J. Soil and Plant Interactions, Vol. 14, No. 3, Fall 2023, pp. 73-85. Research Article
https://jspi.iut.ac.ir EISSN: 2783-5286 https://doi.org/10.47176/jspi.14.3.20162

Effect of Salicylic Acid Foliar Application on Growth Characteristics in Tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) Under Lead Stress Conditions

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

(Received: 9 August 2023; Accepted: 19 September 2023)

Abstract

The use of plant hormones has been introduced as a simple and suitable strategy to reduce the adverse effect of heavy metals in plants. To investigate the effect of salicylic acid (SA) in reducing lead (Pb) stress in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.), a factorial experiment was conducted based on completely randomized design with three replications in the greenhouse of Razi University. Factors included soil Pb contamination at three levels (0, 150 and 300 mg kg^{-1} soil as $Pb(NO_3)_2$) and SA at three levels (0, 250 and 500 µM). Results showed that the highest proline content (23.4 mmol g^{-1}) and Pb concentration (4.26 mg kg^{-1}) were obtained in 300 mg kg^{-1} of Pb and 0 µM SA, which shows an increase of 303 and 387%, respectively, compared to the control (without Pb and SA). Also, the highest amount of soluble sugars (0.48 mg kg^{-1}), plant height (43.5 cm), root length (18.3 cm/plant), shoot dry weight (7.48 g/plant), and leaf area (263.1 cm^2/plant) were found in the treatment of 500 µM SA and 0 mg kg^{-1} Pb. In general, the results showed that the application of SA, as a plant hormone, is a simple and convenient method to reduce the adverse effects of Pb stress in tomato.

Keywords: Plant hormones, Heavy metals, Growth characteristics, Stress.

Background and Objective: Heavy metals are non-biodegradable and persistent in nature thereby disrupting the environment and causing huge health threats to humans (Ferronato and Torretta, 2019). Lead (Pb) is a toxic heavy metal that enters the environment through various anthropogenic sources, and inhibits plant growth and development. Lead toxicity may result from disturbance in plant metabolism as a consequence of disturbance in the uptake and translocation of mineral nutrients (Hussain et al., 2017). A new method for reducing the effect of heavy metals on plants is the use of growth regulators such as salicylic acid (SA) (Vaculík et al., 2019). Tomato (*Lycopersicon esculentum*) is an important vegetable that is rich in minerals, various vitamins and antioxidant compounds. Since the cultivation of tomato, as an important and highly productive crop, is very common in many parts of Iran, including on the side of the roads, there is a possibility of contamination of the arable soils with lead. Therefore, the present study was conducted to evaluate the effects of foliar spraying of salicylic acid on reducing Pb-induced stress in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.).

1- Department of Soil Science and Engineering, College of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.
2- Department of Plant Production and Genetics, College of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.
* Corresponding author, Email: a.amirinejad@razi.ac.ir

Methods: A factorial experiment based on a completely randomized design with three replications was conducted in the greenhouse of Razi University. Factors included Pb at three levels (0, 150 and 300 mg kg^{-1} as $Pb(NO_3)_2$) and SA at three levels (0, 250, and 500 μM). The solutions containing $Pb(NO_3)_2$ were sprayed uniformly on the soil sub-samples according to the desired concentrations. The samples were kept moist for 30 days close to the soil field capacity (FC). At the four-leaf stage, SA foliar spraying started and replicated three times until the beginning of flowering. After harvest, some characteristics including soluble sugars and proline content, plant height, shoot and root dry weights, and root volume and length were determined. Also, Pb concentration in leaf extract were measured by Varian AA220 atomic absorption spectrophotometer. The analysis of variance (ANOVA) and mean comparisons (Duncan's multiple range test, $p < 0.05$) were performed using SPSS-16 software.

Results: The results revealed that Pb stress reduced all plant characteristics, such as plant height, root volume and root length, as well as, dry weights of shoot and root, and elevated leaf Pb concentration, proline content and soluble sugars in tomato. However, the SA application resulted in improvement of growth traits. Also, the results showed that the interaction effect of Pb and SA on the most growth characteristics such as plant length, shoot and root dry weights, leaf area, and proline content, soluble sugars and Pb concentration was significant. The highest proline content (23.4 mmol g^{-1}) and Pb concentration (4.26 mg kg^{-1}) were obtained in 300 mg kg^{-1} of Pb and 0 μM SA. Also, the highest amount of soluble sugars (0.48 mg kg^{-1}), plant height (43.5 cm), root length (18.3 cm/plant), shoot dry weight (7.48 g/plant), and leaf area (263.1 cm^2/plant) were found in the treatment of 500 μM SA and 0 mg kg^{-1} Pb. It seems that under Pb-induced stress, applying SA, as a plant hormone, is an effective approach for improving crop growth by increasing plant resistance.

Conclusions: The results showed the significant negative effect of lead (Pb) on all the measured growth characteristics, including plant height, shoot dry weight, leaf area, root length, surface, volume and dry weight of tomato, as well as the amounts of proline and soluble sugars. The salicylic acid (SA) improved the resistance of tomato plants to Pb stress by increasing plant growth indices. In general, the application of appropriate concentration of SA (i.e., 500 μM) is an economic and easy strategy to reduce the effects of Pb (300 mg kg^{-1} soil) in tomato.

References:

1. Ferronato, N., Torretta, V., 2019. Waste mismanagement in developing countries: a review of global issues. Int. J. Environ. Res. Public Health. 16(6), 1060. https://doi.org/10.3390/ijerph16061060.
2. Hussain, I., Siddique, A., Ashraf, M., Rasheed, R., Ibrahim, M., Iqbal, M., Akbar, S., Imran, M. 2017. Does exogenous application of ascorbic acid modulate growth, photosynthetic pigments and oxidative defense in okra (*Abelmos chusesculentus* L.) under lead stress? Acta Physiol. Plant. 39, 144–151. https://doi.org/10.1007/s11738-017-2439-0
3. Vaculík, M., Lux, A., Luxová, M., Tanimoto, E., Lichtscheidl, I., 2019. Silicon mitigates cadmium inhibitory effects in young maize plants. Environ. Exp. Bot. 67(1), 52–58. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.012

روابط خاک و گیاه/ سال چهاردهم / شماره سوم / پاییز ۱۴۰۲ / صفحات ۸۵-۷۳ مقاله پژوهشی
https://doi.org/10.47176/jspi.14.3.20162 EISSN: 2783-5286 https://jspi.iut.ac.ir

