

Mitigating effect of salicylic acid on corn plant under lead and zinc heavy metal stress

Hamzeh Mirzaie^{*1}, Farid Shekari², Reza Fotovat³, Mohammad Amir Delavar⁴

1. Corresponding Author, Ph.D. Student, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: hamzeh426@yahoo.com

2. Associate Prof., Dept. of Plant Genetics and Products, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: shekari@znu.ac.ir

3. Associate Prof., Dept. of Plant Genetics and Products, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: r_fotovat@znu.ac.ir

4. Associate Prof., Dept. of Soil Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: amir-delavar@znu.ac.ir

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 11.21.2022

Revised: 04.29.2023

Accepted: 05.01.2023

Keywords:

Antioxidant Enzymes,

Foliar Spraying,

Lead and Zinc,

Leaf Temperature,

Proline,

Protein,

Seed Pretreatment

ABSTRACT

Background and Objectives: Investigations have shown that heavy metal pollution in fields has caused tension and reduced yield. This issue has caused concern about the risk of consuming contaminated food for human health. Lead and zinc (in high concentration) are toxic metals for plants, which are easily absorbed by the plant's root system. As a result, they cause damage to plant growth and development and prevent enzyme activity. In areas contaminated with heavy metals stress, the absorption of such metals by the plant not only reduces the yield of the plant but also affects its quality and nutrition. The role of plant regulators in heavy metal stress conditions for adaptation and improvement of plant growth has been considered in recent years. Salicylic acid has dual effects depending on the concentration, time, and plant used, but in appropriate concentrations, it reduces the effects of stress in plants. The corn plant, which is economically important with the high production potential of fodder and the high nutritional quality of its seeds, with the absorption of such metals, in addition to disrupting the development and growth of the plant, its yield and nutritional quality decrease. To evaluate the effect of concentration and different methods of application of salicylic acid hormone on the growth, photosynthesis, and anatomical and physiological characteristics of corn plants under the stress of zinc and lead metals and also the possibility of reducing the risk of toxicity of these elements, an experiment was conducted in a greenhouse.

Materials and Methods: The effect of salicylic acid hormone application on corn plants under heavy metals stress was investigated. The experiment was carried out in pots in a perlite (hydroponic) cultivation bed with the stress of lead and zinc metals and then salicylic acid treatment with different concentrations and two methods of foliar spraying and prime seed in the form of random and factorial complete blocks design were applied. The concentration of metals included: two concentrations of lead (0 and 250 mM) from a lead nitrate source and zinc element (0 and 2500 mM) from a zinc sulfate source. Salicylic acid treatment was carried out by two methods of foliar spraying and seed prime in concentrations of zero (distilled water), 750, and 1500 micromolar salicylic acid, and a group of seeds without stress, and no treatment was carried out as a control. The measured traits include morphological traits (height, plant temperature, difference between ambient temperature and leaf and leaf yield ratio) and physiological traits (membrane stability index, chlorophyll fluorescence, proline, amount of soluble sugars, carotenoid, protein, and some enzymes)

as well as the absorption rate of lead and zinc metals in the root tissue and aerial part of the plant. The experiment was carried out under hydroponic cultivation conditions. The obtained results were statistically analyzed using SPSS statistical software. The comparison of average data was also done with SPSS software and Duncan's test. Excel 2003 software was used to draw the tables.

Results: Traits such as leaf temperature, the temperature difference between leaf and environment (up to 15%) and physiological traits such as proline (more than 100%), amount of soluble sugars, carotenoid, protein (30%), and some enzymes increased and some Other traits such as height, leafing ratio, membrane stability index, chlorophyll fluorescence decreased compared to the control. Comparing the method of applying salicylic acid showed that in stress-free conditions, seed priming had better results on the measured traits. However, the application of foliar spraying under lead and zinc stress by reducing the absorption of heavy elements by the root system improved plant functions and reduced the effects of stress.

Conclusion: Salicylic acid activates the defense system of plants by synthesizing several proteins and increasing proline osmolytes and soluble sugars and enzymatic and non-enzymatic antioxidants such as carotenoids. As a result of reducing the oxidative stress and protecting the chloroplast membrane and the photosynthetic apparatus, the photosynthetic production is improved, as a result, the height and the leafing ratio increased. Salicylic acid also prevented the absorption of heavy metals by the root system of the plant and its transfer to the aerial part of the plant, which reduced the signs of stress in the aerial part of the plant. By applying salicylic acid, some properties were improved by reducing the effects of stress. The application of foliar spraying improved the physiological and morphological traits during plant growth and performed better than the prime seed method. As a result, under the stress conditions of lead and zinc metals, the plant can tolerate the stress of these two metals by foliar spraying treatment.

Cite this article: Mirzaie, Hamzeh, Shekari, Farid, Fotovat, Reza, Delavar, Mohammad Amir. 2023. Mitigating effect of salicylic acid on corn plant under lead and zinc heavy metal stress. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 13 (2), 53-74.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/EJSMS.2023.20807.2082

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بررسی اثرات بهبوددهندگی کاربرد سالیسیلیک اسید بر گیاه ذرت تحت تنش فلزات سنگین سرب و روی

حمزه میرزائی^{۱*}، فرید شکاری^۲، رضا فتوت^۳، محمد امیر دلاور^۴

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: hamzeh426@yahoo.com
۲. دانشیار گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: shekari@znu.ac.ir
۳. دانشیار گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: r_fotovat@znu.ac.ir
۴. دانشیار گروه خاکشناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: amir-delavar@znu.ac.ir

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|--|--|
| نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی | سابقه و هدف: بررسی‌ها نشان داده‌اند که آلودگی فلزات سنگین در مزارع موجب ایجاد تنش و کاهش عملکرد شده است. این موضوع سبب نگرانی بابت خطر مصرف مواد غذایی آلوده برای سلامتی انسان گردیده است. سرب و روی (در غلظت بالا) فلزات سمی برای گیاهان هستند که به راحتی توسط سیستم ریشه گیاه جذب می‌شوند و در نتیجه موجب آسیب به رشد و توسعه گیاه و جلوگیری از فعالیت آنزیمی آن می‌شوند. در مناطق آلوده به تنش فلزات سنگین، جذب این گونه فلزات توسط گیاه، نه تنها باعث کاهش عملکرد گیاه می‌گردد، بلکه از نظر کیفی و تغذیه‌ای نیز اثر خود را برجای می‌گذارند. نقش تنظیم‌کننده‌های گیاهی در شرایط تنش فلزات سنگین جهت سازگاری و بهبود رشد گیاهان در سال‌های اخیر مورد توجه بوده است. سالیسیلیک اسید بسته به غلظت، زمان و گیاه مورد استفاده دارای آثار دوگانه‌ای است، اما در غلظت‌های مناسب باعث کاهش آثار تنش در گیاهان می‌گردد. گیاه ذرت که با پتانسیل تولید بالای علوفه و کیفیت غذایی بالای بذور دارای اهمیت اقتصادی است، با جذب این گونه فلزات، علاوه بر مختل شدن توسعه و رشد گیاه، عملکرد و کیفیت غذایی آن نیز کاهش می‌یابد. جهت ارزیابی تأثیر غلظت و روش‌های مختلف کاربرد هورمون سالیسیلیک اسید بر رشد، فتوسنتز و ویژگی‌های آناتومیکی و فیزیولوژیکی گیاه ذرت تحت تنش فلزات روی و سرب و همچنین امکان کاهش خطر سمیت این عناصر پژوهش حاضر انجام شد. |
| تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۳۰ | |
| تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹ | |
| تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱ | |
| واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، پروتئین، پرولین، پیش‌تیمار بذر، دمای برگ، سرب و روی، محلول‌پاشی | |
| مواد و روش‌ها: آزمایش به صورت گلدانی در بستر کشت پرلیت (هیدروپونیک) با اعمال تنش فلزات سرب و روی اجرا شد و سپس تیمار سالیسیلیک اسید با غلظت‌های مختلف و دو روش محلول‌پاشی برگ و پرایم بذر در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و فاکتوریل اعمال شدند. | |

غلظت فلزات شامل دو غلظت سرب (صفر و ۲۵۰ میلی مولار) از منبع نیترات سرب و عنصر روی (صفر و ۲۵۰۰ میلی مولار) از منبع سولفات روی بود. تیمار سالیسیلیک اسید به دو روش محلول پاشی برگ و پرایم بذر در غلظت‌های صفر (آب مقطر)، ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و یک گروه بذری بدون تنش و بدون اعمال تیمار به عنوان شاهد اجرا گردید. صفت‌های اندازه‌گیری شده شامل صفات مورفولوژیک (ارتفاع، دمای بوته، اختلاف دمای محیط و برگ و نسبت برگ‌دهی) و صفات فیزیولوژی (شاخص پایداری غشاء، فلورسانس کلروفیلی، پرولین، میزان قندهای محلول، کارتنوئید، پروتئین و بعضی از آنزیم‌ها) و هم‌چنین میزان جذب فلزات سرب و روی در بافت ریشه و بخش هوایی بوته بود. نتایج به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. مقایسه میانگین داده‌ها نیز با نرم‌افزار SPSS و آزمون دانکن انجام شد. برای رسم جداول از نرم‌افزار Excel 2003 استفاده گردید.

یافته‌ها: صفات دمای برگ، اختلاف دمای محیط و برگ (تا ۱۵ درصد) و صفات فیزیولوژیک پرولین (بیش از ۱۰۰ درصد)، میزان قندهای محلول، کارتنوئید، پروتئین (۳۰ درصد) و بعضی از آنزیم‌ها افزایش یافتند و صفات ارتفاع و نسبت برگ‌دهی، شاخص پایداری غشاء، فلورسانس کلروفیلی نسبت به شاهد کاهش یافتند. مقایسه روش کاربرد سالیسیلیک اسید نشان داد در شرایط بدون تنش، پرایمینگ بذر نتایج بهتری بر صفات اندازه‌گیری شده، داشته است؛ اما کاربرد محلول پاشی برگ تحت تنش سرب و روی از طریق کاهش جذب عناصر سنگین توسط سیستم ریشه باعث بهبود کارکردهای گیاهی و کاهش اثرات تنش شدند.

نتیجه‌گیری: سالیسیلیک اسید سیستم دفاعی گیاهان را به وسیله سنتز تعدادی پروتئین و افزایش اسمولیت‌های پرولین و قندهای محلول و آنتی‌اکسیدانت‌های آنزیمی و غیر آنزیمی مانند کارتنوئید فعال می‌کند. در نتیجه کاهش تنش اکسیداتیو و محافظت از غشای کلروپلاستی و دستگاه فتوسنتزی، تولیدات فتوسنتزی بهبود یافته و در نتیجه ارتفاع و نسبت برگ‌دهی افزایش یافته است. سالیسیلیک اسید مانع جذب فلزات سنگین توسط سیستم ریشه گیاه و انتقال آن به بخش هوایی بوته شده و موجب کاهش علائم تنش در بخش هوایی بوته شد. اعمال تیمار سالیسیلیک اسید با کاهش اثرات تنش باعث بهبود بعضی ویژگی‌های مورد بررسی به وسیله شد. کاربرد روش محلول پاشی برگ باعث بهبود صفات فیزیولوژیک و مورفولوژیک در دوران رشد گیاه شد و بهتر از روش پرایم بذر عمل کرد. نتایج بیانگر آن است که تحت شرایط تنش فلزات سرب و روی می‌توان با تیمار محلول پاشی برگ، گیاه را نسبت به تنش این دو فلز متحمل کرد.

استناد: میرزائی، حمزه، شکاری، فرید، فتوت، رضا، دلاور، محمد امیر (۱۴۰۲). بررسی اثرات بهبوددهندگی کاربرد سالیسیلیک اسید بر گیاه ذرت تحت تنش فلزات سنگین سرب و روی. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۳ (۲)، ۷۴-۵۳.

