{c} ±0.33	170.3^{c}±5.35	32.9^{c}±3.2	10.41^{d}±1.5	0.321^{c}±0.13	0.53^{a}±0.07

مقدار پرولین اندام هوایی گیاه

طبق نتایج مقایسه میانگین، بیش‌ترین مقدار پرولین بخش هوایی گیاه (۲۶/۳ میکرومول بر گرم) در تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم و بدون اسید سالیسیلیک و کم‌ترین آن (۲/۱ میکرومول برگرم) در تیمار ۵۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک و شاهد کادمیوم به دست آمد (جدول ۳). یکی از ترکیبات مهم سیستم دفاعی گیاهان تحت شرایط تنش‌های محیطی و از جمله تنش فلزات سنگین، تولید پرولین به مقدار بیش‌تر نسبت به شرایط معمولی و بدون تنش است؛ به عبارت دیگر، در شرایط تنش، تولید و تجمع پرولین در سیتوپلاسم سلولی گیاهان نسبت به سایر آمینواسیدها بیشتر صورت می‌گیرد (Rasheed et al., 2014).

در طی تنش اکسیداتیو، یکی از مکانیزم‌های دفاع آنتی‌اکسیدانی برای حفاظت سلول، افزایش پرولین است که به بالارفتن تحمل گیاه در برابر تنش منجر می‌گردد. به عبارتی، پرولین از طریق تنظیمات اسمزی سلول و محافظت از پروتئین‌ها، نقش بسزایی در متابولیسم گیاهان تحت تنش دارد (Mahdavian et al., 2016). به عقیده رشید و همکاران (Rasheed et al., 2014)، به علت نقش پرولین در محافظت از غشاءهای زیستی، پروتئین‌ها، آنزیم‌ها و نیز تنظیم اسمزی و حفظ خود تعادلی اکسیداسیون و احیاء سلول، این ماده در تحمل گیاهان در برابر تنش فلزات سنگین اهمیت ویژه‌ای دارد.

از طرف دیگر، سالیسیلیک اسید از طریق کاهش تنش اکسایشی و کمک به حفاظت عشاء و اندامک‌های سلولی و نیز پروتئین‌سازی سلول و فعالیت آنزیم‌ها موجب کاهش تولید پرولین در گیاهان می‌شود (Mishra and Choudhuri, 1999). همچنین، سالیسیلیک اسید بر فتوسنتز و رشد عمومی گیاهان تحت تنش محیطی نقش مثبت دارد و لذا از طریق تسریع در بهبود رشد کلی گیاه، موجب توسعهٔ واکنش‌های ضد تنشی و کاهش تجمع پرولین می‌شود (Aghlmand et al., 2017). گزارش شده که اسید سالیسیلیک به‌عنوان یک مولکول القایی در دفاع از گیاهان مؤثر بوده، به‌طوری که در نتیجه کاهش اسید سالیسیلیک، گیاهان علائم دفاعی از خود بروز نداده و حساسیت آنها نسبت به عوامل محیطی افزایش یافت (Emamverdian et al., 2015).

قندهای محلول

بیش‌ترین مقدار قندهای محلول (۰/۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیترات کادمیوم و ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و کم‌ترین آن (۰/۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار شاهد کادمیوم و بدون کاربرد سالیسیلیک اسید به دست آمد (جدول ۳). افزایش میزان قندهای محلول در بافت گیاهان در اغلب تنش‌های محیطی، یک مکانیسم تحمل در برابر تنش بوده و بیانگر نوعی سازگاری گیاهان برای حفظ شرایط است. به‌عبارت‌دیگر، حضور فلزات سنگین و از جمله کادمیوم در منطقه ریزوسفر، زمینه جذب و ورود آنها به گیاه را فراهم ساخته که ضمن کاهش سرعت تنفس، بر متابولیسم قندها اثر می‌گذارند (Aldoobie and Beltag, 2013). در واقع، افزایش کربوهیدرات‌ها در شرایط تنش محیطی باعث تنظیم پتانسیل آب سلول در بخش سیتوزول برای مقابله با غلظت بالای یون‌های تجمع یافته در واکوئل می‌گردد. بنابراین، متابولیسم قندها که باعث تجمع قندهای محلول می‌گردد، به‌عنوان یک پیام متابولیکی عمل کرده تا گیاه بتواند ذخیره کربوهیدراتی خود برای حفظ متابولیسم پایه سلول در شرایط تنش را در حد مطلوب نگه دارد. اثر تنش سرب در افزایش قندهای محلول در مریم‌گلی نیز قبلاً گزارش شده است (Teiymouri et al., 2021).