اثر محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های رشدی گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* L.) در شرایط تنش سرب

حدیث کاکایی[۱]، علی اشرف امیری‌نژاد[۱*] و مختار قبادی[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۵/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۲۸)

چکیده

کاربرد هورمون‌های گیاهی، به‌عنوان یک راه‌حل ساده و مناسب برای کاهش اثر مضر فلزات سنگین در گیاهان معرفی شده است. برای بررسی اثر سالیسیلیک اسید بر کاهش تنش سرب در گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* L.)، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشگاه رازی انجام شد. تیمارها شامل سرب در سه سطح (۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از نمک نیترات سرب) و سالیسیلیک اسید در سه سطح (۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میکرومولار) بودند. نتایج نشان داد که بیش‌ترین مقدار پرولین (۲۳/۴ میلی‌مول بر گرم) و غلظت سرب شاخساره (۴/۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و بدون سالیسیلیک اسید به‌دست آمد که نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد سرب و سالیسیلیک اسید)، به‌ترتیب افزایش ۳۰۳ و ۳۸۷ درصد را نشان می‌دهد. همچنین، بیش‌ترین قندهای محلول (۰/۴۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، ارتفاع گیاه (۴۳/۵ سانتی‌متر)، طول ریشه (۱۸/۳ سانتی‌متر در بوته)، وزن خشک شاخساره (۷/۴۸ گرم در بوته) و سطح برگ (۲۶۳/۱ سانتی‌مترمربع در بوته) در تیمار ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و بدون سرب حاصل شد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد کاربرد سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک هورمون گیاهی، راه‌حلی ساده و مناسب برای کاهش آثار مضر تنش سرب در گوجه‌فرنگی است.

واژه‌های کلیدی: تنش، فلزات سنگین، ویژگی‌های رشدی، هورمون گیاهی.

مقدمه

فلزات سنگین به دلیل غیرقابل تجزیه بودن و آثار زیان‌بار فیزیولوژیک بر گیاهان، حتی در غلظت‌های کم، اهمیت زیادی از نظر زیست‌محیطی دارند (Ferronato and Torretta, 2019). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، آبیاری محصولات کشاورزی با فاضلاب‌های تصفیه‌نشده، استفاده از کودها و ترکیبات شیمیایی و نیز کاربرد کمپوست‌های آلی و فضولات حیوانی، از منابع اصلی آلودگی خاک با عناصر سنگین هستند

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۲- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.amirinejad@razi.ac.ir

(Khodaverdiloo et al., 2020). در این بین، سرب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فلزات سنگین آلاینده محیط زیست، به دلیل سمیّت زیاد برای گیاهان بیش‌تر مورد توجه است (Hussain et al., 2017). از آثار مهم تنش سرب بر گیاهان، کاهش سنتز کلروفیل و یا کاهش تقسیم سلولی و رشد عمومی گیاه به دلیل اختلال در فعالیت‌های آنزیمی و تولید گونه‌های اکسیژن فعال و خسارت اکسیداتیو است (Khan et al., 2016). با توجه به این مسئله، ارائه راهکارهایی برای کاهش پیامدهای منفی تنش سرب بر گیاهان امری اجتناب‌ناپذیر است.

تاکنون از روش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی برای اصلاح و پالایش خاک‌های آلوده و کاهش سمیّت فلزات سنگین در گیاهان استفاده شده است که اغلب این روش‌ها، علاوه بر داشتن هزینه زیاد، سبب کاهش کیفیت فیزیکی و شیمیایی و یا کاهش فعالیت‌های حیاتی خاک می‌شوند (Ward and Singh, 2004). در این راستا، کاربرد هورمون‌های گیاهی می‌تواند یک راه‌کار ساده و مناسب برای تعدیل آثار منفی تنش سرب در گیاهان باشد. به‌عبارت دیگر، یکی از مکانیسم‌های گیاهان برای کاهش آسیب‌های ناشی از سمیّت فلزات سنگین از جمله سرب، تولید سالیسیلیک اسید است (Vaculík et al., 2019).

سالیسیلیک اسید (اورتوهیدروکسی بنزوئیک اسید) یک ترکیب فنولی و از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی است که در گیاهان تحت تنش محیطی نقش حفاظتی و دفاعی داشته و مقاومت گیاه را در برابر تنش افزایش می‌دهد. به عبارتی، این ماده در گیاهان نقش آنتی‌اکسیدان‌ها را ایفا کرده و باعث حذف رادیکال‌های آزاد می‌شود (Popova et al., 2009). همچنین، سالیسیلیک اسید با اثر بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند کاتالاز و سوپر اکسیدازها و متابولیت‌هایی مانند اسید آسکوربیک و گلوتاتیون و یا با کلاته‌کردن فلزات به دلیل داشتن گروه هیدروکسیل آزاد بر روی حلقه بنزوئیک اسید، می‌تواند آثار ناشی از تنش فلزات سنگین را کاهش دهد (Mahdavian et al., 2016). اثر سالیسیلیک اسید بر کاهش سمیّت فلز سنگین در گیاهان، به غلظت کاربرد، نوع گونه گیاهی، دوره رشد و شرایط محیطی بستگی دارد (Abbasi et al., 2020).

در پژوهشی برای بررسی تأثیر سالیسیلیک اسید بر مقاومت گیاه ریحان نسبت به سمیّت سرب گزارش شد که اثر برهم‌کنش سالیسیلیک اسید و سرب بر وزن تازه و خشک شاخساره، وزن تازه ریشه، کلروفیل‌های a و b، کارتنوئید و کربوهیدرات معنی‌دار بود. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که کاربرد سالیسیلیک اسید می‌تواند از طریق افزایش شاخص‌های رشدی و غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی، در کاهش آثار منفی تنش سرب در ریحان مؤثر باشد (Padash et al., 2018).

Alamer and Fayez (2020) نیز با بررسی تأثیر سالیسیلیک اسید بر رشد و فعالیت‌های فیزیولوژیک گیاه جعفری تحت سمیّت سرب گزارش کردند که با افزایش سطح کاربرد سرب، ضمن کاهش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید، برگ‌های جعفری حالت کلروزه نشان دادند. ولی محلول‌پاشی گیاه با سالیسیلیک اسید، به کاهش کلروز و افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاهان تیمارشده با سرب کمک کرد. به‌عبارت دیگر، کاربرد سالیسیلیک اسید آثار سمیّت سرب بر گیاه جعفری را به‌طور معنی‌داری کاهش داد.