DOI: 10.22069/EJSMS.2023.20807.2082



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

مشکل آلودگی اراضی کشاورزی به فلزات سنگین که پیامد آن آلودگی محصولات کشاورزی است، در نواحی نزدیک شهرها و مناطق صنعتی در حال افزایش است و، نگرانی در مورد مصرف غذای آلوده به فلزات سنگین برای سلامتی انسان ایجاد کرده است (۱ و ۲). تعدادی از فلزات سنگین مانند آهن، مس و روی، جزء عناصر ضروری هستند و تعداد دیگر مانند سرب، کادمیوم و جیوه سمی برای گیاهان می‌باشند (۳ و ۴). افزایش مقدار فلزات سنگین در خاک منجر به جذب بیش‌تر این عناصر به‌وسیله گیاهان می‌شود و می‌تواند رشد، فتوسنتز، زیست‌توده، عملکرد و کیفیت محصول در گیاهان را کاهش دهند (۵ و ۶). افزایش مقدار فلزات سنگین در بافت‌های گیاه متابولیسم سلول را متأثر می‌کند (۷). گزارش شده که؛ فلزات سنگین اندازه و شکل کلروپلاست، فتوسنتز و نسبت تعرق و آناتومی بافت را تغییر می‌دهند و باعث القاء پراکسیداسیون لیپیدها، آسیب به عملکرد روزنه‌ها می‌شوند و تعادل آب گیاه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند (۸ و ۹). فلزات سنگین موجب اثرات منفی بر جذب آب، تعرق، ساخت پروتئین، پایداری غشاء و تعادل هورمونی در گیاهان می‌شوند (۱۰). بررسی‌ها بر روی گیاهان مختلف تحت تنش‌های مرکب فلزات سنگین، نشان داد که تنش فلزات سنگین موجب کاهش محتوای کلروفیل و کارتنوئید، شکستگی کروموزومی و تغییرات ژنتیکی و نقصان سیستم فتوسنتزی، تنفسی و رشد گیاه می‌گردد (۱۱ و ۱۲).

نخستین واکنش فیزیولوژیکی گیاهان به شرایط نامساعد محیطی غیرفعال شدن یا کاهش شدید فعالیت فتوسنتزی گیاه است که توسط برخی پژوهش‌گران گزارش شده است (۱۳ و ۱۴). صارمی‌راد و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهش خود گزارش کردند که با افزایش سطح فلزات سنگین،

میزان فلورسانس کلروفیل در گیاه گندم تحت تنش فلزات سنگین، دارای روند کاهشی بود (۱۵). الجمال و حامد (۲۰۰۳) بیان نمودند که افزایش غلظت کادمیوم باعث کاهش جذب آب، کاهش ساخت رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، کربوهیدرات‌ها و قندهای محلول می‌شود و به طبع آن باعث کاهش ارتفاع گیاه گوجه‌فرنگی، تعداد برگ‌ها و وزن خشک بوته گردید (۱۶). از طرفی تحت شرایط تنش فلزات سنگین با کاهش جذب آب توسط گیاه و بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تعرق، دمای برگ نیز افزایش می‌یابد (۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰). گزارش شده در کاربرد فلز کادمیوم بعد از ۲۴ ساعت دمای برگ افزایش یافت؛ و مقدار رطوبت برگ نیز کاهش پیدا کرد (۲۱).

همانند دیگر فلزات سنگین، عنصر سرب یک فلز سمی برای گیاهان است که به‌آسانی به‌وسیله سیستم ریشه گیاه جذب می‌شود و از فعالیت تعدادی آنزیم به دلیل شباهت ساختاری یونی با کلسیم جلوگیری می‌کند (۱۰). عباسپور و همکاران (۲۰۰۵) با بررسی آلودگی سرب در برخی خاک‌های کشاورزی ایران گزارش دادند که مقدار سرب در این خاک‌ها، بین ۸۹ تا ۲۶۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک می‌باشند (۲۲). سرب در غلظت‌های بالاتر از ۳۰ میکروگرم بر گرم در برگ منجر به کاهش سنتز کلروفیل و کاهش رشد رویشی می‌شود (۲۳).

عنصر روی در غلظت‌های پایین به‌عنوان یک عنصر ضروری و محرک رشد گیاه است. درحالی‌که در غلظت‌های بالای عنصر روی در خاک (بالای ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) موجب القاء تنش در گیاه می‌گردد و بسته به گونه گیاه موجب تخریب در رشد و توسعه گیاهان می‌شود (۲۴ و ۲۵). گزارش‌ها نشان داده است که تجمع بالای عنصر روی در سیتوسول سلول‌های گیاهان با اختلال در تقسیم و طویل شدن سلول، موجب کاهش در رشد و توسعه مناسب

پیگمانت‌های فتوستتزی و غلظت عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم کاهش یافت و آنتی‌اکسیدانت‌های آنزیمی و غیرآنزیمی، نشت الکترولیت‌ها و محتوای مالون دی‌آلدهید را افزایش داد. درحالی‌که کاربرد جاسمونیک اسید و سالیسیلیک اسید و ترکیب آن‌ها رشد و بیوستتزی پیگمانت‌ها را افزایش و نشت الکترولیت‌ها، محتوای مالون دی‌آلدهیدها و غلظت سرب را کاهش داد (۳۸ و ۳۹).

ذرت (*Zea mays* L.) از مهم‌ترین غلات در جهان به دلیل پتانسیل تولید بالا، قابلیت تطابق با محیط‌های مختلف و ارزش غذایی بالای دانه‌ای است (۳۹). این گیاه حساسیت نسبی به تنش فلزات سنگین دارد و رشد و عملکرد گیاه تحت تنش فلزات سنگین کاهش می‌یابد (۳۷ و ۴۰). شبیه دیگر بخش‌های جهان، نواحی از ایران مانند زنجان به فلزات سنگین آلوده هستند و می‌توانند موجب کاهش رشد، تولید بیوماس و کیفیت تولید محصول به‌وسیله متأثر کردن ویژگی‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژی گیاهان شود. از طرف دیگر، ممکن است که در ویژگی‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژی با کاربرد خارجی هورمون‌های گیاهی در غلظت‌ها و روش‌های مناسب بر روی گیاهان در معرض تنش فلزات سنگین تغییر ایجاد شود که مقاومت به گیاهان در مقابل تنش‌ها را القاء کند. با در نظر گرفتن اهمیت ذرت به‌منظور تولید بذر و علوفه، در این پژوهش اثر غلظت و روش‌های مختلف کاربرد سالیسیلیک اسید بر رشد، فتوستتزی و ویژگی‌های آناتومیکی و فیزیولوژیکی گیاه ذرت تحت تنش بحرانی و خسارت‌های دو فلز روی و سرب و امکان کاهش خطر سمیت این فلزات بررسی گردید. جهت ارزیابی دقیق‌تر و مجزا اثر دو عنصر سرب و روی و تنش توأم این فلزات آزمایشی تحت شرایط کشت هیدروپونیک اجرا شد.

گیاهان می‌شود و همچنین موجب بازداری فرایند فتوستتزی و افزایش پروکسیداسیون لیپیدها می‌گردد (۲۶ و ۲۷).

تحت شرایط تنش‌های محیطی مانند تنش فلزات سنگین و جهت کاهش تنش و بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاهی مانند فتوستتزی، کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه مورد توجه می‌باشند (۲۸ و ۲۹). تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه، مانند اکسین، سیتوکینین، جاسمونیک اسید و سالیسیلیک اسید نقش مهمی در پیام‌رسانی، رشد، توسعه و سازگاری به شرایط محیطی مانند فلزات سنگین ایفا می‌کنند (۳۰ و ۳۱). سالیسیلیک اسید یا ارتویدروکسی بنزوئیک اسید یک فنل گیاهی است که به‌عنوان هورمون گیاهی در تعدادی فرایندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژی به‌عنوان مثال پیام‌رسانی، گلدهی، رشد و افزایش مقاومت در مقابل تنش‌های محیطی دخالت می‌کند (۲۶). تحت شرایط تنش‌های مختلف تیمار سالیسیلیک اسید همیشه موجب مقاومت در گیاهان نمی‌شود، اما ممکن است خسارت در گیاهان در معرض تنش را کاهش دهد (۳۲، ۳۳ و ۳۴). مراحل رشد گیاه، روش اعمال و غلظت سالیسیلیک اسید عوامل مؤثر در پاسخ‌های گیاه به تیمار سالیسیلیک اسید است (۳۵).

سالیسیلیک اسید اثر تنش را به‌وسیله متأثر کردن فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پروکسیداز و تنظیم‌کننده‌های اسمزی پرولین و گلاسیسین بتائین کاهش می‌دهد (۲۸ و ۳۱). نتایج پژوهشی در خصوص کاربرد تیمار سالیسیلیک اسید به‌صورت محلول‌پاشی برگی در غلظت‌های ۵۰، ۲۵۰ و ۱۰۰۰ میکرومولار موجب افزایش وزن تر و خشک گیاه ذرت و لوبیا گردید (۳۶). تیمار سالیسیلیک اسید اثر سمی عنصر سرب بر روی جوانه‌های برنج، ذرت و جو را کاهش داد (۳۷). پژوهش‌ها نشان داده است که در گیاه ذرت در معرض تنش سرب رشد، عملکرد،

مواد و روش‌ها

آزمایش دارای دو فاکتور تنش فلزات سنگین و کاربرد سالیسیلیک اسید بود. فاکتور تنش فلزات سنگین دربرگیرنده دو عنصر سرب و روی بود که به ترتیب دارای سطوح صفر و ۲۵۰ میلی‌مولار از منبع نیترات سرب و سطوح صفر و ۲۵۰۰ میلی‌مولار از منبع سولفات روی بودند. روش اعمال سطوح از طریق آب آبیاری بود. فاکتور کاربرد سالیسیلیک اسید با دو روش پیش‌تیمار بذور و محلول‌پاشی برگ‌ی اعمال گردید. روش کاربرد محلول‌پاشی دارای سطوح صفر (آب مقطر)، ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میکرومولار بود. محلول‌پاشی برگ‌ی (در مرحله سه برگ‌ی گیاه) در چهار مرتبه با فاصله زمانی دو روز، اعمال گردید. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و فاکتوریل به صورت گلخانه‌ای تحت شرایط دمایی کنترل‌شده (۲۲ تا ۲۸ درجه سلسیوس) با رطوبت ۵۰ تا ۶۰ درصد، ۸ ساعت تاریکی و ۱۶ ساعت روشنایی با روشنایی طبیعی (۱۰۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ لوکس) و نور مصنوعی (۹۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ لوکس) در گلخانه دانشگاه زنجان اجرا شد. گیاهان ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ (تهیه‌شده از بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر) در گلدان‌هایی با ارتفاع ۲۰ و قطر ۱۵ سانتی‌متر در بستر پرلیت (هیدروپونیک) کشت شدند. در هر گلدان هشت بذر در عمق سه تا چهار سانتی‌متری قرار داده شدند و پس از سبز کردن و استقرار چهار بوته در هر گلدان، همراه محلول هوگلند و با آب آبیاری تنش فلزات سرب و روی اعمال شدند. مقادیر نیترات و سولفات همراه با فلزات سنگین در محلول هوگلند محاسبه شدند. محلول هوگلند مورد استفاده از ترکیب عناصر غذایی پرمصرف به شرح نیترات کلسیم $(\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$ ۱ میلی‌مولار، پتاسیم دی‌هیدروژن

فسفات (KH_2PO_4) ۰/۱ میلی‌مولار، سولفات پتاسیم (K_2SO_4) ۰/۵ میلی‌مولار و سولفات منیزیم (MgSO_4) ۰/۵ میلی‌مولار و عناصر غذایی کم‌مصرف به صورت اسید بوریک اسید (H_3BO_3) ۱۰ میکرومولار، سولفات منگنز $(\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O})$ ۲۰ میکرومولار، سولفات روی $(\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O})$ ۰/۵ میکرومولار، سولفات مس $(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ ۱ میکرومولار، مولیبدات (MoO_3) ۰/۱ میکرومولار و سولفات آهن $(\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O})$ ۱۰۰ میکرومولار بود (۴۱). نمونه‌برداری از گیاهان بعد از ۳۰ روز از اعمال تیمارها (در مرحله هفت برگ‌ی قبل از ساقه رفتن) جهت اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی انجام گرفت. صفات‌های مورد ارزیابی شامل؛ ارتفاع بوته (Height)، از سطح خاک در گلدان‌ها تا انتهای شاخه اصلی با خط‌کش بر حسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. اختلاف دمای برگ و محیط (Canopy Temperature Depression, CTD) و دمای برگ با دماسنج لیزری و دمای محیط هم با دماسنج معمولی بر حسب سلسیوس به دست آمد، میزان دمای برگ (Leaf Temperature) با استفاده از دستگاه فتوستنتر متر ایرگا مدل (LCI.ADC) بر حسب سلسیوس اندازه‌گیری شدند. میزان فلورسانس کلروفیلی؛ کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم ۲ (fv/fm) با دستگاه فلورومتر (Opti - sciences, OS-30, U.S.A.) اندازه‌گیری شد (۴۲). سرعت برگ‌دهی (Leaf rate)، بر حسب ظهور تعداد برگ در واحد زمان (روز) بود. شاخص پایداری غشاء (Membrane Stability, EC) از طریق اندازه‌گیری هدایت الکتریکی مواد نشت کرده از نمونه‌های برگ‌ی به آب دو بار تقطیر، در دماهای ۴۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس تعیین گردید (۴۳). غلظت پرولین با استفاده از روش بیتس و با اندازه‌گیری

فلز در ریشه گیاه تعریف می‌شود و فاکتور تجمع زیستی (Bioaccumulation Factor) شامل غلظت فلز سنگین در ریشه یا در بخش هوایی گیاه تقسیم بر غلظت فلز اعمال شده محاسبه شد.