از طرف دیگر، سالیسیلیک اسید با تأثیر بر اکثر واکنش‌های متابولیسمی گیاهان، موجب یک‌سری تغییرات به‌صورت سازش در آنها می‌شود که سازگاری و تحمل گیاه را در برابر تنش‌های محیطی افزایش می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر، سالیسیلیک اسید می‌تواند مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاهان را در شرایط تنش افزایش دهد که این موضوع ممکن است باعث افزایش میزان قندهای محلول شود (Popova et al., 2009)؛ بنابراین، می‌توان گفت که در پژوهش حاضر، افزایش قندهای محلول در شرایط تنش کادمیوم، علی‌رغم وجود سالیسیلیک اسید، نشان‌دهنده نقش این اسید در افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش کادمیوم با کاهش آسیب‌های اکسایشی است.

ارتفاع گیاه

بیش‌ترین رشد طولی بوته (۴۴/۶ سانتی‌متر) در تیمار ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و بدون کادمیوم و کم‌ترین

مقدار آن (۲۳/۷ سانتی‌متر) در شرایط تنش شدید (۳۰ میلی-گرم بر کیلوگرم نیترات کادمیوم) و بدون کاربرد سالیسیلیک اسید به دست آمد (جدول ۳). به‌عبارت‌دیگر، غلظت بالای فلزات سنگین در محیط خاک می‌تواند ارتفاع گیاه را تحت‌تأثیر قرار داده و آن را کاهش دهد. به‌عنوان‌مثال، گزارش شده که حضور کادمیوم در بستر رشد گیاه سبب کاهش محتوای آب گیاه از طریق تأثیر بر کانال‌های آبی تونوپلاست شده که به دنبال آن، کاهش طویل شدگی یاخته‌ای و کاهش طول اندام هوایی اتفاق می‌افتد. کاهش ارتفاع بوته با کاربرد غلظت بالای کادمیوم در سیب‌زمینی نیز گزارش شده است (Arvin et al., 2014).

از طرف دیگر، مشابه نتایج این تحقیق، افزایش ارتفاع بوته سویا در نتیجه کاربرد اسپری برگی سالیسیلیک اسید در شرایط تنش کادمیوم گزارش شده است (Drazic and Mihailovic, 2005). سالیسیلیک اسید با افزایش مقدار جذب عناصر غذایی در شرایط تنش‌های محیطی، موجب افزایش پارامترهای رشدی گیاه و از جمله ارتفاع آن می‌گردد (Abbasi et al., 2020). بررسی آروین و همکاران (Arvin et al., 2014) نیز نشان داده که کاربرد سالیسیلیک اسید در گیاه تیمار شده با کادمیوم، باعث افزایش وزن خشک‌ریشه و اندام هوایی، ارتفاع گیاه و طول ریشه شده است.

کادمیوم از جمله فلزات سنگین است که در گیاهان تنش اکسیداتیو ایجاد می‌کند و در مقابل سالیسیلیک اسید باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌گردد. به عبارتی، سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک مولکول پیام‌رسان، اثرهای مضر حاصل از تنش کادمیوم را کاهش داده و سبب بهبود ویژگی‌های رشدی در گیاهان می‌شود (Vaculík et al., 2019).

وزن خشک شاخساره گیاه

طبق نتایج مقایسه میانگین، بیش‌ترین وزن خشک شاخساره بوته گوجه‌فرنگی (۷/۵۱ گرم) در تیمار ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و بدون کادمیوم و کم‌ترین آن (۱/۵۵ گرم) در شرایط تنش ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم و بدون کاربرد سالیسیلیک اسید به دست آمد (جدول ۳). کاهش رشد در شرایط تنش کادمیوم، ناشی از کاهش تقسیم سلولی و میزان طویل شدن سلول‌ها است که عمدتاً به دلیل مهار برگشت‌ناپذیر پمپ‌های پروتون مسئول فرایند رشد سلولی ایجاد می‌شود (Poortabrizi et al., 2018). مشابه این نتایج، کاهش وزن خشک گیاه سیب‌زمینی در اثر کاربرد کادمیوم گزارش‌شده است (Arvin et al., 2014). همچنین، نتایج نشان می‌دهد که اسپری برگی با سالیسیلیک اسید، سبب افزایش چشمگیر رشد گیاه هم در نمونه شاهد (بدون کادمیوم) و هم در شرایط تنش کادمیوم شده‌است. مشابه این نتایج، اثر مثبت سالیسیلیک اسید در کاهش آثار منفی کادمیوم بر رشد نخود نیز گزارش شده است (Popova et al., 2009). سالیسیلیک اسید می‌تواند با افزایش فتوسنتز، کاهش تعرق، افزایش محتوای نسبی آب برگ و تقویت سیستم دفاعی، موجب افزایش رشد عمومی گیاهان و وزن شاخساره گردد (Aghlmand et al., 2017).