همین‌طور، در پژوهشی تأثیر کاربرد سالیسیلیک اسید بر صفات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکرد ذرت تحت تنش سرب بررسی شد. نتایج آنها نشان داد که سرب به ویژگی‌های رشدی و عملکرد گیاه آسیب رسانده و در مقابل، سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک فیتوهورمون، نقش مهمی در فرآیندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی داشته است. به‌عبارتی، سالیسیلیک اسید به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم، فرآیندهای فیزیولوژیک را بهبود بخشیده، و در نتیجه توانایی گیاه ذرت برای غلبه بر آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از سمیّت سرب را افزایش داده است (Sofy et al., 2020).

گوجه‌فرنگی با نام علمی *Licopersicon esculentum* از خانواده بادمجانیان (Solanaceae) و گیاه بومی آمریکای جنوبی است. این سبزی مهم در سطح بیش از پنج میلیون هکتار در دنیا

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

Table 1. Physical and chemical properties of the soil used

pH	رسانایی الکتریکی عصاره اشباع Electrical conductivity of saturated extract (dS m^{-1})	شن Sand %	سیلت Silt %	رس Clay %	کربن آلی Organic carbon %	آهک $CaCO_3$ %	گنجایش تبادل کاتیونی Cation exchange capacity ($cmol_c$ kg^{-1})	سرب Pb (mg kg^{-1})
7.8	0.28	10.5	64.5	25	0.83	31.2	14	0.18

کشت شده و تولید سالانه آن حدود ۱۶۱ میلیون تن است (FAO, 2021). گوجه‌فرنگی سرشار از مواد معدنی، انواع ویتامین‌ها و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و از مهم‌ترین محصولات زراعی در ارتباط با سلامت و تغذیه انسان به‌شمار می‌آید. این سبزی ۲۵ درصد از کل تولیدات سبزی جهان را به‌خود اختصاص می‌دهد (Veselina and Dinev, 2020).

با توجه به این‌که کشت گوجه‌فرنگی، به‌عنوان یک محصول زراعی مهم و پر بازده، در بسیاری از نقاط ایران و از جمله در حاشیه جاده‌ها بسیار رایج است، احتمال آلودگی خاک زمین‌های تحت کشت به سرب وجود دارد. هرچند پژوهش‌های متعددی در مورد اثر سالیسیلیک اسید بر کاهش تنش‌های محیطی مختلف مانند خشکی، شوری و یا برخی از فلزات سنگین بر رشد گوجه‌فرنگی وجود دارد، اما در مورد نقش این هورمون گیاهی بر کاهش تنش سرب در این سبزی، نتایج پژوهشی در دسترس وجود ندارد. بنابراین در این پژوهش، اثر محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید بر کاهش تنش سرب در گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* L.) بررسی شد.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، نمونه‌برداری از خاک رویین (عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری) مزرعه پژوهشی دانشگاه رازی با مشخصات جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۹ دقیقه و ۱۴ ثانیه شمالی و ۴۷ درجه و ۶ دقیقه و۱۴ ثانیه شرقی انجام گرفت. اندازه‌گیری‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل تعیین بافت خاک به‌روش هیدرومتر، رسانایی الکتریکی (EC) عصاره گل اشباع خاک به‌وسیله دستگاه رسانایی‌سنج، گنجایش تبادل کاتیونی (CEC) با روش سه مرحله‌ای، pH گل اشباع با دستگاه pH سنج، کربنات کلسیم معادل به‌روش تیتراسیون برگشتی و خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (Page et al., 1982) و کربن آلی (OC) به روش اصلاح‌شده واکلی و بلک (Walkley and Black, 1934) انجام شد. در جدول (۱) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی نشان داده شده است. خاک مورد بررسی دارای بافت لوم سیلت، آهکی، دارای کربن آلی کم و غیرآلوده به سرب (Madhavan et al., 1989) بود.

این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل، در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشگاه رازی انجام گرفت. تیمارها شامل تنش سرب در سه سطح (۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از نمک نیترات سرب) و سالیسیلیک اسید در سه سطح (۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میکرومولار) بودند. انتخاب سطوح تیمارها بر اساس نتایج پژوهش‌های پیشین در مورد گوجه‌فرنگی و سایر گیاهان مشابه انجام شد (Guo et al., 2018; Padash et al., 2018; Sofy et al., 2020; Teiymouri et al., 2021). برای آلوده‌کردن خاک، با توجه به سطوح غلظت سرب، مقدار نمک نیترات سرب لازم در واحد حجم آب مقطر حل کرده و به‌صورت یکنواخت به خاک هر گلدان (روی یک نایلون پلاستیکی) پاشیده شد. به‌منظور برهم‌کنش کامل سرب با خاک و نزدیک‌شدن به شرایط خاک آلوده طبیعی، نمونه‌های خاک به‌مدت ۳۰ روز ضمن بهم‌زدن، در شرایط نزدیک به رطوبت گنجایش مزرعه (FC) در گلخانه نگه‌داشته شد. سپس نمونه خاک آلوده‌شده به سرب به‌مقدار هفت کیلوگرم در گلدان‌هایی با ابعاد ۲۰ سانتی‌متر ارتفاع و ۲۳ سانتی‌متر قطر دهانه ریخته شد.

از بین نشاهای تهیه‌شده تعداد هشت نشا سالم به هر گلدان

منتقل گردید. عملیات آبیاری بر اساس نیاز آبی گیاه و کاهش رطوبت خاک، دو یا سه بار در هفته با روش وزنی انجام شد. در طول مدت آزمایش، میانگین دمای روزانه گلخانه ۲۳-۲۰ و شبانه ۱۵-۱۰ درجه سلسیوس بود. دو هفته پس از استقرار کامل نشاها، ۵ گیاهچه را باقی گذاشته و بقیه تنک شدند. سپس، تیمار سالیسیلیک اسید در ساعات غروب آفتاب به صورت محلول‌پاشی برگی انجام گرفت. این عملیات با فاصله هر ده روز یک بار تکرار شده و تا شروع گلدهی ادامه یافت. در تیمار شاهد نیز آب مقطر روی گیاهان اسپری شد.