نتایج به دست آمده با استفاده از بسته نرم افزار آماری SPSS نسخه ۲۱ مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. مقایسه میانگین داده‌های آزمایشی با آزمون دانکن در سطوح معنی داری یک و پنج درصد انجام شد. برای رسم شکل‌ها و نمودارها از نرم افزار Excel نسخه ۲۰۱۰ استفاده گردید.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که مقدار صفات مورد بررسی در شرایط تنش سرب و روی و اثرات متقابل آن‌ها و هم‌چنین نحوه تیمار با سالیسیلیک اسید، نسبت به شاهد معنی دار شدند (جدول‌های ۱ و ۲). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد (جدول‌های ۳ و ۴) که مقدار صفات مورفولوژی و فیزیولوژی در شرایط تنش‌های اعمال شده نسبت به شاهد کاهش شدیدی نشان دادند، ولی با اعمال تیمار سالیسیلیک اسید صفات ذکر شده بهبود یافتند. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که عناصر سنگین جذب شده توسط ریشه و بخش هوایی بوته گیاه ذرت نسبت به شاهد خیلی بیش‌تر و معنی دار شدند؛ اما با اعمال تیمار، گیاهان تحت تنش میزان جذب عناصر سنگین در ریشه و هم در بخش هوایی گیاه کاهش چشمگیری نشان داده و معنی دار شدند (جدول‌های ۱ و ۲).

جذب در طول موج ۵۲۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل (JENWAY 6305) تعیین شد (۴۴). میزان قندهای محلول از طریق معرف آنترون (Anthrone) و با استفاده از روش اصلاح شده سایرام و همکاران (۲۰۰۲) با جذب نمونه‌ها در طول موج ۶۳۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (۴۵). اندازه‌گیری میزان کارتنوئید برگ (Leaf Carotenoid) با استفاده از نیم گرم نمونه برگی و ۱۰ میلی‌لیتر استون با جذب در طول موج ۴۷۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل (JENWAY 6305) انجام گرفت (۴۶). محتوای پروتئین کل با روش برادفورد (بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن تر) (۴۷)، سنجش کاتالاز با اندازه‌گیری سرعت شروع ناپدید شدن پراکسیداز هیدروژن با استفاده از روش ابی (بر حسب میکرومول پراکسیداز هیدروژن تجزیه شده در دقیقه در هر میلی‌گرم پروتئین) (۴۸) سنجش فعالیت گایاکول پراکسیداز با استفاده از روش چانس مهلی (بر حسب میکرومول تترآگایاکول مصرف شده در دقیقه در میلی‌گرم پروتئین) (۴۹) و فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز با روش ناکانو و آساد (بر حسب میکرومول NADH مصرف شده در دقیقه در میلی‌گرم پروتئین) (۵۰) ارزیابی شد. مقادیر جذب فلزات سنگین روی و سرب در بافت ریشه و بخش هوایی پس از اعمال تیمارهای آزمایشی با دستگاه جذب اتمی مدل Perkin-Elmer 2380 اندازه‌گیری و مقدار بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گزارش شد (۵۱). فاکتور انتقال (Translocation Factor) به صورت غلظت فلز در اندام هوایی گیاه تقسیم بر غلظت همان

جدول ۱- آنالیز واریانس اثر سالیسیلیک اسید بر روی گیاه ذرت تحت تنش عناصر سنگین.

Table 1. Analyze of variance the effects of SA on corn plant under heavy metals stress.

| میانگین مربعات Mean Squared | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--|-----------------------|--|-------------------------------------|-----------------------|
| پایداری غشاء EC | فلورسانس کلروفیلی FV/FM | دمای برگ Leaf Temperature | سرعت برگ‌دهی Leaf Production Rate | ارتفاع Height | اختلاف دمای برگ و محیط Canopy Temperature Depression | درجه آزادی Degrees of freedom | منبع تغییرات S.O.V |
| 17.231 ^{ns} | 0.00113 ^{ns} | 0.688 ^{ns} | 0.0001 ^{ns} | 11.85 ^{ns} | 0.027 ^{ns} | 2 | تکرار Rep |
| 23.068 ^{ns} | 0.0366 ^{**} | 6.4272 ^{**} | 0.0232 ^{**} | 82.55 ^{**} | 2.174 ^{**} | 1 | روی Zn |
| 1187.79 ^{**} | 0.0711 ^{**} | 12.579 ^{**} | 0.0242 ^{**} | 175.16 ^{**} | 2.178 ^{**} | 1 | سرب Pb |
| 882.15 ^{**} | 0.06412 ^{**} | 9.0706 ^{**} | 0.1149 ^{**} | 83.83 ^{**} | 1.854 ^{**} | 6 | سالیسیلیک اسید SA |
| 359.90 ^{**} | 0.003686 ^{ns} | 18.8104 ^{**} | 0.0202 ^{**} | 1.651 ^{ns} | 1.043 [*] | 1 | Zn × Pb |
| 149.35 ^{**} | 0.00663 ^{**} | 3.4909 ^{**} | 0.0143 ^{**} | 81.755 ^{**} | 1.585 ^{**} | 6 | Zn × SA |
| 305.835 ^{**} | 0.0208 ^{**} | 2.4772 [*] | 0.0364 ^{**} | 102.021 ^{**} | 1.111 ^{**} | 6 | Pb × SA |
| 111.411 ^{**} | 0.0111 ^{**} | 2.809 ^{**} | 0.0102 ^{**} | 46.899 ^{**} | 0.464 [*] | 6 | Zn × Pb × SA |
| 22.672 | 0.002 | 0.847 | 0.002 | 8.623 | 213 | 34 | خطا Error |

Zn= Zinc, Pb= Lead, SA= Salicylic Acid; *, ** and ns: Significance at 5% and 1% of probability levels and non-significant, respectively

ادامه جدول ۱-

Continue Table 1.

| میانگین مربعات Mean Squared | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------------|--|-----------------------|--------------------------------|--|------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| کارتنوئید Carotenoid | پروکسیداز Peroxidase | آسکوربات پروکسیداز Ascorbate Peroxidase | کاتالاز Catalase | پروتئین کل Total Protein | قندهای محلول Water Soluble Carbohydrates | پروترین Proline | درجه آزادی Degrees of freedom | منبع تغییرات S.O.V |
| 0.0033 ^{ns} | 0.5896 ^{ns} | 0.000931 ^{ns} | 0.00705 ^{ns} | 0.1077 ^{ns} | 0.00030 [*] | 0.00003 ^{ns} | 2 | تکرار Rep |
| 0.344 ^{ns} | 0.7145 ^{ns} | 0.01312 ^{**} | 0.02085 [*] | 0.64726 [*] | 6.6655 ^{ns} | 0.0008 ^{**} | 1 | روی Zn |
| 1.238 [*] | 10.04262 ^{**} | 0.00034 ^{ns} | 0.00027 ^{ns} | 3.933 ^{**} | 0.00006 ^{ns} | 0.00089 ^{**} | 1 | سرب Pb |
| 0.563 [*] | 2.16809 ^{**} | 0.0755 ^{**} | 0.0110 ^{**} | 0.292479 [*] | 0.002707 ^{**} | 0.00506 ^{**} | 6 | سالیسیلیک اسید SA |
| 0.598 ^{ns} | 10.8193 ^{**} | 0.0166 ^{**} | 0.0100 [*] | 0.28525 ^{ns} | 0.000299 [*] | 0.00052 ^{**} | 1 | Zn × Pb |
| 0.721 ^{**} | 4.4820 ^{**} | 0.01389 ^{**} | 0.0076 [*] | 0.20874 ^{ns} | 0.000597 ^{**} | 0.000510 ^{**} | 6 | Zn × SA |
| 0.175 ^{ns} | 4.6539 ^{**} | 0.02540 ^{**} | 0.0077 [*] | 0.35294 [*] | 0.002300 ^{**} | 0.00111 ^{**} | 6 | Pb × SA |
| 0.209 ^{ns} | 1.60351 [*] | 0.00862 ^{**} | 0.00614 [*] | 0.29107 [*] | 0.000204 [*] | 0.00026 ^{**} | 6 | Zn × Pb × SA |
| 0.212 | 0.553 | 0.000496 | 0.003 | 0.130 | 0.000082 | 0.000032 | 34 | خطا Error |

Zn= Zinc, Pb= Lead, SA= Salicylic Acid; *, ** and ns: Significance at 5% and 1% of probability levels and non-significant, respectively

جدول ۲- آنالیز واریانس اثر سالیسیلیک اسید بر روی گیاه ذرت تحت تنش عناصر سنگین.

Table 2. Analyze of variance the effects of SA on corn plant under heavy metals stress.

| میانگین مربعات Mean Squared | | | | | درجه آزادی Degrees of freedom | منبع تغییرات S.O.V |
|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|--|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| تجمع زیستی سرب بخش هوایی AFS Pb | تجمع زیستی سرب ریشه AFR Pb | فاکتور انتقال سرب TF Pb | غلظت سرب بخش هوایی گیاه Shoot Pb | غلظت سرب ریشه Root Pb | | |
| 0.00006222 ^{ns} | 0.305 ^{ns} | 0.429 ^{ns} | 3.888 ^{ns} | 0.708 ^{ns} | 2 | تکرار Rep |
| 0.007 ^{**} | 0.08235 ^{**} | 50.504 ^{**} | 436.531 ^{**} | 524.11 ^{**} | 1 | سرب Pb |
| 0.00002099 ^{**} | 0.70284 ^{**} | 3.189 ^{**} | 1.312 ^{**} | 15.577 ^{**} | 6 | سالیسیلیک اسید SA |
| 0.00006763 ^{**} | 1.803 ^{**} | 1.339 ^{**} | 4.227 ^{**} | 6.515 ^{**} | 1 | Zn × Pb |
| 0.00002099 ^{**} | 0.9247 ^{**} | 3.189 ^{**} | 1.312 ^{**} | 15.577 ^{**} | 6 | Pb × SA |
| 0.00004204 ^{**} | 0.407 ^{**} | 1.055 ^{**} | 2.628 ^{**} | 22.162 ^{**} | 6 | Zn × Pb × SA |
| 0.0000032 | 0.000001407 | 0.147 | 0.199 | 0.088 | 34 | خطا Error |

Zn= Zinc, Pb= Lead, SA= Salicylic Acid; *,** and ns: Significance at 5% and 1% of probability levels and non-significant, respectively