قطر ساقه گیاه

بررسی اثرات متقابل سالیسیلیک اسید و کادمیوم بر قطر ساقه گیاه گوجه‌فرنگی نشان می‌دهد که با افزایش سطح کادمیوم در خاک، قطر ساقه کاهش پیدا کرده و در مقابل، با افزایش غلظت سالیسیلیک اسید، این پارامتر افزایش داشته است. بیش‌ترین قطر ساقه (۷/۱۱ میلی‌متر) در شرایط بدون تنش کادمیوم و کاربرد سالیسیلیک اسید به میزان ۵۰۰ میکرومولار و کم‌ترین آن (۲/۶۴ میلی‌متر) در شرایط تنش شدید کادمیوم (۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و بدون کاربرد سالیسیلیک اسید به دست آمد (جدول ۳). نتایج پژوهش سعادتیان و کافی (Saadatian and Kafi, 2017) نیز نشان داده که با افزایش غلظت کادمیوم در خاک، صفات طول ساقه، وزن خشک‌ریشه و اندام هوایی، سطح برگ و قطر ساقه گیاه ذرت به شکل معنی‌داری کاهش‌یافته است.

ممانعت فلزات سنگین بر افزایش ارتفاع گیاه، قطر ساقه، طول ریشه و سطح برگ گیاه می‌تواند عمدتاً به علت تقسیم غیرمعمول سلول‌ها باشد (Aldoobie and Beltagi, 2013). همچنین، فلزات سنگین مثل کادمیوم ممکن است از طریق بازدارندگی فعالیت برخی آنزیم‌ها، بر فرایندهای فتوسنتزی و تنفس بخش هوایی و سنتز پروتئین ممانعت به عمل‌آورند. به‌عبارت‌دیگر، اگرچه کاهش فتوسنتز اساساً در اثر کاهش کلروفیل و افزایش پراکسیداسیون لیپیدها رخ می‌دهد؛ اما برخی گزارش‌ها نیز نشان داده که قرارگیری گیاهان در معرض غلظت‌های بالای فلزات سنگین، موجب کاهش میزان فتوسنتز و رشد کلی گیاهان می‌شود (Kehstegar et al., 2014). از طرف دیگر، نتایج نشان‌دهنده اثر سالیسیلیک اسید بر پارامترهای رشدی گیاه گوجه‌فرنگی و از جمله قطر ساقه

است. تأثیر مثبت و معنی‌دار سالیسیلیک اسید در افزایش پارامترهای رشدی ذرت نیز گزارش شده است (Saadatian and Kafi, 2017).

سطح برگ گیاه

طبق نتایج مقایسه میانگین، بیش‌ترین سطح برگ (۲۶۸/۲ سانتی‌متر مربع) در تیمار ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و بدون کادمیوم و کم‌ترین آن (۱۴۲/۷ سانتی‌متر مربع) در تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم و شاهد سالیسیلیک اسید به دست آمد (جدول ۳). به عبارتی، سمیت کادمیوم در محیط خاک موجب کاهش عوامل رشدی گیاه و از جمله کاهش سطح برگ گیاه شده است. به‌طورکلی، کاهش سطح برگ در محیط‌های دارای فلزات سنگین، پاسخ عمومی گیاهان به تنش‌های محیطی است. ازآنجاکه به دنبال کاهش سطح برگ، کاهش تعرق اتفاق می‌افتد، بنابراین، جریان ترکیبات و مواد غذایی به سمت ساقه و اندام هوایی با کاهش مواجه شده و این امر ممکن است موجب کندی رشد بخش‌های هوایی گیاهان شود (Shamshirgaran et al., 2016). از طرفی، تنظیم‌کننده‌های رشد همچون سالیسیلیک اسید، با افزایش فعالیت متابولیک سلول‌ها موجب افزایش سطح برگ می‌شوند (Abbasi et al., 2020). افزایش سطح برگ گیاه سیب‌زمینی تحت تنش کادمیوم بر اثر تیمار سالیسیلیک اسید نیز گزارش شده که با نتایج حاصله از این تحقیق مطابقت دارد (Arvin et al., 2014).