در پایان دوره رشد رویشی و در ابتدای گل‌دهی، برخی شاخص‌های رشدی گیاه تعیین شده و به‌صورت میانگین هر بوته محاسبه شدند. ارتفاع گیاه از سطح خاک تا انتهای ساقه و نیز طول ریشه‌ها با خط‌کش اندازه‌گیری شد. ریشه‌ها و شاخساره در آون با دمای ۷۵ درجه سلسیوس برای مدت ۷۲ ساعت خشک شده و جرم خشک آنها با ترازو تعیین شد. اندازه‌گیری سطح برگ‌های کاملاً توسعه‌یافته هر بوته با استفاده از کاغذ شطرنجی، قطر ساقه‌های هر بوته با استفاده از کولیس، حجم ریشه تازه هر بوته با روش جابجایی آب در استوانه مدرج و سطح ریشه‌ها با استفاده از فرمول اتکینسون انجام گرفت (Alizadeh, 2014).

برای تعیین قندهای محلول، ۰/۵ گرم نمونه خشک گیاهی با ۱/۵ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سلسیوس نگهداری شده و سپس نمونه‌ها سانتریفیوژ شدند. ۱۰ میکرولیتر از نمونه فاز مایع را در یک فالکون ریخته و به آن ۲۵۰ میکرولیتر محلول ۰/۵درصد فنول و ۱۲۵۰ میکرولیتر اسیدسولفوریک ۹۸ درصد افزوده شد. در نهایت به وسیله اسپکتروفتومتر، میزان جذب نوری در طول‌موج ۴۸۵ نانومتر قرائت شده و به کمک منحنی واسنجی، مقدار قندهای محلول تعیین شد (Dubois et al., 1956).

برای تعیین پرولین، ۰/۵ گرم از پودر خشک‌شده شاخساره را با ۱۰ میلی‌لیتر سولفوسالیسیلیک سه درصد به مدت ۴۸ ساعت در دمای پایین نگهداری کرده و پس از صاف‌کردن، یک میلی‌لیتر از محلول با یک میلی‌لیتر نین‌هیدرین و یک میلی‌لیتر اسید استیک ترکیب شد. پس از یک ساعت نگهداری در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس بن‌ماری، دو میلی‌لیتر تولوئن به هر نمونه افزوده شده و سپس شدت جذب نوری در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد. در پایان با استفاده از منحنی واسنجی مربوطه، مقدار پرولین تعیین شد (Bates et al., 1973).

برای تعیین غلظت سرب، ۰/۵ گرم پودر خشک شاخساره را در کوره با دمای نهایی ۵۵۰ درجه سلسیوس خاکستر نموده و ۲/۵ میلی‌لیتر اسیدکلریدریک ۲ مولار به آن افزوده شد (Du Laing et al., 2003). پس از عصاره‌گیری، غلظت سرب با دستگاه اسپکتروفتومتری جذب اتمی مدل AA220 شرکت Varian (ساخت کشور استرالیا) تعیین شد.

تجزیه آماری داده‌ها با نرم‌افزار SPSS و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

آثار سرب و سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های شاخساره گیاه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر برهم‌کنش سالیسیلیک اسید و سرب بر وزن خشک شاخساره، سطح برگ، ارتفاع گیاه، غلظت سرب و مقادیر پرولین و قندهای محلول شاخساره در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲).

غلظت سرب شاخساره

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیش‌ترین غلظت سرب در شاخساره گوجه‌فرنگی (۴/۳۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و بدون کاربرد سالیسیلیک اسید و کم‌ترین آن (۰/۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) با کاربرد ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و بدون سرب به‌دست آمد (جدول ۳). به‌عبارت دیگر، با افزایش مقدار سرب خاک، غلظت سرب شاخساره به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. این مسئله، بیان‌گر رابطه مستقیم بین غلظت فلز در محیط و جذب آن توسط گیاه است.

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر سرب و سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های شاخساره گوجه‌فرنگی (میانگین مربعات)

Table 2. Analysis of variance for the effects of Pb and salisilic acid on the aerial characteristics of tomato (mean squares)

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	غلظت سرب Pb concentration	قندهای محلول Soluble sugars	پرولین Proline	سطح برگ Leaf area	وزن خشک برگ Leaf dry weight	ارتفاع گیاه Plant height
سرب Pb	2	0.886**	1.41*	0.03**	8225**	12.9**	211**
سالیسیلیک اسید Salisilic acid (SA)	2	0.025**	1.21*	0.17**	6562**	24.8**	238**
سرب × سالیسیلیک اسید Pb × SA	4	0.007**	1.58**	0.06**	450**	0.42**	6.37**
خطا Eror	18	0.001	0.33	0.004	91.7	0.08	1.11
ضریب تغییرات (٪) CV (%)	–	12.1	16.5	1.8	5.4	6.1	3.2

* و **: به‌ترتیب اثر معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد را نشان می‌دهد.

* and ** represent significant effect at the probability levels of 5 and 1%, respectively.

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش سرب × اسید سالیسیلیک بر ویژگی‌های شاخساره گوجه‌فرنگی

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

سطوح سالیسیلیک اسید Salisilic acid levels ($\mu mol\ l^{-1}$)	سطوح سرب Pb levels ($mg\ kg^{-1}$)	وزن خشک شاخساره Leaf dry weight (g/plant)	سطح برگ Leaf area (cm^2/plant)	ارتفاع گیاه Plant height (cm)	پرولین Proline ($\mu mol\ g^{1}$)	غلظت سرب اندام هوایی Pb ($mg\ kg^{-1}$)	قندهای محلول Soluble sugars ($mg\ kg^{-1}$)
0	0	5.35^{c}	181.5^{b}	31.4^{c}	7.7^{e}	1.1^{f}	0.1^{b}
	150	3.21^{e}	155.7^{c}	26.6^{d}	14.2^{c}	3.23^{c}	0.29^{ab}
	300	1.45^{f}	137.6^{d}	21.7^{e}	23.4^{a}	4.26^{a}	0.31^{ab}
250	0	6.59^{b}	191.2^{b}	38.7^{b}	3.21^{g}	0.93^{f}	0.33^{ab}
	150	4.47^{d}	168.2^{c}	31.9^{c}	11.3^{d}	2.72^{d}	0.30^{ab}
	300	3.31^{e}	160.1^{cd}	29.4^{d}	17.9^{b}	3.67^{b}	0.35^{ab}
500	0	7.48^{a}	263.1^{a}	43.5^{a}	4.3^{h}	0.14^{f}	0.31^{ab}
	150	5.26^{c}	182.1^{b}	38.5^{b}	8.28^{f}	2.16^{e}	0.37^{ab}
	300	4.53^{d}	160.5^{c}	33.1^{c}	11.4^{d}	3.21^{c}	0.48^{a}

در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

In each column, numbers with similar letters are not significantly different (Duncan's test, $p < 0.05$).