ادامه جدول ۲-

Continue Table 2.

| میانگین مربعات Mean Squared | | | | | درجه آزادی Degrees of freedom | منبع تغییرات S.O.V |
|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|--|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| تجمع زیستی روی بخش هوایی AFS Zn | تجمع زیستی روی ریشه AFR Zn | فاکتور انتقال روی TF Zn | غلظت روی بخش هوایی گیاه Shoot Zn | غلظت روی ریشه Root Zn | | |
| 0.0062784 ^{ns} | 0.00661 ^{ns} | 0.82972 ^{ns} | 301.464 ^{ns} | 123.788 ^{ns} | 2 | تکرار Rep |
| 0.002 ^{**} | 0.025 ^{**} | 0.0291 ^{**} | 37749.229 ^{**} | 168035.493 ^{**} | 1 | سرب Pb |
| 0.9308 ^{**} | 0.05 ^{**} | 0.135 ^{**} | 835.594 ^{**} | 9033.63 ^{**} | 6 | سالیسیلیک اسید SA |
| 0.00008974 ^{**} | 0.0003078 ^{**} | 1.18 ^{**} | 560.893 ^{**} | 0.99361 ^{**} | 1 | Zn × Pb |
| 0.004816 ^{**} | 0.0021 ^{**} | 0.063 ^{**} | 994.701 ^{**} | 6076.726 ^{**} | 6 | Pb × SA |
| 0.00003131 ^{**} | 0.3402 ^{**} | 0.023 ^{**} | 195.664 ^{**} | 905.937 ^{**} | 6 | Zn × Pb × SA |
| 0.009584 | 0.0001425 | 0.00242 | 5.435 | 4.9341 | 34 | خطا Error |

Zn= Zinc, Pb= Lead, SA= Salicylic Acid; *, ** and ns: Significance at 5% and 1% of probability levels and non-significant, respectively

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر سالیسیلیک اسید بر روی گیاه ذرت تحت تنش فلزات سنگین.

Table 3. Mean comparison of the effects of SA on corn plant under heavy metals stress.

| پایداری غشاء Membrane stability, EC (%) | فلورسانس کلروفیلی FV/FM | دمای برگ Leaf T (°C) | سرعت برگ‌دهی Leaf Production Rate (leaf day ⁻¹) | ارتفاع Height (cm) | اختلاف دمای برگ و محیط CTD (°C) | سالیسیلیک اسید SA (μm) | سرب Pb (ppm) | روی Zn (ppm) |
|--|-------------------------------|--------------------------|---|--------------------------|---------------------------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|
| 83.66 ^{abcdef} | 0.81 ^{abcd} | 33.3 ^{abc} | 0.815 ^{ab} | 50.25 ^{ab} | -4.87 ^{hijk} | DS | 0 | 0 |
| 92 ^{ab} | 0.802 ^{bcdef} | 31.35 ^{defgh} | 0.815 ^{ab} | 42 ^{cdefg} | -3.62 ^{bcdef} | PW | 0 | 0 |
| 81 ^{cdefg} | 0.85 ^{abc} | 32.33 ^{bcdefg} | 0.75 ^{abc} | 43 ^{cdefg} | -3.87 ^{cdefgh} | SW | 0 | 0 |
| 93.5 ^a | 0.90 ^a | 30.6 ^{ghi} | 0.79 ^{abc} | 43.16 ^{cdefg} | -4 ^{defghi} | PSA750 | 0 | 0 |
| 75.5 ^{fgh} | 0.79 ^{bcdefg} | 32.1 ^{bcdefg} | 0.815 ^{ab} | 39 ^{gh} | -4.5 ^{fghijk} | PSA1500 | 0 | 0 |
| 78 ^{defgh} | 0.76 ^{cdefgh} | 32.4 ^{bcdefg} | 0.77 ^{abc} | 43.83 ^{bcdefg} | -4.87 ^{hijk} | SSA750 | 0 | 0 |
| 83 ^{bcdef} | 0.82 ^{abcd} | 30.8 ^{fghi} | 0.75 ^{abc} | 40.5 ^{efgh} | -5.37 ^k | SSA1500 | 0 | 0 |
| 53 ^l | 0.52 ^j | 33.75 ^{ab} | 0.37 ^g | 30.33 ⁱ | -3.08 ^{abcd} | DS | 250 | 0 |
| 65 ^{ij} | 0.84 ^{abcd} | 30.75 ^{ghi} | 0.80 ^{ab} | 39 ^{gh} | -3.25 ^{abcde} | PW | 250 | 0 |
| 81.33 ^{cdefg} | 0.75 ^{defgh} | 30.2 ^{hij} | 0.75 ^{abc} | 52.5 ^a | -3.75 ^{cdefg} | SW | 250 | 0 |
| 77 ^{efgh} | 0.79 ^{bcdef} | 31.5 ^{cdefgh} | 0.65 ^{de} | 34.4 ^{hi} | -4 ^{defghi} | PSA750 | 250 | 0 |
| 57 ^{jkl} | 0.82 ^{abcd} | 32.7 ^{abcde} | 0.801 ^{ab} | 42.5 ^{cdefg} | -3.4 ^{abcde} | PSA1500 | 250 | 0 |
| 78.33 ^{defgh} | 0.89 ^a | 31.65 ^{cdefgh} | 0.815 ^{ab} | 38.25 ^{gh} | -5.12 ^{jk} | SSA750 | 250 | 0 |
| 81 ^{cdefg} | 0.77 ^{cdefgh} | 31.15 ^{defghi} | 0.813 ^{ab} | 43.25 ^{cdefg} | -4 ^{defghi} | SSA1500 | 250 | 0 |
| 60.33 ^{ijk} | 0.62 ⁱ | 30.91 ^{defghi} | 0.48 ^f | 38.16 ^{gh} | -3.75 ^{cdefg} | DS | 0 | 2500 |
| 88.33 ^{abcd} | 0.78 ^{bcdefg} | 28 ^k | 0.801 ^{ab} | 48 ^{abc} | -5 ^{ijk} | PW | 0 | 2500 |
| 84.33 ^{abcdef} | 0.85 ^{abc} | 29.43 ^{ijk} | 0.63 ^e | 41 ^{defg} | -2.62 ^{ab} | SW | 0 | 2500 |
| 83.66 ^{abcdef} | 0.72 ^{efgh} | 31.23 ^{defghi} | 0.78 ^{abc} | 46.75 ^{abcde} | -2.5 ^a | PSA750 | 0 | 2500 |
| 55 ^{kl} | 0.84 ^{abcd} | 28.8 ^{jk} | 0.801 ^{ab} | 52.75 ^a | -4.62 ^{fghijk} | PSA1500 | 0 | 2500 |
| 83 ^{bcdef} | 0.87 ^{ab} | 31.75 ^{cdefgh} | 0.77 ^{abc} | 47.75 ^{abcd} | -4.25 ^{efghij} | SSA750 | 0 | 2500 |
| 91 ^{abc} | 0.82 ^{abcd} | 32.05 ^{bcdefgh} | 0.73 ^{bc} | 45.5 ^{bcdef} | -3.91 ^{defgh} | SSA1500 | 0 | 2500 |
| 52 ^l | 0.46 ^j | 34.25 ^a | 0.34 ^g | 29.33 ⁱ | -2.66 ^{ab} | DS | 250 | 2500 |
| 63 ^{ij} | 0.69 ^{hi} | 31.55 ^{cdefgh} | 0.78 ^{abc} | 43 ^{cdefg} | -3.87 ^{cdefgh} | PW | 250 | 2500 |
| 89 ^{abc} | 0.71 ^{fghi} | 31.25 ^{defghi} | 0.73 ^{bc} | 44.5 ^{bcdefg} | -2.83 ^{abc} | SW | 250 | 2500 |
| 70 ^{hi} | 0.807 ^{abcde} | 32.65 ^{abcdef} | 0.79 ^{ab} | 40.75 ^{efgh} | -4 ^{defghi} | PSA750 | 250 | 2500 |
| 71.5 ^{ghi} | 0.77 ^{cdefgh} | 31.3 ^{defgh} | 0.78 ^{abc} | 41.5 ^{cdefg} | -4.75 ^{ghijk} | PSA1500 | 250 | 2500 |
| 86.5 ^{abcde} | 0.81 ^{abcde} | 32.72 ^{abcd} | 0.82 ^a | 52.25 ^a | -3.75 ^{cdefg} | SSA750 | 250 | 2500 |
| 86 ^{abcdef} | 0.70 ^{ghi} | 30.83 ^{efghi} | 0.71 ^{cd} | 43.75 ^{bcdefg} | -3.87 ^{cdefgh} | SSA1500 | 250 | 2500 |

DS, Dry seed; PSA750, Priming seed with 750 μM SA; PSA1500, Priming seed with 1500 μM SA; PW, Priming seed with distilled water; SSA750, Spraying with 750 μM SA; SSA1500, Spraying with 1500 μM SA; SW, Spraying with distilled water, letters; indicate differences between treatments

ادامه جدول ۳-

Continue Table 3.