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس اثرات کادمیوم و سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های ریشه گوجه‌فرنگی (میانگین مربعات)

Table 4. Analysis of variance for effects of Cd and salisilic acid on the root characteristics of tomato

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	سطح ریشه Root area	حجم ریشه Root volume	وزن خشک‌ریشه Root dry weight	طول ریشه Root length
کادمیوم Cd	2	360.7**	307.1*	5.13*	86.8**
سالیسیلیک اسید Salisilic acid (SA)	2	403.3**	1532**	9.24**	42.2**
کادمیوم ×سالیسیلیک اسید Cd × SA	4	10.5*	324.8*	8.32**	2.72**
خطا Eror	18	3.22	76.5	1.43	0.569
ضریب تغییرات CV(%)	-	5.02	27.8	35.4	6.1

ns، *و**: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار بودن در سطح پنج و یک درصد را نشان می‌دهد.

ns, **, * represent non-significant and significant at the probability levels of 1% 5%, respectively.

تاثیرکادمیوم و سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های ریشه گوجه‌فرنگی

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که اثر متقابل کادمیوم و سالیسیلیک اسید بر پارامتر وزن خشک و طول ریشه در سطح یک درصد و بر پارامترهای سطح و حجم ریشه در سطح پنج درصد معنی‌دار شده است (جدول ۴).

طول ریشه گیاه

بررسی اثر متقابل کادمیوم و سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های ریشه گوجه‌فرنگی نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم طول ریشه کاهش و با افزایش سالیسیلیک اسید کاربردی، این پارامتر افزایش پیدا کرد. به عبارتی، بیش‌ترین طول ریشه (۱۹/۶ سانتی‌متر) با کاربرد ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و بدون تنش کادمیوم و کم‌ترین آن (۷/۶ سانتی‌متر) در تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیترات کادمیوم و بدون مصرف سالیسیلیک اسید به دست آمد (جدول ۵). به دلیل اینکه ریشه گیاه اولین نقطه تماس با مواد سمی محیط خاک و از جمله فلزات سنگین است، لذا کاهش طول ریشه بوته‌های گوجه‌فرنگی در تیمار کادمیوم قابل‌پیش‌بینی بود. در حقیقت کادمیوم از تقسیم سلولی منطقه مریستمی و رشد سلول‌ها جلوگیری کرده، هرچند تمایز زودرس و یا چوبی شدن دیواره سلول‌های منطقه رشد طولی نیز می‌تواند از دیگر دلایل کاهش رشد ریشه باشد (Fuleky and Barna, 2008). مشابه این نتایج، گزارش شده که با افزایش غلظت کادمیوم

در محیط خاک، طول ریشه و ارتفاع اندام هوایی گیاه کاهش یافته (Shamshirgaran et al., 2016) و در مقابل، کاربرد سالیسیلیک اسید سبب افزایش طول ریشه گیاه مریم‌گلی شده است (Teiymouri et al., 2021). به عبارتی، سالیسیلیک اسید به عنوان یک هورمون گیاهی می‌تواند رشد ریشه را تحریک کرده و نقش مهمی در کاهش اثرات منفی فلزات سنگین داشته باشد (Abbasi et al., 2020).

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر متقابل کادمیوم × سالیسیلیک اسید از نظر ویژگی‌های ریشه گوجه‌فرنگی

Table 5. Mean comparisons of interaction of Cd × salicylic acid on the root characteristics of tomato