از طرف دیگر، با کاربرد سالیسیلیک اسید، غلظت سرب در شاخساره گیاه به طور معنی‌داری کاهش یافت. مکانیسم این تاثیر به‌خوبی روشن نیست، اما با توجه به اینکه سرب پس از ورود به گیاه، در ریشه‌ها انباشته می‌شود، ممکن است سالیسیلیک اسید سبب اختلال در انتقال سرب از ریشه به برگ‌های گیاه گردد.

به هرحال، یکی از آثار مهم تنش سرب در گیاهان، تخریب سلول‌ها با ایجاد تنش‌های اکسیداتیو است. به‌عبارت دیگر، سرب در تولید برخی از رادیکال‌های فعال اکسیژن مانند سوپراکسید و پراکسید هیدروژن نقش مؤثری دارد. در این راستا، گیاهان برای کاهش اثر این رادیکال‌های آزاد، اقدام به تولید برخی آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی (مانند کاتالاز و پراکسیدازها) و یا غیرآنزیمی (مانند گلوتاتیون و پرولین) می‌نمایند (Khan et al., 2016). در این شرایط، سالیسیلیک اسید نیز می‌تواند با مهار فعالیت کاتالاز، سطح پراکسید هیدروژن در سلول‌های گیاهی افزایش دهد (Abbasi et al., 2020). پراکسید هیدروژن در فرآیندهای انتقال نقش سیگنال را بازی کرده و ژن‌های وابسته به مقاومت را در گیاهان فعال می‌کند. به‌عبارت دیگر، سالیسیلیک اسید نقش یک مولکول پیام‌رسان طبیعی را در افزایش مقاومت دفاعی گیاه را ایفاء کرده که می‌تواند آثار سوء تنش سرب را در گیاهان کاهش دهد.

پرولین شاخساره

بررسی نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین مقدار پرولین در بخش هوایی گیاه (۲۳/۴ میکرومول بر گرم) با کاربرد ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب (بدون سالیسیلیک اسید) و کم‌ترین آن (۴/۳ میکرومول برگرم) با کاربرد ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید (بدون سرب) به‌دست آمد (جدول ۳). به‌عبارتی، با افزایش مقدار سرب خاک و جذب آن به‌وسیله گیاه، مقدار پرولین شاخساره به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. این مسئله، بیانگر اثر تنش سرب بر افزایش اسید آمینه پرولین در گیاه است. به‌عبارت دیگر، افزایش تولید و تجمع پرولین در سیتوپلاسم سلولی در شرایط تنش سرب نسبت به شرایط معمول، نشان‌دهنده نقش پرولین به‌عنوان یک ترکیب مهم سیستم دفاعی گیاهان است (Rasheed et al., 2014). به‌عبارتی، افزایش تولید پرولین نسبت به سایر آمینواسیدها در طی تنش‌های اکسیداتیو و از جمله تنش فلزات سنگین، یک مکانیسم دفاعی آنتی‌اکسیدانی است که منجر به افزایش تحمل گیاه در برابر تنش شده و از سلول‌های گیاهی محافظت می‌نماید (Mahdavian et al., 2016).

در مقابل، کاربرد سالیسیلیک اسید در شرایط تنش‌های محیطی، می‌تواند فتوسنتز گیاهی و رشد عمومی گیاه را بهبود بخشیده و به‌عبارتی، با تسریع رشد کلی، موجب توسعه واکنش‌های ضدتنشی و کاهش تولید پرولین در گیاهان شود (Aghlmand et al., 2017). همچنین، گزارش شده است که سالیسیلیک اسید می‌تواند با افزایش فعالیت آنزیم‌های مؤثر بر پروتئین‌سازی سلول، به حفظ غشاء سلولی و اندامک‌ها آن کمک نموده و با کاهش تنش اکسایشی، موجب کاهش تولید پرولین در گیاهان شود (Vaculík et al., 2019).

قندهای محلول

بر اساس جدول مقایسه میانگین‌ها، بیش‌ترین میزان قند محلول (۰/۴۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در گیاه، در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و کم‌ترین آن (۰/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار شاهد سرب و سالیسیلیک اسید به‌دست آمد (جدول ۳). در واقع، افزایش کربوهیدرات‌ها بیانگر نوعی مکانیسم تحمل گیاهان برای عبور از شرایط تنش محیطی است. به‌عبارتی، یکی از راه‌های سازگاری اغلب گیاهان در برابر تنش فلزات سنگین، افزایش غلظت قندهای محلول در بافت گیاهی است.

با تجمع سرب در منطقه ریشه، امکان جذب و ورود آن به درون بافت‌های گیاهی افزایش می‌یابد. این مسئله بر سرعت تنفس و متابولیسم کربوهیدرات‌ها تأثیر گذاشته و زمینه افزایش قندهای محلول را فراهم می‌سازد (Aldoobie and Beltagi, 2013). در واقع، متابولیسم قندها یک مکانیسم دفاعی برای تنظیم اسمزی است تا گیاه بتواند با افزایش ذخیره کربوهیدراتی، موجب تنظیم پتانسیل آبی سلول برای کاهش غلظت نسبی یون‌های سرب تجمع‌یافته در واکوئل گردد (Kocal et al., 2008).

از سوی دیگر، سالیسیلیک اسید می‌تواند با تأثیر بر مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاهان تحت تنش، موجب افزایش فتوسنتز و به

دنبال آن افزایش میزان قندهای محلول شود (Popova et al., 2009). به‌عبارت دیگر، سالیسیلیک اسید با تأثیر بر بیش‌تر واکنش‌های متابولیکی گیاهان، نقش مهمی در کاهش آثار ناشی از تنش‌های محیطی و از جمله تنش فلزات سنگین دارد. بنابراین، می‌توان گفت که افزایش قندهای محلول در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید، بیان‌گر نقش سالیسیلیک اسید در افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش سرب است.