| پروکسیداز Proxidase ($\mu\text{M T G m}^{-1}$ mg P^{-1}) | آسکوربات پروکسیداز Ascorbat Proxidase ($\mu\text{M NADH}$ $\text{m}^{-1} \text{mg P}^{-1}$) | کاتالاز Catalase (μM $\text{H}_2\text{O}_2 \text{ m}^{-1}$ mg P^{-1}) | پروتئین کل Total Protein (mg grfw^{-1}) | کارتنوئید Carotenoid (mg grfw^{-1}) | قندهای محلول WSC (mg grfw^{-1}) | پرولین Proline (μM grfw^{-1}) | سالیسیلیک اسید SA (μM) | سرب Pb (ppm) | روی Zn (ppm) |
|--|--|---|---|--|---|--|--|--------------------|--------------------|
| 3.32 ^{ghi} | 0.1248 ^{ef} | 0.020 ^b | 2.22 ^{defgh} | 1.58 ^{cdef} | 0.1030 ^{defg} | 0.0506 ^d | DS | 0 | 0 |
| 5.14 ^{abcde} | 0.216 ^d | 0.039 ^b | 1.668 ^h | 1.2 ^{ef} | 0.115 ^{cde} | 0.0526 ^{cd} | PW | 0 | 0 |
| 4.05 ^{defgh} | 0.332 ^{ab} | 0.0723 ^b | 2.046 ^{efgh} | 1.73 ^{bcdef} | 0.1149 ^{cde} | 0.0506 ^d | SW | 0 | 0 |
| 3.79 ^{efgh} | 0.1184 ^{efg} | 0.0416 ^b | 1.824 ^{gh} | 1.16 ^f | 0.1126 ^{cde} | 0.0515 ^d | PSA750 | 0 | 0 |
| 4.61 ^{bcdef} | 0.0494 ^{hi} | 0.078 ^b | 2.557 ^{abcdefg} | 2.16 ^{abcd} | 0.1095 ^{de} | 0.0503 ^d | PSA1500 | 0 | 0 |
| 6.285 ^a | 0.133 ^e | 0.103 ^b | 1.859 ^{fgh} | 1.57 ^{cdef} | 0.1072 ^{def} | 0.0492 ^d | SSA750 | 0 | 0 |
| 3.5 ^{fghi} | 0.0855 ^{fgh} | 0.111 ^b | 2.368 ^{bcdefgh} | 2.2 ^{abcd} | 0.1062 ^{def} | 0.050 ^d | SSA1500 | 0 | 0 |
| 5.02 ^{abcde} | 0.362 ^{ab} | 0.0485 ^b | 3.0239 ^{abc} | 1.55 ^{cdef} | 0.1623 ^b | 0.127 ^a | DS | 250 | 0 |
| 5.20 ^{abcde} | 0.1405 ^e | 0.0555 ^b | 2.7486 ^{abcde} | 2.21 ^{abcd} | 0.10802 ^{de} | 0.0496 ^d | PW | 250 | 0 |
| 4.9 ^{abcdef} | 0.023 ⁱ | 0.0594 ^b | 2.535 ^{abcdefg} | 2.26 ^{abcd} | 0.1056 ^{defg} | 0.0533 ^{cd} | SW | 250 | 0 |
| 3.08 ^{hi} | 0.0595 ^{hi} | 0.0452 ^b | 2.398 ^{bcdefgh} | 1.78 ^{abcdef} | 0.0866 ^{ghi} | 0.0526 ^{cd} | PSA750 | 250 | 0 |
| 5.13 ^{abcde} | 0.0515 ^{hi} | 0.0895 ^b | 2.8331 ^{abcd} | 2.00 ^{abcdef} | 0.1018 ^{efg} | 0.0495 ^d | PSA1500 | 250 | 0 |
| 4.35 ^{cdefgh} | 0.0712 ^{ghi} | 0.33 ^a | 2.7879 ^{abcde} | 2.03 ^{abcde} | 0.0735 ⁱ | 0.0533 ^{cd} | SSA750 | 250 | 0 |
| 3.19 ^{ghi} | 0.087 ^{fgh} | 0.040 ^b | 2.40 ^{bcdefgh} | 2.41 ^{abc} | 0.1133 ^{cde} | 0.0527 ^{cd} | SSA1500 | 250 | 0 |
| 3.38 ^{ghi} | 0.276 ^c | 0.03 ^b | 2.626 ^{abcdef} | 1.56 ^{cdef} | 0.1294 ^c | 0.112 ^b | DS | 0 | 2500 |
| 4.13 ^{cdefgh} | 0.0610 ^{hi} | 0.028 ^b | 2.6441 ^{abcde} | 1.64 ^{cdef} | 0.0792 ⁱ | 0.0529 ^{cd} | PW | 0 | 2500 |
| 4.22 ^{cdefgh} | 0.0815 ^{fgh} | 0.0297 ^b | 2.7237 ^{abcde} | 1.48 ^{def} | 0.1035 ^{defg} | 0.055 ^{cd} | SW | 0 | 2500 |
| 5.3 ^{abcd} | 0.042 ^{hi} | 0.052 ^b | 2.163 ^{defgh} | 2.62 ^a | 0.1064 ^{def} | 0.0512 ^d | PSA750 | 0 | 2500 |
| 5.61 ^{abc} | 0.060 ^{hi} | 0.131 ^b | 1.840 ^{gh} | 2.11 ^{abcd} | 0.0990 ^{efgh} | 0.0631 ^c | PSA1500 | 0 | 2500 |
| 6.08 ^{ab} | 0.039 ^{hi} | 0.0647 ^b | 2.279 ^{bcdefgh} | 1.73 ^{bcdef} | 0.121 ^{cd} | 0.0514 ^d | SSA750 | 0 | 2500 |
| 5.63 ^{abc} | 0.0715 ^{ghi} | 0.066 ^b | 2.508 ^{abcdefg} | 2.36 ^{abc} | 0.1034 ^{defg} | 0.052 ^{cd} | SSA1500 | 0 | 2500 |
| 4.16 ^{cdefgh} | 0.4371 ^a | 0.0729 ^b | 3.228 ^a | 1.36 ^{def} | 0.185 ^a | 0.136 ^a | DS | 250 | 2500 |
| 2.18 ^{ij} | 0.0634 ^{hi} | 0.035 ^b | 2.8808 ^{abcd} | 1.6 ^{cdef} | 0.1115 ^{cde} | 0.049 ^d | PW | 250 | 2500 |
| 5.24 ^{abcde} | 0.0851 ^{fgh} | 0.0297 ^b | 2.274 ^{cdefgh} | 2.15 ^{abcd} | 0.0883 ^{fghi} | 0.0543 ^{cd} | SW | 250 | 2500 |
| 3.15 ^{ghi} | 0.0446 ^{hi} | 0.025 ^b | 2.9261 ^{abcd} | 2.55 ^{ab} | 0.1074 ^{def} | 0.0512 ^d | PSA750 | 250 | 2500 |
| 1.601 ⁱ | 0.0641 ^{hi} | 0.0288 ^b | 3.0533 ^{ab} | 2.32 ^{abcd} | 0.1007 ^{efg} | 0.0523 ^{cd} | PSA1500 | 250 | 2500 |
| 3.8 ^{defgh} | 0.0715 ^{ghi} | 0.0538 ^b | 2.557 ^{abcdefg} | 1.65 ^{cdef} | 0.0822 ^{hi} | 0.0535 ^{cd} | SSA750 | 250 | 2500 |
| 4.3 ^{cdefgh} | 0.044 ^{hi} | 0.0163 ^b | 2.214 ^{defgh} | 2.15 ^{abcd} | 0.1093 ^{de} | 0.0515 ^d | SSA1500 | 250 | 2500 |

DS, Dry seed; PSA750, Priming seed with 750 μM SA; PSA1500, Priming seed with 1500 μM SA; PW, Priming seed with distilled water; SSA750, Spraying with 750 μM SA; SSA1500, Spraying with 1500 μM SA; SW, Spraying with distilled water, letters; indicate differences between treatments

و تنش توأم سرب و روی به ترتیب با ۰/۵۲، ۰/۶۲ و ۰/۴۶ شاخص جنتی نسبت به شاهد با ۰/۸۱ شاخص جنتی به دست آمد. در مقابل این شاخص تحت تنش سرب و روی و تنش توأم سرب و روی با اعمال سالیسیلیک اسید به روش محلول‌پاشی و غلظت ۷۵۰ میکرومولار به ترتیب ۰/۸۷، ۰/۸۹ و ۰/۸۱ جنتی نسبت به دیگر تیمارهای اعمال‌شده افزایش یافت. نتایج مقایسه میانگین نشان داد میزان پایداری غشاء در گیاهان تحت تنش سرب و روی و تنش توأم سرب و روی به ترتیب ۵۳/۱، ۶۰/۳۳ و ۵۲/۱ درصد نسبت به شاهد با ۸۳/۶۶ درصد کاهش نشان داد (جدول ۳). شاخص پایداری غشاء با کاربرد سالیسیلیک اسید و روش محلول‌پاشی با غلظت ۱۵۰۰ میکرومولار نسبت به دیگر تیمارها تحت تنش فلزات بهبود یافت. طبق نتایج به دست آمده مقدار کارتنوئید تحت تنش نسبت به شاهد با ۱/۵۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه برگ تغییر معنی‌داری مشاهده نشد؛ اما کاربرد سالیسیلیک اسید باعث افزایش غلظت کارتنوئیدهای برگ گردید که همسو با آن، افزایش پایداری غشاء مشاهده شد و به دنبال آن نیز، میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء را کاهش یافت (جدول ۳). نتایج این مطالعه با نتایج گزارش شده آوزو و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت دارد (۵۶).

نتایج مقایسه میانگین (جدول ۳)، نشان داد که مقدار قندهای محلول با اعمال تنش فلزات سنگین روی و سرب و تنش مرکب روی و سرب به ترتیب ۰/۱۶، ۰/۱۲ و ۰/۱۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه برگ نسبت به شاهد با مقدار ۰/۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه برگ افزایش یافت؛ اما تیمار سالیسیلیک اسید موجب کاهش مقدار این اسمولیت نسبت به شاهد و شرایط تنش گردید. مقدار پرولین نیز همانند قندهای محلول، در شرایط تنش سرب و روی و تنش مرکب سرب و روی به ترتیب با ۰/۱۲، ۰/۱۱ و ۰/۱۳ میکروگرم بر گرم وزن تازه برگ نسبت به شاهد با مقدار ۰/۰۵ میکروگرم بر گرم وزن تازه برگ افزایش یافت؛ و با اعمال تیمارهای سالیسیلیک اسید مقدار این اسمولیت

میزان ارتفاع گیاهان با اعمال تیمارهای پیش‌تیمار و محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید، در شرایط بدون تنش نسبت به شاهد کاهش ۲۰ درصدی نشان دادند؛ اما گیاهان تحت تنش به‌ویژه تنش توأم سرب و روی کاهش حدود ۴۰ درصد در ارتفاع نسبت به شاهد را نشان دادند که با اعمال تیمار سالیسیلیک اسید این کاهش ارتفاع بهبود یافت این نتایج با نتایج پال و همکاران (۲۰۰۲) مطابق بود (۵۲). در تنش سرب و تنش توأم سرب و روی تیمار به روش محلول‌پاشی نتایج بهتری نشان داد. ولی در تنش روی تیمار به روش پیش‌تیمار بذور بهتر بود. دمای برگ و اختلاف دمای برگ با محیط، در گیاهان تحت تنش افزایش یافتند که با اعمال تیمار سالیسیلیک اسید این وضعیت کاهش یافت؛ در تنش سرب و تنش توأم سرب و روی، تیمار محلول‌پاشی موجب خنک‌تر شدن گیاه گردید؛ اما در تنش روی تیمار پیش‌تیمار بذور بهتر عمل کرد (جدول ۳). سرعت برگ‌دهی تحت شرایط تنش فلزات سرب، روی و تنش توأم روی سرب و روی به ترتیب ۰/۳۷، ۰/۴۸ و ۰/۳۴ برگ در واحد روز نسبت به شاهد با ۰/۸۱ برگ در واحد روز کاهش یافت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که فلزات سنگین با اختلال در تقسیم و طویل شدن سلول، منجر به کاهش در تعداد برگ می‌گردند. تیمار محلول‌پاشی در غلظت ۷۵۰ میکرومولار تحت تنش سرب و توأم سرب و روی باعث افزایش سرعت برگ‌دهی به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۸۲ برگ در روز نسبت به دیگر تیمارهای اعمال‌شده گردید؛ اما در تنش عنصر روی، روش پیش‌تیمار بذور نتایج بهتری نشان دادند که با گزارش‌های دیگر پژوهش‌گران مطابقت دارد (۵۳ و ۵۴). در شاخص فلورسانس کلروفیلی تنش موجب کاهش ظرفیت جذب انرژی توسط برگ گردید. کاهش در پتانسیل جذب نور موجب می‌گردد تا میزان تولیدات فتوسنتزی و فتواسمیلات‌ها کاهش پیدا کند که با نتایج بابو و همکاران (۲۰۱۰) همخوانی دارد (۵۵). میزان فلورسانس کلروفیلی تحت شرایط تنش سرب و روی

نسبت به شرایط تنش کاهش معنی‌داری نشان داد (جدول ۶). کاستا و همکاران (۲۰۰۵) بیان کردند که محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید، با افزایش توان آنتی‌اکسیدانی گیاه بایونه موجب کاهش اثرات تنش اکسیداتیو و پایداری غشاء سلول و حفاظت از دستگاه فتوسنتزی شد (۵۷). مقایسه میانگین نشان داد (جدول ۳)، مقدار پروتئین کل و آنزیم‌ها با افزایش تنش نسبت به شاهد به‌عنوان سیستم‌های دفاعی گیاهان برای مقابله با تنش اکسیداتیو القاء شده نسبت به شاهد بالا می‌روند، ولی با اعمال هورمون سالیسیلیک اسید این صفات نسبت به شرایط تنش کاهش یافتند. نتایج پژوهش حاضر با گزارش دیگر پژوهش‌گران مطابقت داشت (۵۸ و ۵۹).

جدول مقایسه میانگین نشان داد (جدول ۴) که میزان فلزات سنگین سرب و روی جذب‌شده توسط بافت ریشه به ترتیب ۱۷/۵ و ۱۴۵/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک و میزان جذب سرب و روی توسط بخش هوایی گیاه به ترتیب ۱۳/۸ و ۶۹/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک نسبت به شاهد تا حد بحرانی و خسارت‌زا بود که با گزارش رضانی و همکاران (۲۰۱۶) همخوانی دارد (۶). پژوهش‌های متعدد انجام‌شده بر روی آبیاری مزارع با آب فاضلاب بیانگر آلودگی خاک‌ها و گیاهان به فلزات سنگین است (۶۰ و ۶۱).