سطوح سالیسیلیک اسید Salisilic Acid levels	سطوح کادمیوم Cd levels	وزن خشک‌ریشه Root dry weight	طول ریشه Root length	حجم ریشه Root volume	سطح ریشه Root area
µmol l^{-1}	mg kg^{-1}	g	cm	cm^3	cm^2
0	0	3.64^{ab}±0.53	12.3^{cd}±1.3	28.8^{ab}±1.8	38.3^{bc}±2.35
	15	2.74^{b}±0.13	8.5^{e}±0.4	27.2^{ab}±1.6	28.6^{e}±1.5
	30	2.34^{b}±0.34	7.6^{f}±0.5	22.3^{b}±0.7	21.4^{f}±1.4
250	0	4.37^{ab}±0.37	15.8^{b}±2.37	34.9^{ab}±2.5	41.1^{b}±1.1
	15	2.86^{b}±0.31	12.6^{cd}±2.21	31.6^{ab}±1.5	34.6^{d}±1.6
	30	2.51^{b}±0.19	9.4^{e}±0.79	28.4^{ab}±1.45	30.4^{e}±1.4
500	0	5.28^{a}±0.28	19.6^{a}±1.28	43.2^{a}±2.2	48.9^{a}±2.8
	15	3.51^{ab}±0.40	13.3^{c}±.47	34.3^{ab}±1.3	41.3^{b}±2.7
	30	3.12^{ab}±0.12	11.6^{d}±0.26	32.1^{ab}±1.1	36.9^{cd}±1.9

وزن خشک ریشه

بر طبق نتایج مقایسه میانگین، استفاده از تیمارهای ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم به ترتیب باعث کاهش ۲۴/۷ و ۳۵/۶ درصدی وزن خشک‌ریشه گوجه‌فرنگی شد (جدول ۵). کاهش رشد گیاهان تحت‌تأثیر غلظت کادمیوم خاک، معمولاً با کاهش رشد و بیومس (زیست‌توده) ریشه آشکار می‌شود، زیرا ریشه اولین قسمتی از گیاه است که در معرض تنش عوامل محیطی خاک قرار می‌گیرد (Arvin et al., 2014). به عبارتی، در فرایند و چرخه تقسیم سلولی در گیاهان، عناصر سنگین از انتقال مرحله‌ی اینترفاز به مرحله سنتز جلوگیری کرده و لذا تقسیم سلولی و رشد گیاه متوقف می‌گردد (Singh et al., 2015).

از طرف دیگر، با افزایش غلظت سالیسیلیک اسید، وزن خشک‌ریشه گوجه‌فرنگی افزایش یافت. به عبارتی، استفاده از تیمارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید به ترتیب باعث افزایش ۱۹/۹۷ و ۴۵/۰۷ درصدی وزن خشک‌ریشه گوجه‌فرنگی شد. دلیل این موضوع می‌تواند اثر سالیسیلیک اسید در حفظ تورژسانس سلولی و یا نقش حفاظتی آن در شرایط تنش باشد (Teiymouri et al., 2021). نتایج پژوهش دیگری نیز نشان داده که کاربرد سالیسیلیک اسید تأثیر معنی‌داری بر وزن تر و خشک‌ریشه گیاه ریحان داشته است (Feizi et al., 2021).

حجم ریشه

بر طبق نتایج، استفاده از تیمار ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم به ترتیب باعث کاهش ۵/۶ و ۲۲/۶ درصدی حجم ریشه شد (جدول ۵). نتایج پژوهش‌های مشابه نیز نشان می‌دهد که کاربرد کادمیوم در خاک موجب کاهش حجم ریشه نخود شده است (Popova et al., 2009). در مقابل، با افزایش غلظت سالیسیلیک اسید، حجم ریشه گیاه افزایش یافت، به‌طوری که تیمارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید به ترتیب باعث افزایش ۲۱/۴ و ۵۰/۲ درصدی حجم ریشه گوجه‌فرنگی شد؛ یعنی، هرچند کاهش حجم ریشه گیاه در پی افزایش غلظت کادمیوم مشاهده شد، اما با افزایش غلظت سالیسیلیک اسید، حجم ریشه گوجه‌فرنگی افزایش‌یافته و به عبارتی، سالیسیلیک اسید اثرات منفی کادمیوم بر حجم ریشه گیاه را اصلاح کرد.