ارتفاع گیاه

بر اساس نتایج بدست‌آمده، بیش‌ترین ارتفاع گیاه (۴۳/۵ سانتی‌متر) در شرایط کاربرد ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و بدون سرب و کم‌ترین آن (۲۱/۷ سانتی‌متر) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و بدون سالیسیلیک اسید به‌دست آمد (جدول ۳). به‌عقیده Teiymouri et al. (2021)، سرب از جمله فلزات سنگین است که در گیاهان تنش اکسیداتیو ایجاد می‌کند. وقتی گیاهان در معرض غلظت زیاد سرب قرار گیرند، علاوه بر کاهش وزن خشک شاخساره و ریشه، ارتفاع گیاه تحت تنش نیز کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که، با محلول‌پاشی گیاهان با سالیسیلیک اسید، آثار منفی سرب کاهش یافته و ارتفاع بوته‌های ریحان به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است (Teiymouri et al., 2021).

همچنین، گزارش شده است که علت کاهش ارتفاع گیاهان با تجمع فلزات سنگین در ریزوسفر، اثر این فلزات بر کاهش مقدار نسبی آب (RWC) گیاه بوده که با تأثیر بر کانال‌های آبی تونوپلاست، موجب کاهش طویل‌شدگی سلولی می‌شوند (Shamshirgaran et al., 2016). از طرف دیگر، سالیسیلیک اسید ممکن است با تأثیر بر جذب عناصر غذایی به‌وسیله ریشه در شرایط تنش سرب، زمینه افزایش شاخص‌های رشدی و از جمله ارتفاع گیاه را فراهم سازد (Abbasi et al., 2020).

وزن خشک شاخساره

بیش‌ترین وزن خشک شاخساره (۷/۴۸ گرم در بوته) با کاربرد ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و بدون سرب و کم‌ترین آن (۱/۴۵ گرم در بوته) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و بدون سالیسیلیک اسید به‌دست آمد (جدول ۳). کاهش رشد شاخساره گیاهان تحت تنش سرب می‌تواند به‌دلیل تجمع زیاد این فلز در گیاه، لیگنینی‌شدن دیواره سلولی و یا برهمکنش سرب با گروه‌های سولفیدریل غشاء سلولی و غیرفعال‌کردن آن‌ها باشد (Khan et al., 2016).

نتایج برخی پژوهش‌ها نشان داد که در گیاهان تیمارشده با سالیسیلیک اسید، در نتیجه افزایش میزان فتوسنتز کل، کاهش تعرق و افزایش RWC برگ، وزن خشک گیاهان افزایش یافته است (Aghlmand et al., 2017). هماهنگ با نتایج پژوهش حاضر، Teiymouri et al. (2021) نیز گزارش کرده‌اند که با افزایش غلظت سرب خاک، مقادیر وزن خشک شاخساره و ریشه گیاه مریم گلی کاهش معنی‌داری یافته و در مقابل با کاربرد سالیسیلیک اسید، وزن خشک شاخساره و ریشه افزایش یافت.

سطح برگ

بیش‌ترین سطح برگ (۲۶۳/۱ سانتی‌مترمربع در بوته) در شرایط بدون تنش سرب و کاربرد ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و کم‌ترین آن (۱۳۷/۶ سانتی‌مترمربع) در شرایط کاربرد ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و بدون سالیسیلیک اسید به‌دست آمد (جدول ۳). کاهش سطح برگ در شرایط تنش‌های محیطی و از جمله تنش فلزات سنگین، یک پاسخ و واکنش منفی گیاهان حساس است. به عقیده برخی دانشمندان، فلزات سنگین از عوامل محدودکننده رشد ریشه گیاهان در خاک بوده که در اثر کاهش رشد و گسترش سیستم ریشه‌ای و یا تغییر در ساختار غشاء سلول‌های ریشه، موجب کاهش جذب آب و عناصر غذایی می‌شود (Emamverdian et al., 2015). بنابراین این تغییرات بر فرآیندهای فیزیولوژیک مانند تعرق، تنفس و فتوسنتز اثر گذاشته و در نهایت موجب کاهش رشد قسمت‌های مختلف گیاه و از جمله کاهش سطح برگ می‌گردد.

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

Table 4. Analysis of variance for the effects of Pb and salisilic acid on the root characteristics of tomato (mean squares)

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	سطح ریشه Root area	حجم ریشه Root volume	وزن خشک ریشه Root dry weight	طول ریشه Root length
سرب Pb	2	362**	317*	5.21*	91.1**
سالیسیلیک اسید Salisilic acid (SA)	2	411**	1602**	8.94**	40.7**
سرب × سالیسیلیک اسید Pb × SA	4	13.8*	319.7*	7.94**	3.81**
خطا Eror	18	3.32	75.4	1.33	0.69
ضریب تغییرات (٪) CV (%)	–	5.2	26.5	33.4	6.1

* و **: به‌ترتیب اثر معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد را نشان می‌دهد.

* and ** represent significant effect at the probability levels of 5 and 1%, respectively.

از طرف دیگر، سالیسیلیک اسید به‌عنوان یکی از تنظیم‌کننده‌های رشدی، با افزایش آنزیم رابیسکو سبب افزایش سطح برگ و بهبود فتوسنتز می‌شود (Abbasi et al., 2020). همچنین گزارش شده است که سالیسیلیک اسید با کاهش سرعت نمو و یا به تأخیر انداختن زمان رسیدگی گیاه، سبب افزایش سطح برگ می‌شود (Shamshirgaran et al., 2016).

آثار برهم‌کنش سرب و سالیسیلیک اسید بر ویژگی‌های ریشه

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که اثر برهم‌کنش سالیسیلیک اسید و سرب بر طول و وزن خشک ریشه (در سطح یک درصد)، و سطح و حجم ریشه (در سطح ۵ درصد) معنی‌داری شد (جدول ۴).

طول ریشه

بیش‌ترین طول ریشه (۱۸/۳ سانتی‌متر در بوته) در تیمار ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و بدون سرب و کم‌ترین آن (۷ سانتی‌متر در بوته) در شرایط تنش ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و بدون کاربرد سالیسیلیک اسید به‌دست آمد (جدول ۵). فلزات سنگین به‌وسیله مهار تقسیم سلولی و یا کاهش تقسیم سلولی ، سبب کاهش طول ریشه می‌شوند (Singh et al., 2015). یافته‌های Teiymouri et al. (2021) بر روی گیاه مریم گلی نیز نشان داد که افزایش غلظت سرب در محیط ریشه، سبب کاهش معنی‌دار طول ریشه شد، اما کاربرد همزمان سالیسیلیک اسید با سرب، موجب افزایش طول ریشه نسبت به تیمار سرب گردید.