با اعمال تیمارها در شرایط غیرتنش فقط در تیمار پرایم بذر نسبت به شاهد غلظت عنصر روی افزایش داشت. در تنش سرب میزان جذب در بافت ریشه و بخش هوایی گیاه با اعمال تیمارها کاهش یافت که در تیمار محلول‌پاشی این کاهش جذب نسبت به دیگر تیمارها بیشتر بود و در تیمار ۱۵۰۰ میکرومولار محلول‌پاشی به ترتیب ۶/۶ و ۴/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک، کم‌ترین میزان جذب را نشان داد. در تنش توأم سرب و روی میزان جذب فلز سرب در بافت ریشه و بخش هوایی گیاه به ترتیب ۱۰/۲ و ۹/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک به دست آمد و میزان

جذب فلز عنصر روی در بافت ریشه و بخش هوایی گیاه به ترتیب ۱۲۲ و ۵۹/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک بود، با اعمال تیمارها روش محلول‌پاشی غلظت ۷۵۰ میکرومولار موجب کاهش جذب این دو فلز در هر دو بافت ریشه و بخش هوایی گیاه نسبت به دیگر تیمارها شد؛ اما در تنش عنصر روی، تیمار به روش محلول‌پاشی جذب فلز روی را در بافت ریشه و بخش هوایی بوته نسبت به تیمارهای دیگر کاهش داد (جدول ۴)؛ ولی از لحاظ فاکتور انتقال در روش پرایم بذر غلظت ۱۵۰۰ میکرومولار کم‌ترین انتقال فلز به بخش هوایی گیاه داشتند (جدول ۷)؛ و کم‌ترین تجمع زیستی فلزات سرب و روی در بافت ریشه و بخش هوایی بوته، در روش تیمار محلول‌پاشی نسبت به دیگر تیمارها به دست آمد (جدول ۴).

گیاهانی که در شرایط حضور فلزات سنگین رشد می‌کنند با جذب این عناصر که غیرضروری هستند، صفات فیزیولوژیکی مانند دمای برگ یا کانوبی، فلورسانس کلروفیلی، شاخص پایداری غشاء متأثر می‌گردد و موجب فعال شدن سیستم دفاعی آنزیمی و غیرآنزیمی گیاه و همچنین باعث بالا رفتن اسمولیت‌های گیاه مانند پرولین و قندهای محلول می‌شود و به طبع آن صفات مورفولوژیکی مانند ارتفاع و سرعت برگ‌دهی متأثر می‌گردد؛ و در نهایت میزان رشد و عملکرد کاهش خواهد یافت. در این پژوهش نیز حضور فلزات سنگین به‌صورت مجزا و همچنین مرکب در محیط رشد گیاه، موجب کاهش میزان صفات فیزیولوژیک و مورفولوژیک گیاه شد.

عناصر سنگین با تحریک تشکیل رادیکال‌های آزاد و گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) در گیاه سبب تغییراتی در لپیدهای غشاء سلولی می‌شوند که موجب اختلال در ساختار غشاء سلولی و ناپایدار شدن غشاء سلولی می‌شود و در نهایت به انتشار محتویات درون سلول (الکترولیت) به خارج آن منجر می‌گردد (۶۲ و ۶۳).

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر سالیسیلیک اسید بر روی گیاه ذرت تحت تنش فلزات سنگین.

Table 4. Mean comparison of the effects of SA on corn plant under heavy metals stress.

| سرب Pb (ppm) | سالیسیلیک اسید SA (µm) | غلظت ریزه ریشه Root Zn (mg kgdw ⁻¹) | غلظت ریزه بخش هوایی گیاه Shoot Zn (mg kgdw ⁻¹) | فاکتور انتقال ریزه TF Zn | تجمع ریزه ریشه AFR Zn | تجمع ریزه بخش هوایی AFS Zn | غلظت سرب ریشه Root Pb (mg kgdw ⁻¹) | غلظت سرب بخش هوایی گیاه Shoot Pb (mg kgdw ⁻¹) | فاکتور انتقال سرب TF Pb | تجمع ریزه سرب AFR Pb | تجمع ریزه بخش هوایی AFS Pb | سرب Zn (ppm) |
|--------------------|------------------------------|--|---|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---|--|-------------------------------|----------------------------|----------------------------------|--------------------|
| | | | | | | | | | | | | |
| 0 | DS | 5 ^o | 3 ^j | 0.59 ^{bc} | 0.002 ^o | 0.0012 ^j | - | - | - | - | - | 0 |
| 0 | PW | 9.07 ^{ab} | 5.91 ^{ij} | 0.658 ^{cd} | 0.0036 ^{no} | 0.00236 ^{ij} | - | - | - | - | - | 0 |
| 0 | SW | 5.18 ^o | 4.24 ^j | 0.814 ^a | 0.00207 ^o | 0.00169 ^j | - | - | - | - | - | 0 |
| 0 | PSA750 | 20.38 ^m | 6.43 ^{ij} | 0.315 ^g | 0.0081 ^m | 0.00257 ^{ij} | - | - | - | - | - | 0 |
| 0 | PSA1500 | 35.47 ^k | 10.203 ^{ghi} | 0.287 ^{gh} | 0.0141 ^k | 0.00408 ^{ghi} | - | - | - | - | - | 0 |
| 0 | SSA750 | 6.08 ^{no} | 4.74 ^j | 0.785 ^{ab} | 0.0024 ^{no} | 0.00189 ^j | - | - | - | - | - | 0 |
| 0 | SSA1500 | 9.66 ⁿ | 7.9 ^{hij} | 0.818 ^a | 0.0038 ⁿ | 0.0031 ^{hij} | - | - | - | - | - | 0 |
| 250 | DS | - | - | - | - | - | 17.574 ^a | 13.8855 ^a | 0.7848 ^e | 0.0703 ^a | 0.055 ^a | 250 |
| 250 | PW | - | - | - | - | - | 12.05 ^b | 5.1667 ^f | 0.4283 ^h | 0.0482 ^b | 0.0206 ^c | 250 |
| 250 | SW | - | - | - | - | - | 11.825 ^c | 6.0967 ^e | 0.5153 ^g | 0.0473 ^b | 0.0243 ^{bc} | 250 |
| 250 | PSA750 | - | - | - | - | - | 11.985 ^c | 7.646 ^f | 0.6379 ^f | 0.0479 ^b | 0.03058 ^{bc} | 250 |
| 250 | PSA1500 | - | - | - | - | - | 11.937 ^c | 8.63 ^e | 0.7229 ^e | 0.0477 ^b | 0.03452 ^b | 250 |
| 250 | SSA750 | - | - | - | - | - | 9.055 ^e | 6.3047 ^e | 0.695 ^f | 0.0362 ^{bc} | 0.0252 ^{bc} | 250 |
| 250 | SSA1500 | - | - | - | - | - | 6.644 ^b | 4.326 ^g | 0.6515 ^f | 0.0265 ^d | 0.0173 ^{cd} | 250 |
| 2500 | DS | 145.34 ^e | 69.44 ^a | 0.477 ^f | 0.0581 ^e | 0.0277 ^a | - | - | - | - | - | 2500 |
| 2500 | PW | 102 ^f | 53.33 ^c | 0.523 ^{ef} | 0.0408 ^f | 0.0213 ^c | - | - | - | - | - | 2500 |
| 2500 | SW | 40.58 ^j | 28.67 ^e | 0.7103 ^{bc} | 0.0162 ^j | 0.0114 ^e | - | - | - | - | - | 2500 |
| 2500 | PSA750 | 80.6 ^g | 14.03 ^g | 0.174 ^{ij} | 0.0322 ^g | 0.00561 ^g | - | - | - | - | - | 2500 |
| 2500 | PSA1500 | 180.77 ^b | 23 ^f | 0.127 ^{kl} | 0.0723 ^b | 0.0092 ^f | - | - | - | - | - | 2500 |
| 2500 | SSA750 | 80.65 ^g | 42.79 ^d | 0.531 ^{ef} | 0.0322 ^g | 0.0171 ^d | - | - | - | - | - | 2500 |
| 2500 | SSA1500 | 68.28 ^h | 19.84 ^f | 0.2909 ^{gh} | 0.0273 ^h | 0.0079 ^f | - | - | - | - | - | 2500 |
| 2500 | DS | 122.01 ^d | 59.44 ^b | 0.486 ^f | 0.0488 ^d | 0.0237 ^b | 10.26 ^d | 9.8667 ^b | 0.967 ^b | 0.04106 ^b | 0.0395 ^b | 2500 |
| 2500 | PW | 65.17 ^h | 14.5 ^g | 0.222 ^{hi} | 0.02606 ^h | 0.0058 ^g | 6.022 ^h | 5.4113 ^f | 0.896 ^c | 0.0241 ^d | 0.0216 ^c | 2500 |
| 2500 | SW | 43.48 ^j | 12.42 ^{gh} | 0.286 ^{gh} | 0.0173 ^j | 0.0049 ^{gh} | 7.804 ^g | 4.8433 ^e | 0.62058 ^f | 0.0321 ^c | 0.0194 ^{cd} | 2500 |
| 2500 | PSA750 | 27.24 ⁱ | 14.98 ^g | 0.556 ^{ef} | 0.0108 ⁱ | 0.0059 ^g | 8.0013 ^f | 5.5713 ^f | 0.695 ^f | 0.032 ^c | 0.0222 ^c | 2500 |
| 2500 | PSA1500 | 187.81 ^a | 14.13 ^g | 0.0752 ⁱ | 0.0751 ^a | 0.0056 ^g | 9.516 ^e | 5.4913 ^f | 0.578 ^g | 0.0381 ^c | 0.0219 ^c | 2500 |
| 2500 | SSA750 | 56.32 ⁱ | 6.8 ^{ij} | 0.1207 ^{kl} | 0.0225 ⁱ | 0.00272 ^{ij} | 2.145 ⁱ | 2.8593 ^h | 1.313 ^a | 0.0086 ^e | 0.0114 ^d | 2500 |
| 2500 | SSA1500 | 108.92 ^e | 14.03 ^g | 0.128 ^{kl} | 0.0435 ^e | 0.00565 ^g | 2.113 ⁱ | 2.7313 ^h | 1.275 ^a | 0.0085 ^e | 0.0109 ^d | 2500 |

DS, Dry seed; PSA750, Priming seed with 750 µM SA; PSA1500, Priming seed with 1500 µM SA; PW, Priming seed with distilled water; SSA750, Spraying with 750 µM SA; SSA1500, Spraying with 1500 µM SA; SW, Spraying with distilled water, letters; indicate differences between treatments

می‌شود، نسبت داد (۷۰). افزایش تولید پرولین یکی دیگر از راهکارهای گیاهان در واکنش به تنش فلزات سنگین است که با کاهش پراکسیداسیون لیپیدها خطر گونه‌های فعال اکسیژن را کاهش داده و موجب کاهش آسیب‌دیدگی غشاها می‌گردد (۷۱، ۷۲ و ۷۳). سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی در گیاهان مانند میزان پروتئین کل و آنزیم‌های کاتالاز، پروکسیداز و آسکوربات پروکسیداز و میزان کارتنوئید تحت تنش افزایش می‌یابند. گیاهان در معرض تنش‌های محیطی، پروتئین‌های تنش یا پروتئین‌های شوک حرارتی را سنتز می‌کنند. در این آزمایش، بالا بودن پروتئین کل احتمالاً می‌تواند به این دلیل باشد (۷۴ و ۷۵)؛ اما آنزیم‌های مذکور در شرایط تنش به‌عنوان جاروب‌کننده اکسیدان‌ها در گیاه سنتز می‌شوند (۷۶). بررسی پژوهش‌گران نشان داد که گیاهان در معرض تنش با همکاری آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی، چرخه‌های گلوکاتیون-آسکوربات، مهلر و گزانتوفیل به وجود می‌آورند که مانع از تولید انواع اکسیژن فعال می‌شود و یا آن‌ها را به‌طور کامل احیا و به آب تبدیل می‌کند (۷۷ و ۷۸).