سطح ریشه

بر طبق نتایج، بیش‌ترین سطح ریشه (۴۸/۹ سانتی‌متر مربع) در تیمار ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و بدون کادمیوم

و کم‌ترین آن (۲۱/۴ سانتی‌متر مربع) در تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم و بدون کاربرد سالیسیلیک اسید به دست آمد (جدول ۵). نتایج بررسی اثرات کادمیوم و سالیسیلیک اسید بر رشد و شاخص‌های فیزیولوژیک سویا نیز نشان داده که سالیسیلیک اسید می‌تواند آثار سمیت کادمیوم در ممانعت از رشد ریشه را تا حد زیادی کاهش دهد (Drazic and Mihailovic, 2005). بطورکلی، وجود عناصرسنگین در محیط ریشه سبب کاهش فعالیت آنزیم‌های ضروری و به دنبال آن کاهش فتوسنتز و رشد گیاهان می‌گردد (Sharma and Dubey, 2005). در مقابل، کاربرد هورمون گیاهی سالیسیلیک اسید می‌تواند رشد بخش‌های مختلف گیاه و از جمله ریشه را تحریک و افزایش دهد (Taheri Oshtrinani and Fathi, 2016).

نتیجه‌گیری نهایی

به‌طورکلی نتایج بیانگر اثرات منفی کادمیوم بر همه ویژگی-های رویشی موردمطالعه گوجه‌فرنگی است. همین‌طور، افزایش مقادیر پرولین و قندهای محلول بخش‌های هوایی گیاه به هنگام تنش کادمیوم، بیانگر نوعی واکنش سازگاری این گیاه در این شرایط است. در مقابل، سطوح مختلف سالیسیلیک اسید کاربردی توانست پارامترهای رشدی گیاه را افزایش و اثرات منفی کادمیوم را کاهش دهد. پس می‌توان گفت که کاربرد غلظت مناسب سالیسیلیک اسید، روشی کم‌هزینه و آسان در کاهش اثرات مخرب تنش کادمیوم بر ویژگی‌های رشدی گوجه‌فرنگی است.

منابع

Abbasi, F., Khaleghi, A., Khadivi, A., 2020. The Effect of salicylic acid on physiological and morphological traits of cucumber (*Cucumis sativus* L.). Gesunde Pflanzen. 72, 155–162. https://doi.org/10.1007/s10343-019-00496-0

Aghlmand, S., Esmailpour, B., Jalilvand, P., Heidari, H., 2017. Effect of salicylic acid and paclobutrazole on growth and physiological traits of basil under water stress conditions. Plant Process and Function. 9, 35-44 [In Persian with English summary].

Aldoobie, N.F., Beltagi, M.S., 2013. Physiological, biochemical and molecular responses of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants to heavy metals stress. African Journal of Biotechnology. 12, 4614-4622. https://doi.org/10.5897/AJB2013.12387

Arvin, M., J., Moslemi, KH., Sarchashmepur, M., Karamat, B., Olumi, H., Daneshmand, F., 2014. Interactive effects of salicylic acid and silicon on growth, development and cadmium accumulation in tuber of potato plants under cadmium stress. Journal of Crop Production and Processing. 4, 185-196 [In Persian with English summary].

Balouchi, H, Amini, F, Movahhedi Dehnavi, M, Attarzadeh, M., 2017. Effect of different growing substrates on physiological and biochemical traits of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under heavy metals stress. Plant Process and Function. 6, 27-40. [In Persian with English summary].

Bates, L.S., Waldren, R.P., Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. Plant and Soil. 29, 205-207. https://doi.org/10.1007/BF00018060

Drazic, G., Mihailovic, N., 2005. Modification of cadmium toxicity in soybean seedlings by salicylic acid. Plant Science. 168, 511-517. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.09.019

Dubois, D., Gilleres, K.A., Hamilton, J.K., 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Analytical Chemistry. 28, 350–356. https://doi.org/10.1021/AC60111A017

Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdoran, F., Xie, Y., 2015. Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response. The Scientific World Journal. https://doi.org/10.1155/2015/756120

FAO, 2021. Food and Agricultural Organization statistics book on national crop production. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. https://doi.org/10.4060/cb4478en

Feizi, K., Amirinejad, A., Ghobadi, M., 2021. The effects of biochar and salicylic acid on reducing Pb-induced stress in basil crop (*Ocimum basilicum* L.). Iranian Journal of Soil and Water Research. 52, 539-547. [In Persian with English summary].

https://doi.org/10.22059/IJSWR.2020.313282.668795

Ferronato, N., Torretta, V., 2019. Waste mismanagement in developing countries: a review of global issues. International Journal of Environmental Research Public Health. 16, 1060. https://doi.org/10.3390/ijerph16061060

Fuleky, G., Barna, S., 2008. Biotesting of heavy metal pollution in the soil. Journal of Earth and Environmental Sciences. 3, 93-102. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv

Guo, J., Zhou, R., Ren, X., Jia, H., Hua, L., Xu, H., Lv, X., Zhao, J., Wei, T., 2018. Effects of salicylic acid, Epi-brassinolide and calcium on stress alleviation and Cd accumulation in tomato plants. Ecotoxicology and Environmental Safety. 157, 491-496. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.04.010

Kehstegar, M., Afshar, S.A., Nematpour, S.F., 2014. Effect of heavy metals Cu and Pb on some growth characteristics, proline content and lipid peroxidation in two varieties of mung bean (*Vigna radiate*). Journal of Crop Ecophysiology. 8, 363-374 [In Persian with English summary].

Klute, A., 1986. Methods of Soil Analysis: Part 1 and 2, Physical and Chemical Methods, Second Edition, Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc.

Mahdavian, K., Ghaderian, S.M., Schat, H., 2016. Pb accumulation, tolerance, antioxidants, thiols, and organic acids in metallicolous and non-metallicolous Peganum harmala under Pb exposure. Environmental and Experimental Botany. 126, 21-31. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.01.010

Mishra, A., Choudhuri, M., 1999. Effects of salicylic acid on heavy metal-induced memberane degradation mediated by lipixygenase in rice. Biologia Plantarum. 42, 409-415. https://doi.org/10.1023/A:1002469303670

Poortabrizi, S., Pourseyedi, S., Abdoshahi, R., Nadernejad, N., 2018. Effect of cadmium stress on morphological and physiological traits of milk thistle (*Silybum marianum*). Plant Process and Function. 7, 185-198. [In Persian with English summary].

Popova, L.P., Maslenkova, L.T., Yordanova, R.Y., Ivanova, A.P., Krantev, A.P., Szalai, G., Janda, T., 2009. Exogenous treatment with salicylic acid attenuates cadmium toxicity in pea seedlings. Plant Physiology and Biochemistry. 47, 224-231. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.11.007

Rasheed, R., Ashraf, M.A., Hussain, I., Haider, M.Z., Kanwal, U., Iqbal, M., 2014. Exogenous proline and glycine betaine mitigate cadmium stress in two genetically different spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. Brazilian Journal of Botany. 37, 399-406. https://doi.org/10.1007/s40415-014-0089-7

Saadatian, N., Kafi, M., 2017. Comparison of effect of sodium silicate particle size in nutritional solution on physiological growth trials of maize seedlings under cadmium stress. Iranian Journal of Field Crops Research 15, 425-437. [In Persian]. https://doi.org/10.22067/GSC.V15I2.52432

Shamshirgaran, Z.S., Saied Nematpour, F., Safipour Afshar, A., 2016. Effect of mycorrhizal symbiosis on growth, some physiological parameters and cadmium accumulation in black seed (*Nigella sativa* L.). Plant Process and Function. 5, 133-144. [In Persian with English summary].

Sharma, P., Dubey, R.S., 2005. Lead toxicity in plants. journal of plant physiology. 17, 35-52. https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100004

Singh, S., Parihar, P., Singh, R., Singh, V.P., Prasad, S.M., 2015. Heavy metal tolerance in plants: role of transcriptomics, proteomics, metabolomics, and ionomics. Frontiers in Plant Science. 6, 1143. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01143

Taheri Oshtrinani, F., Fathi, A., 2016. The impacts of mycorrhiza and phosphorus along with the use of salicylic acid on maize seed yield. Journal of Crop Ecophysiology. 10, 657-668. [In Persian with English summary].

Teiymouri, A., Amirinejad, A., Ghobadi, M., 2021. The effects of biochar and salicylic acid on alleviation of Pb stress in salvia (*Salvia afficinalis* L.). Journal of Soil and Plant Interactions. 12, 95-108. [In Persian with English summary]. https://doi.org/10.47176/jspi.12.1.20161

Vaculík, M., Lux, A., Luxová, M., Tanimoto, E., Lichtscheidl, I., 2019. Silicon mitigates cadmium inhibitory effects in young maize plants. Environmental and Experimental Botany. 67, 52-58. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.012

Veselina, V., Dinev, N.S., 2020. Mineral content and quality parameters of tomato fruits as affected by different potassium fertilization treatments and cultivar specifics. Indian Journal of Agricultural Research. 55, 169-174. https://doi.org/10.18805/IJARe.A-563