ریشه عامل تماس گیاه با محیط خاک است و بنابراین اثر سرب موجود در خاک بر کاهش طول ریشه بوته‌های گوجه‌فرنگی قابل انتظار است. در واقع سرب موجب کاهش تقسیم سلولی و رشد بافت‌های مختلف و از جمله طول ریشه می‌شود. همچنین، دلیل دیگر کاهش رشد و توسعه ریشه در خاک با حضور فلزات سنگین و از جمله سرب، چوبی‌شدن بافت دیواره سلول‌ها گزارش شده است (Hussain et al., 2017). از سوی دیگر، کاربرد سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک هورمون گیاهی سبب افزایش طول ریشه گوجه‌فرنگی شد. در حقیقت، این هورمون می‌تواند بر رشد ریشه تأثیر گذاشته و با تحریک آن، اثر منفی سرب را کاهش دهد (Abbasi et al., 2020).

وزن خشک ریشه

بررسی اثر سالیسیلیک اسید بر سطح ریشه بوته‌های

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش سرب × سالیسیلیک اسید از نظر ویژگی‌های ریشه گوجه‌فرنگی

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

سطوح سالیسیلیک اسید Salisilic acid levels ($\mu mol\ l^{-1}$)	سطوح سرب Pb levels ($mg\ kg^{-1}$)	وزن خشک ریشه Root dry weight (g/plant)	طول ریشه Root length (cm/plant)	حجم ریشه Root volume (cm^3/plant)	سطح ریشه Root area (cm^2/plant)
0	0	3.51^{a}	11.9^{cd}	29.1^{ab}	37.7^{bc}
	150	2.67^{b}	8.7^{e}	27.3^{ab}	27.9^{e}
	300	2.24^{b}	7.0^{f}	22.8^{b}	20.7^{f}
250	0	4.25^{ab}	16.1^{b}	35.1^{ab}	40.1^{b}
	150	2.91^{b}	12.1^{cd}	30.9^{ab}	35.1^{d}
	300	2.48^{b}	8.9^{e}	27.9^{ab}	31.0^{e}
500	0	5.07^{a}	18.3^{a}	44.1^{a}	48.7^{a}
	150	3.81^{ab}	13.1^{c}	35.1^{ab}	42.0^{b}
	300	3.32^{ab}	10.9^{d}	31.9^{ab}	37.3^{cd}

در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

In each column, numbers with similar letters are not significantly different (Duncan's test, $p < 0.05$).

گوجه‌فرنگی تحت تنش سرب نشان داد که استفاده از تیمارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید به‌ترتیب باعث افزایش ۲۱/۱ و ۴۴/۵ درصدی وزن خشک ریشه شد. استفاده از تیمارهای ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب نیز به‌ترتیب وزن خشک ریشه را به میزان ۲۳/۹ و ۳۶/۱ درصد کاهش داد (جدول ۵).

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد فلزات سنگین (مانند سرب) بر فرایند تقسیم سلولی اثر منفی داشته و به‌عبارتی از رشد عمومی گیاه و از جمله رشد و توسعه ریشه در خاک جلوگیری می‌کنند. بنابراین، قابل پیش‌بینی است که با تجمع سرب در محیط ریزوسفر، زیتوده ریشه به‌طور معنی‌داری کاهش یابد. اما کاربرد سالیسیلیک اسید توانست آثار منفی سرب بر توسعه و رشد ریشه گوجه‌فرنگی را کاهش داده و به‌عبارتی موجب افزایش وزن خشک ریشه شود. به عقیده برخی دانشمندان اثر فلزات سنگین بر کاهش رشد شاخساره و ریشه گیاهان ناشی از اختلال در تولید هورمون‌های گیاهی مانند اکسین است، اما سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک هورمون رشد گیاهی سبب افزایش طول، حجم و جرم ریشه گیاهان می‌گردد (Ferronato and Torretta, 2019).

حجم و سطح ریشه

بر اساس نتایج بدست‌آمده، اگرچه استفاده از تیمارهای ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب به‌ترتیب باعث کاهش ۶/۲ و ۲۱/۷ درصدی حجم ریشه گوجه‌فرنگی شد اما در مقابل، استفاده از تیمارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید به‌ترتیب باعث افزایش ۲۲/۳ و ۴۸/۹ درصدی حجم ریشه گردید. همچنین، بیش‌ترین سطح ریشه (۴۸/۷ سانتی‌مترمربع در بوته) در شرایط بدون تنش سرب و کاربرد ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و کم‌ترین آن (۲۰/۷ سانتی‌مترمربع در بوته) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و بدون سالیسیلیک اسید به‌دست آمد (جدول ۵).

سرب به‌عنوان یکی از فلزات سنگین مهم محدودکننده رشد ریشه گیاهان شناخته شده که موجب کاهش توسعه سیستم ریشه‌ای در خاک می‌شود. این کاهش رشد ممکن است نتیجه اختلال در عملکرد هورمون اکسین یا به دلیل جلوگیری از تشکیل ریشه‌های جانبی در گیاهان تیمارشده با سرب باشد. به‌عبارتی، تنش سرب ناشی از غلظت زیاد این عنصر در خاک سبب می‌شود ریشه‌ها کوتاه، ضعیف و کم حجم شوند (Singh et al., 2015).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش بیان‌گر اثر معنی‌دار سرب بر کاهش تمام شاخص‌های رشدی مورد اندازه‌گیری شامل ارتفاع گیاه، وزن خشک شاخساره، سطح برگ، طول، سطح، حجم و وزن خشک ریشه گوجه‌فرنگی و نیز مقادیر پرولین و قندهای محلول بود. به‌عبارت دیگر، تیمار سالیسیلیک اسید با افزایش شاخص‌های رشدی گیاه، سبب بهبود مقاومت بوته‌های گوجه فرنگی در برابر تنش سرب شد. به‌طور کلی می‌توان گفت که کاربرد غلظت مناسب سالیسیلیک اسید (۵۰۰ میکرومولار) یک روش اقتصادی و آسان در راستای کاهش آثار تنش سرب (تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب) بر ویژگی‌های رشدی شاخساره و ریشه گوجه‌فرنگی است.