میزان جذب و تجمع بحرانی عناصر سنگین سرب و روی در گیاهان به ترتیب در محدوده ۱۰ تا ۲۰ و ۱۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک است (۷۹ و ۸۰). در این آزمایش میزان جذب عناصر در این محدوده در ریشه و بخش هوایی بوته به ثبت رسیده و گیاه دچار بحران و کاهش رشد گردید (جدول ۴). این عناصر توسط ریشه‌های گیاه جذب و به بخش‌های بیرونی ریشه و اندامک‌های سلولی متصل می‌شود و مقدار انتقال آن به سمت اندام‌های هوایی محدود می‌شود. به همین دلیل، بیش‌ترین مقدار تجمع در ریشه‌ها و کم‌ترین مقدار در بخش هوایی مشاهده شد (۸۱ و ۸۲)؛ که نتایج حاصل از این آزمایش نیز تجمع بیش‌تر در ریشه است.

فلورسانس کلروفیلی تحت تنش‌های اعمال‌شده تا ۴۰ درصد کاهش نشان داد که این کاهش در تنش توأم سرب و روی بیش‌تر بود. فلزات سنگین با تغییر ساختار غشاء کلروپلاست و تخریب مرکز واکنش فتوسیستم ۲، انتقال الکترون‌ها را بازداري می‌کند، بنابراین واکنش‌های وابسته به نور فتوسنتز را تخریب می‌کند که موجب متأثر شدن کلروفیل فلورسانس می‌گردد (۶۴). دمای برگ نیز در حضور تنش این فلزات متأثر شد و افزایش یافت. تبخیر آب باعث تعدیل در دمای برگ می‌شود اما تنش با کاهش جذب آب توسط گیاه و بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تعرق، دمای برگ را افزایش می‌دهد (۱۷ و ۶۵). از طرفی تخریب غشاء کلروپلاستی و اختلال در انتقال فوتون‌های جذب‌شده از آنتن‌ها به مرکز واکنش به‌موجب غیرفعال شدن بخشی از مرکز واکنش فتوسیستم ۲، پراکنش انرژی نورانی جذب‌شده به‌صورت گرما افزایش می‌یابد که باعث افزایش دمای برگ می‌شود (۶۶، ۶۷ و ۶۸). ارتفاع و سرعت برگ‌دهی گیاه به‌عنوان صفات مورفولوژیک با تنش فلزات سنگین و متأثر از اختلال در صفات فیزیولوژیک، به‌ترتیب تا ۴۰ و ۵۰ درصد کاهش یافتند که در تنش مرکب این کاهش بیش‌تر بود. تنش اکسیداتیو ایجادشده در سلول‌های گیاهی با تخریب غشای سلولی و دستگاه فتوسنتزی و جلوگیری از فعالیت فتوسنتزی و تولید ATP و هم‌چنین آسیب به DNA موجب کاهش ارتفاع، سرعت برگ‌دهی و رشد گیاه می‌گردد (۲۳ و ۶۹).

در شرایط تنش‌ها، گیاهان اسمولیت‌های متعادل‌کننده گیاه مانند پرولین و قندهای محلول افزایش می‌یابند. افزایش کربوهیدرات‌های محلول در زمان تنش را می‌توان به توقف رشد، تخریب قندهای نامحلول و هم‌چنین تولید این ترکیبات از مسیر غیرفتوسنتزی (افزایش فعالیت آنزیم‌های اینورتاز و سوکروز سنتتاز) که باعث افزایش قندهای محلول

جلوگیری از انتقال آن به بخش‌های هوایی گیاه از بروز علائم سمیت در بخش هوایی گیاه بکاهد (۸۳).

نتیجه‌گیری کلی

در این آزمایش با اعمال غلظت‌های مختلف تیمار سالیسیلیک اسید به دو روش محلول‌پاشی برگ‌ی و پرایم بذری، با کاهش جذب عناصر سنگین و هم‌چنین کاهش اثرات مضر عناصر سرب و روی جذب‌شده، میزان صفات موردبررسی بهبود یافتند و در شرایط رشدی نزدیک به بهینه قرار گرفتند. مقایسه غلظت و روش کاربرد سالیسیلیک اسید نشان داد که روش محلول‌پاشی برگ‌ی در غلظت ۷۵۰ میکرومولار، بیش‌تر از روش پرایم بذری و دیگر غلظت‌های اعمال‌شده، صفات فیزیولوژیک و مورفولوژیک گیاه را در دوران رشد بهبود می‌بخشند. طبق نتایج به‌دست آمده در این آزمایش نشان داد که در حضور دو فلز سرب و روی، تیمار محلول‌پاشی برگ‌ی، گیاه را می‌تواند نسبت به تنش این دو فلز متحمل کند.

جهت کاهش تنش و بهبود ویژگی‌های گیاهان تحت تنش، با کاربرد سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک هورمون و نقش پیام‌رسانی و سازگاری گیاهان به محیط‌های در معرض تنش فلزات موردتوجه بوده و بسته به غلظت، زمان و گیاه مورداستفاده دارای آثار دوگانه‌ای است. اعمال سالیسیلیک اسید در غلظت و روش مناسب با کنترل بیان ژن و سنتز پروتئین‌های تحمل به تنش‌ها و میزان آنزیم‌های تنش و هم‌چنین میزان اسمولیت‌های پرولین و قندهای محلول و میزان کارتنوئیدها را افزایش می‌دهد (۳۶)؛ که به طبع آن، مقدار تنش اکسیداتیو کاهش می‌یابد و موجب حفاظت از غشاء کلروپلاست و سلول و بهبود وضعیت دمایی و رطوبتی گیاه و نیز دستگاه فتوسنتزی می‌شود و در نتیجه موجب افزایش میزان فلورسانس کلروفیلی و تولیدات فتوسنتزی می‌گردد. در نتیجه، باعث افزایش رشد، ارتفاع و سرعت برگ‌دهی در گیاه می‌شود (۳۵، ۵۶ و ۵۹). از طرفی سالیسیلیک اسید می‌تواند با مهار جذب فلزات سنگین در ریشه و

منابع

1. Dalvand, M., Hamidian, A. H., Chahuki, M. Z., Zadeh, B. M., Jalili, S. A., & Zadeh, A. E. (2014). The concentration of Cu, Pb, Zn and Mn in shoot of *Artemisia* sp. In the surrounding pastures Valley copper mine barberry, Taft city, Yazd province. *Journal of Rangeland*, 8 (3), 219-229.
2. Fahimirad, S., & Hatami, M. (2017). Heavy metal-mediated changes in growth and phytochemicals of edible and medicinal plants. *Medicinal plants and environmental challenges*, 189-214.
3. Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Ibrahim, M., Abbas, F., Farid, M., Zia-ur-Rehman, M., Irshad, M. K., Bharwana, S. A., & Bharwana, S. A. (2015). The effect of excess copper on growth and physiology of important food crops: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 8148-8162.
4. Pinto, A. P., De Varennes, A., Fonseca, R., & Teixeira, D. M. (2015). Phytoremediation of soils contaminated with heavy metals: techniques and strategies. *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants, Volume 1*, 133-155.
5. Yadav, S. K. (2010). Heavy metals toxicity in plants: an overview on the role of glutathione and phytochelatin in heavy metal stress tolerance of plants. *South African journal of botany*, 76 (2), 167-179.
6. Ramzani, P. M. A., Khan, W. U. D., Iqbal, M., Kausar, S., Ali, S., Rizwan, M., & Virk, Z. A. (2016). Effect of different amendments on rice (*Oryza sativa* L.) growth, yield, nutrient uptake and grain quality in Ni-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 18585-18595.

7. Arshad, T., Maqbool, N., Javed, F., Wahid, A., & Arshad, M. U. (2017). Enhancing the defensive mechanism of lead affected barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes by exogenously applied salicylic acid. *Journal of Agricultural Science*, 9, 139-146.
8. Arif, N., Yadav, V., Singh, S., Singh, S., Ahmad, P., Mishra, R. K., Sharma, S., Tripathi, D. K., Dubey, N. K., & Chauhan, D. K. (2016). Influence of high and low levels of plant-beneficial heavy metal ions on plant growth and development. *Frontiers in environmental science*, 4, 69.
9. Riyazuddin, R., Nisha, N., Ejaz, B., Khan, M. I. R., Kumar, M., Ramteke, P. W., & Gupta, R. (2021). A comprehensive review on the heavy metal toxicity and sequestration in plants. *Biomolecules*, 12 (1), 43.
10. Amari, T., Ghnaya, T., & Abdelly, C. (2017). Nickel, cadmium and lead phytotoxicity and potential of halophytic plants in heavy metal extraction. *South African Journal of Botany*, 111, 99-110.
11. Ruley, A. T., Sharma, N. C., Sahi, S. V., Singh, S. R., & Sajwan, K. S. (2006). Effects of lead and chelators on growth, photosynthetic activity and Pb uptake in *Sesbania drummondii* grown in soil. *Environmental pollution*, 144 (1), 11-18.
12. Chandra, R., & Kang, H. (2016). Mixed heavy metal stress on photosynthesis, transpiration rate, and chlorophyll content in poplar hybrids. *Forest Science and Technology*, 12 (2), 55-61.
13. Allakhverdiev, S. I., Sakamoto, A., Nishiyama, Y., Inaba, M., & Murata, N. (2000). Ionic and osmotic effects of NaCl-induced inactivation of photosystems I and II in *Synechococcus* sp. *Plant physiology*, 123 (3), 1047-1056.
14. Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 89-113.
15. Saremi Rad, B., Esfandir, A. A., Shekar Poor, M., Sofalian, A., Avance, A., & Moosavi, S. B. 2011. Effect of cadmium on some morphology and physiology characteristics of weath in germination stage. *Journal of plant Researches*. 27 (1), 47-58. [In Persian]
16. El-Gamal, S. M., & Hammad, S. A. (2003). Counteracting the deleterious effects of lead and cadmium on tomato plants by using yeast, garlic and eucalyptus extracts. *Minufiya Journal of Agricultural Research*, 28 (3), 737-755.
17. Seregin, I. V., & Ivanov, V. B. (2001). Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. *Russian journal of plant physiology*, 48, 523-544.
18. Pourrut, B., Shahid, M., Dumat, C., Winterton, P., & Pinelli, E. (2011). Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants. *Reviews of environmental contamination and toxicology volume* 213, 113-136.
19. Ali, B., Mwamba, T. M., Gill, R. A., Yang, C., Ali, S., Daud, M. K., Wu, Y., & Zhou, W. (2014). Improvement of element uptake and antioxidative defense in *Brassica napus* under lead stress by application of hydrogen sulfide. *Plant growth regulation*, 74, 261-273.
20. Ashraf, U., Kanu, A. S., Deng, Q., Mo, Z., Pan, S., Tian, H., & Tang, X. (2017). Lead (Pb) toxicity; physio-biochemical mechanisms, grain yield, quality, and Pb distribution proportions in scented rice. *Frontiers in Plant Science*, 8, 259.
21. Thakur, A. K., & Singh, K. J. (2012). Leaf temperature as thermal bio-indicator of heavy metal pollutants. *Journal of Agricultural Science and Technology. A*, 2 (1A), 131.
22. Abbaspour, A., Kalbasi, M., Hajrasoliha, S., & Golchin, A. (2005). Investigation of Cadmium and Lead contamination in some agricultural soils of Iran. In *proceeding of 9th Soil Science Congress of Iran*. 1, 543-545. [In Persian]
23. Ruley, A. T., Sharma, N. C., & Sahi, S. V. (2004). Antioxidant defense in a lead accumulating plant, *Sesbania drummondii*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 42 (11), 899-906.
24. MacFarlane, G. R., & Burchett, M. D. (2002). Toxicity, growth and accumulation relationships of copper,