تشکر و سپاسگزاری

در انجام این پژوهش، حمایت مالی خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نشده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورد استفاده

1. 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
2. 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 Proce. Func. 9, 35–44 (In Persian with English abstract). http://jispp.iut.ac.ir/article-1-502-en.html
3. Alamer, K.H., Fayez, K.A., 2020. Impact of salicylic acid on the growth and physiological activities of parsley plants under lead toxicity. Physiol. Mol. Biol. Plants 26(7), 1361–1373. https://doi.org/:10.1007/s12298-020-00830-1
4. Aldoobie, N.F., Beltagi, M.S., 2013. Physiological, biochemical and molecular responses of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants to heavy metals stress. Afr. J. Biotechnol. 12(29), 4614–4622. https://doi.org/:10.5897/AJB2013.12387
5. Alizadeh, A., 2014. Water, Soil and Plant Relation. 14th edition, Astane Godse Razavi Press, 484p.
6. Bates, L.S., Waldren, R.P., Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. Plant Soil 29, 205–207. http://dx.doi.org/10.1007/BF00018060
7. Dubois, D., Gilleres, K.A., Hamilton, J.K., 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Anal. Chem. 28, 350–356. http://dx.doi.org/10.1021/ac60111a017
8. Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdoran, F., Xie, Y., 2015. Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response. Sci. World J. 2015, 1–18. 756120. https://doi.org/:10.1155/2015/756120.
9. FAO, 2021. Food and Agricultural Organization Statistics Book on National Crop Production. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
10. Ferronato, N., Torretta, V., 2019. Waste mismanagement in developing countries: a review of global issues. Int. J. Environ. Res. Public Health 16(6), 1060. https://doi.org/10.3390/ijerph16061060.
11. 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. Ecotoxicol. Environ. Saf. 157, 491–496. https://doi.org/:10.1016/j.ecoenv.2018.04.010
12. Hussain, I., Siddique, A., Ashraf, M., Rasheed, R., Ibrahim, M., Iqbal, M., Akbar, S., Imran, M., 2017. Does exogenous application of ascorbic acid modulate growth, photosynthetic pigments and oxidative defense in okra (*Abelmos chusesculentus* L.) under lead stress? Acta Physiol. Plant. 39, 1–13. https://doi.org/:10.1007/s11738-017-2439-0
13. Khan, I., Iqbal, M., Ashraf, M.Y., Ashraf, M.A., Ali, S., 2016. Organic chelats-mediated enhanced lead (Pb) uptake and accumulation is associated with higher activity of enzymatic antioxidants in spinach (*Spinace aoleracea* L.). J. Hazard. Mater. 317, 352–361. https://doi.org/:10.1016/j.jhazmat.2016.06.007
14. Khodaverdiloo, H., Han, F.X., Hamzenejad, R., Karimi, A., Moradi, N., Kazery, J.A., 2020. Potentially toxic element contamination of arid and semi-arid soils and its phytoremediation. Arid Land Res. Manag. 34, 361–391. https://doi.org/:10.1080/15324982.2020.1746707
15. Kocal, N., Sonnewald, U., Sonnewald, S., 2008. Cell wall-bound invertase limits sucrose export and is involved in symptom development and inhibition of photosynthesis during compatible interaction in tomato. Plant Physiol. 148,

1523–36. https://doi.org/:10. 1104/pp.108.127977
16. Du Laing, G., Tack, F.M.G., Verloo, M.G., 2003. Performance of selected destruction methods for the determination of heavy metals in reed plants *Phragmites australis*. J. Analyt. Chim. Acta. 49, 191–198. https://doi.org/10.1016/j.aca.2003.08.044.
17. 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. Environ. Exp. Bot. 126, 21–31. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.01.010
18. Madhavan, S., Rosenman, K.D., Shehata, T., 1989. Lead in soil: recommended maximum permissible levels. Environ. Res. 49(1), 136–142. https://doi.org/10.1016/S0013-9351(89)80028-3
19. Padash A., Ghanbari A. Sirousmehr A., and Asgharipour M.R. 2018. Effect of salicylic acid on concentration of nutrients, protein and antioxidant enzymes of basil under lead stress. Iran. J. Plant Res. 31(1), 35–44. (In Persian with English abstract). 20.1001.1.23832592.1397.31.1.4.0
20. Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), 1982. Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties, Second Edition, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Inc, Madison, WI, USA. https://doi.org/:10.2134/agronmonogr9.2.2ed
21. 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 Physiol. Biochem. 47(3), 224–231. https://doi.org/10. 1016/j.plaphy.2008.11.007
22. 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. Braz. J. Bot. 37, 399–406. https://doi.org/:10.1007/s40415-014-0089-7
23. 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.). J. Plant Proc. Func. 5 (17), 133–144. http://jispp.iut.ac.ir/article-1-436-fa.html (In Persian with English abstract).
24. 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. Front. Plant Sci. 6, 1143. https://doi.org/:10.3389/fpls.2015.01143
25. Sofy, M.R., Seleiman, M.F., Alhammad, B.A., Alharbi, B.M., Mohamed, H.I., 2020. Minimizing adverse effects of Pb on maize plants by combined treatment with jasmonic, salicylic acids and proline. Agronomy 10(5), 699. https://doi.org/10.3390/agronomy10050699
26. Teiymouri, A., Amirinejad, A., Ghobadi, M., 2021. The effects of biochar and salicylic acid on alleviation of Pb stress in salvia (*Salvia affiicinalis* L.). J. Soil Plant Interac. 12(1), 95–108 (In Persian with English abstract). https://doi.org/:10.47176/jspi.12.1.20161
27. Vaculík, M., Lux, A., Luxová, M., Tanimoto, E., Lichtscheidl, I., 2019. Silicon mitigates cadmium inhibitory effects in young maize plants. Environ. Exp. Bot. 67(1), 52–58. https://doi.org/:10.1016/j.envexpbot.2009.06.012
28. 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 J. Agric. Res. 55(2), 169–174. https://doi.org/:10.18805/IJARe.A-563.
29. Walkley, A., Black, I.A., 1934. Examination of the degtjareff method determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37(1), 29–38.
30. Ward, O.P., Singh, A., 2004. Soil bioremediation and phytoremediation - An overview. In: Singh, A., Ward, O.P. (Eds), Applied Bioremediation and Phytoremediation. Springer, Berlin, Germany, pp. 1–11.