- lead and zinc in the grey mangrove *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *Marine Environmental Research*, 54 (1), 65-84.
25. Yahaghi, Z., Shirvani, M., Nourbakhsh, F., & Pueyo, J. J. (2019). Uptake and effects of lead and zinc on alfalfa (*Medicago sativa* L.) seed germination and seedling growth: Role of plant growth promoting bacteria. *South African Journal of Botany*, 124, 573-582.
26. Jain, R., Srivastava, S., Solomon, S., Shrivastava, A. K., & Chandra, A. (2010). Impact of excess zinc on growth parameters, cell division, nutrient accumulation, photosynthetic pigments and oxidative stress of sugarcane (*Saccharum* spp.). *Acta Physiologiae Plantarum*, 32, 979-986.
27. dos Santos, J. O., Andrade, C. A., Dázio de Souza, K. R., Santos, M. D. O., Brandão, I. R., Alves, J. D., & Santos, I. S. (2019). Impact of zinc stress on biochemical and biophysical parameters in *Coffea arabica* seedlings. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 22, 253-264.
28. Sytar, O., Kumari, P., Yadav, S., Brestic, M., & Rastogi, A. (2019). Phytohormone priming: regulator for heavy metal stress in plants. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38, 739-752.
29. Wani, A. S., Ahmad, A., Hayat, S., & Tahir, I. (2019). Epibrassinolide and proline alleviate the photosynthetic and yield inhibition under salt stress by acting on antioxidant system in mustard. *Plant physiology and biochemistry*, 135, 385-394.
30. Wani, A. B., Chadar, H., Wani, A. H., Singh, S., & Upadhyay, N. (2017). Salicylic acid to decrease plant stress. *Environmental Chemistry Letters*, 15, 101-123.
31. Saraf, R., Saingar, S., Chaudhary, S., & Chakraborty, D. (2018). Response of plants to salinity stress and the role of salicylic acid in modulating tolerance mechanisms: physiological and proteomic Approach. *Biotic and abiotic stress tolerance in plants*, 103-136.
32. Singh, A. P., Dixit, G., Mishra, S., Dwivedi, S., Tiwari, M., Mallick, S., ... & Tripathi, R. D. (2015). Salicylic acid modulates arsenic toxicity by reducing its root to shoot translocation in rice (*Oryza sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*, 6, 340.
33. Roychoudhury, A., Ghosh, S., Paul, S., Mazumdar, S., Das, G., & Das, S. (2016). Pre-treatment of seeds with salicylic acid attenuates cadmium chloride-induced oxidative damages in the seedlings of mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek). *Acta physiologiae plantarum*, 38, 1-18.
34. Namdjoyan, S., Kermanian, H., Abolhasani Soorki, A., Modarres Tabatabaei, S., & Elyasi, N. (2017). Interactive effects of salicylic acid and nitric oxide in alleviating zinc toxicity of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Ecotoxicology*, 26, 752-761.
35. Metwally, A., Finkemeier, I., Georgi, M., & Dietz, K. J. (2003). Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings. *Plant physiology*, 132 (1), 272-281.
36. Canakci, S., & Munzuroglu, O. (2000). Effects of sprayed acetylsalicylic acid application to the leaves of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and corn (*Zea mays* L.) seedlings on transpiration rate and weight changes. *Journal Institute Science*, 7, 83-92.
37. Rivas-San Vicente, M., & Plasencia, J. (2011). Salicylic acid beyond defence: its role in plant growth and development. *Journal of experimental botany*, 62 (10), 3321-3338.
38. Chen, Z., Chen, M., & Jiang, M. (2017). Hydrogen sulfide alleviates mercury toxicity by sequestering it in roots or regulating reactive oxygen species productions in rice seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 111, 179-192.
39. 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.

40. Zanganeh, R., Jamei, R., & Rahmani, F. (2020). Pre-sowing seed treatment with salicylic acid and sodium hydrosulfide confers Pb toxicity tolerance in maize (*Zea mays* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 206, 111392.
41. Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. *Circular. California agricultural experiment station*, 347 (2nd edit).
42. Genty, B., Briantais, J. M., & Baker, N. R. (1989). The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 990 (1), 87-92.
43. Sairam, R. K., & Srivastava, G. C. (2002). Changes in antioxidant activity in sub-cellular fractions of tolerant and susceptible wheat genotypes in response to long term salt stress. *Plant Science*, 162 (6), 897-904.
44. Bates, L. S., Waldren, R. A., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and soil*, 39, 205-207.
45. Sairam, R. K., Rao, K. V., & Srivastava, G. C. (2002). Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration. *Plant science*, 163 (5), 1037-1046.
46. Lichtenthaler, H. K., & Wellburn, A. R. (1985). Determination of total carotenoids and chlorophyll A and B of leaf in different solvents. *Biochem. Soc. Trans*, 11, 59-592.
47. Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical biochemistry*, 72 (1-2), 248-254.
48. Aebi, H. (1984). Catalase in Vitro. 105, 121-126. *Methods in Enzymology*, Academic Press, San Diego, US.
49. Chance, B., & Maehly, A. C. (1955). Assay of catalases and peroxidases. *Methods in Enzymology*, 2, 764-775.
50. Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and cell physiology*, 22 (5), 867-880.
51. Sekabira, K., Oryem-Origa, H., Mutumba, G. B., & Basamba, T. A. (2011). Heavy metal phytoremediation by *Commelina benghalensis* (L) and *Cynodon dactylon* (L) growing in urban stream sediments.
52. Pál, M. (2002). Effect of salicylic acid during heavy metal stress. *Acta Biologica Szegediensis*, 46(3-4), 119-120.
53. Reddy, K. R., Hodges, H. F., & McKinion, J. M. (1997). Modeling temperature effects on cotton internode and leaf growth. *Crop Science*, 37 (2), 503-509.
54. Hayat, S., Fariduddin, Q., Ali, B., & Ahmad, A. (2005). Effect of salicylic acid on growth and enzyme activities of wheat seedlings. *Acta Agronomica Hungarica*, 53 (4), 433-437.
55. Babu, N. G., Sarma, P. A., Attitalla, I. H., & Murthy, S. D. S. (2010). Effect of selected heavy metal ions on the photosynthetic electron transport and energy transfer in the thylakoid membrane of the cyanobacterium, *Spirulina platensis*. *Acad J. Plant Sci*. 3 (1), 46-49.
56. Azooz, M. M. (2009). Salt stress mitigation by seed priming with salicylic acid in two faba bean genotypes differing in salt tolerance. *Int. J. Agric. Biol.* 11 (4), 343-350.
57. Costa, M. L., Civello, P. M., Chaves, A. R., & Martínez, G. A. (2005). Effect of ethephon and 6-benzylaminopurine on chlorophyll degrading enzymes and a peroxidase-linked chlorophyll bleaching during post-harvest senescence of broccoli (*Brassica oleracea* L.) at 20 C. *Postharvest Biology and Technology*, 35 (2), 191-199.
58. Sresty, T. V. S., & Rao, K. M. (1999). Ultrastructural alterations in response to zinc and nickel stress in the root cells of pigeonpea. *Environmental and Experimental Botany*, 41 (1), 3-13.

59. Khodary, S. E. A. (2004). Effect of salicylic acid on the growth, photosynthesis and carbohydrate metabolism in salt stressed maize plants. *Int. J. Agric. Biol.* 6 (1), 5-8.
60. Frost, H. L., & Ketchum Jr, L. H. (2000). Trace metal concentration in durum wheat from application of sewage sludge and commercial fertilizer. *Advances in Environmental Research*, 4 (4), 347-355.
61. Devkota, B., & Schmidt, G. H. (2000). Accumulation of heavy metals in food plants and grasshoppers from the Taigetos Mountains, Greece. *Agriculture, ecosystems & environment*, 78 (1), 85-91.
62. Singh, R., Tripathi, R. D., Dwivedi, S., Kumar, A., Trivedi, P. K., & Chakrabarty, D. (2010). Lead bioaccumulation potential of an aquatic macrophyte *Najas indica* are related to antioxidant system. *Bioresource technology*, 101 (9), 3025-3032.
63. Andra, S. S., Datta, R., Sarkar, D., Makris, K. C., Mullens, C. P., Sahi, S. V., & Bach, S. B. (2010). Synthesis of phytochelatins in vetiver grass upon lead exposure in the presence of phosphorus. *Plant and soil*, 326, 171-185.
64. Ventrella, A., Catucci, L., Piletska, E., Piletsky, S., & Agostiano, A. (2009). Interactions between heavy metals and photosynthetic materials studied by optical techniques. *Bioelectrochemistry*, 77 (1), 19-25.
65. Pallas Jr, J. E., Michel, B. E., & Harris, D. G. (1967). Photosynthesis, transpiration, leaf temperature, and stomatal activity of cotton plants under varying water potentials. *Plant Physiology*, 42 (1), 76-88.
66. Yamane, Y., Kashino, Y., Koike, H., & Satoh, K. (1997). Increases in the fluorescence F_o level and reversible inhibition of photosystem II reaction center by high-temperature treatments in higher plants. *Photosynthesis Research*, 52, 57-64.
67. Schreiber, U. (1998). Chlorophyll fluorescence as a diagnostic tool: basics and some aspects of practical relevance. *Photosynthesis*, 320-336.
68. Muller, P., Li, X. P., & Niyogi, K. K. (2001). Non-photochemical quenching. A response to excess light energy. *Plant physiology*, 125 (4), 1558-1566.
69. Reddy, A. M., Kumar, S. G., Jyothsnakumari, G., Thimmanaik, S., & Sudhakar, C. (2005). Lead induced changes in antioxidant metabolism of horsegram (*Macrotyloma uniflorum* (Lam.) Verdc.) and bengalgram (*Cicer arietinum* L.). *Chemosphere*, 60 (1), 97-104.
70. Gh, M. (2016). The effect of different concentrations of lead on some physiological parameters in two populations of Harmal (*Peganum harmala* L.). *Cell and Tissue Journal*, 6 (4), 543-555.
71. Siripornadulsil, S., Traina, S., Verma, D. P. S., & Sayre, R. T. (2002). Molecular mechanisms of proline-mediated tolerance to toxic heavy metals in transgenic microalgae. *The Plant Cell*, 14 (11), 2837-2847.
72. Schaller, H. (2003). The role of sterols in plant growth and development. *Progress in lipid research*, 42 (3), 163-175.
73. Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S., & Pessarakli, M. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of botany*, 2012.
74. Di Toppi, L. S., & Gabbriellini, R. (1999). Response to cadmium in higher plants. *Environmental and experimental botany*, 41 (2), 105-130.
75. Srivastava, S., Tripathi, R. D., & Dwivedi, U. N. (2004). Synthesis of phytochelatins and modulation of antioxidants in response to cadmium stress in *Cuscuta reflexa*—an angiospermic parasite. *Journal of plant physiology*, 161 (6), 665-674.
76. Knight, H., & Knight, M. R. (2001). Abiotic stress signalling pathways: specificity and cross-talk. *Trends in plant science*, 6 (6), 262-267.
77. Esfandiari, E., Shakiba, M. R., Mahboob, S. A., Alyari, H., & Shahabivand, S. (2008). The effect of water stress on the antioxidant content,

- protective enzyme activities, proline content and lipid peroxidation in wheat seedling. *Pakistan journal of biological sciences: PJBS*, 11 (15), 1916-1922.
78. Mazarie, A., Mousavi-nik, S. M., Ghanbari, A., & Fahmideh, L. (2019). Effect of titanium dioxide spraying on physiological characteristics of sage (*Salvia officinalis* L.) under water stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12 (2), 539-553.
79. Alloway, B. J. (1995). Soil processes and the behaviour of metals. *Heavy metals in soils*, 13, 3488.
80. Vecera, Z., Mikuska, P., Zdráhal, Z., Docekal, B., Buckova, M., Tynova, Z., Parizek, P., Mosna, J., & Marek, J. (1999). 4. Additional comments about trace elements in crop plants. *Seeds*, 394, 0-016.
81. Shiela, M., & Ross, M. (1996). Toxic metals in soils plant system. *John Wiley & sons, inc. newyork*.
82. Yaghoobzadeh., F. (2011). Phytoremediation Cadmium by maize (*Zea mays* L.). Master's thesis, Islamic Azad University of Saveh.
83. Kazemi, N., Khavari-Nejad, R. A., Fahimi, H., Saadatmand, S., & Nejad-Sattari, T. (2010). Effects of exogenous salicylic acid and nitric oxide on lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in leaves of *Brassica napus* L. under nickel stress. *Scientia Horticulturae*, 126 (3), 402-407.