

Improvement of Physiological and Biochemical Traits of Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) by Application of Biochar and Salicylic Acid in Soils Contaminated with Lead Heavy Metal

Seyedeh Asieh Jalali¹, Faezeh Zaefarian^{2,*}, Roghayeh Hasanpour³, Arastoo Abbasian²

Received: 07 August 2021 Accepted: 22 January 2022

1-MSc Student of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

2-Assoc. Prof., and Assist. Prof., of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

3-Ph.D Graduated Student of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

*Corresponding Author Email: fa_zaefarian@yahoo.com

Abstract

Background and objectives: Lead is one of the most important toxins for plants, which negatively affects the growth of plants. Therefore this study was to investigate the effect of biochar as soil organic modifier and salicylic acid as organic acid on sorghum (*Sorghum bicolor* var.Speed feed) physiological and biochemical changes under lead stress conditions.

Materials and methods: The experiment was carried out as a factorial experiment in a completely randomized design with 4 replications in the greenhouse of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University in 2019. The treatments of this experiment include five levels of lead (0, 400, 800, 1200 and 1600 mg of lead per kg of soil from lead nitrate source), two levels of biochar (no consumption and consumption of biochar 20 g of biochar per kg of soil) and two levels of acid salicylic acid (including non-foliar and 2 mM salicylic acid foliar). The measured traits included chlorophyll a, b, total chlorophyll, a/b, carotenoids, phenol, flavonoids, antioxidant activity, electrolyte leakage, relative leaf water content, proline, Pb concentration in shoot, Pb concentration in root bioconcentration factor and shoot dry weight.

Results: The results showed that consumption of biochar and salicylic acid increased chlorophyll a by 5.25 and 4.81%, respectively. Consumption of salicylic acid increased by 4.20% chlorophyll a+b compared to the control. Also, plants treated with biochar showed 7.35% increament in chlorophyll a/b ratio compared to control plants. The highest amount of carotenoids was obtained in the combined treatment of biochar consumption and salicylic acid foliar application. Phenol levels increased with increasing lead levels, which was greater in plants sprayed with salicylic acid. Also, the amount of flavonoids increased by 10.57% under the influence of biochar consumption. The highest antioxidant capacity (36.55) was obtained with combined application of biochar and salicylic acid at a concentration of 400 mg of lead. The interaction of biochar and salicylic acid increased proline, and this increase was 88.48% compared to the control. The results also showed that salicylic acid reduced the percentage of electrolyte leakage in lead-treated plants, while, lead consumption reduced the relative leaf water content. The highest Pb concentration in shoot and root (671.17 and 398.70 mg Cd per kg of dry matter, respectively) and root bioaccumulation factor (3.65) were obtained in the combined treatment use of biochar and salicylic acid at 1600 mg Pb kg⁻¹ soil. Plants treated with biochar showed significantly higher shoot dry weight under lead stress than no consumption of biochar and foliar application of salicylic acid also increased the dry weight of sorghum shoots.

Conclusion: The results of the present study show a positive and significant of lead stress on the growth characteristics of sorghum as well as positive and significant effects of salicylic acid and biochar as moderators and reduce the negative effects of lead toxicity on the properties of this plant. Considering that biochar and salicylic acid increase the concentration of lead in plant organs and the bioconcentration factor of roots; therefore, the use of these cheap and available materials in the soil can be a suitable and cost-effective method to eliminate or reduce soil contamination to increase the metabolic activity of sorghum plant, improve plant resistance to lead stress.

Keywords: Antioxidant Capacity, Electrolyte Leakage, Heavy Metals, Proline

بهبود صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* L.) با کاربرد بیوچار و سالیسیلیک اسید در خاک آلوده به فلز سنگین سرب

سیده آسیه جلالی^۱، فائزه زعفریان^{۲*}، رقیه حسن‌پور^۳، ارسطو عباسیان^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲- دانشیار و استادیار، گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۳- دانش آموخته دکتری گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

*مسئول مکاتبه: Email: fa_zaefarian@yahoo.com

چکیده

سابقه و هدف: سرب یکی از مهمترین عناصر غیرضروری و سمی برای گیاه می‌باشد که بر رشد گیاهان تاثیر منفی می‌گذارد. لذا پژوهش حاضر به منظور بررسی اثر بیوچار به عنوان اصلاح‌کننده آلی خاک و سالیسیلیک اسید به عنوان اسید آلی بر تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی سورگوم در شرایط تنش سرب انجام شد.

مواد و روش‌ها: این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی با ۴ تکرار در گلخانه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در سال ۱۳۹۸ انجام شد. تیمارهای این آزمایش شامل پنج سطح سرب (۰، ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک از منبع سرب نیترات)، دو سطح بیوچار (عدم مصرف و مصرف ۲۰ گرم بیوچار به ازای هر کیلوگرم خاک) و دو سطح سالیسیلیک اسید (شامل عدم محلول‌پاشی و محلول‌پاشی ۲ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید) بود. صفات اندازه‌گیری شده شامل کلروفیل *a*، *b*، کلروفیل کل، نسبت کلروفیل *a/b*، کارتنوئید، فنل، فلاونوئید، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، نشت الکترولیت، مقدار نسبی آب برگ، پرولین، غلظت سرب در شاخساره، غلظت سرب در ریشه و فاکتور تجمع زیستی ریشه بود.

یافته‌ها: نتایج نشان دادند که مصرف بیوچار و سالیسیلیک اسید به ترتیب باعث افزایش ۵/۲۵ و ۴/۸۱ درصدی کلروفیل *a* شد. مصرف سالیسیلیک اسید سبب افزایش ۴/۲۰ درصد کلروفیل *a+b* نسبت به شاهد شد. همچنین، نسبت کلروفیل *a/b* در بوته‌هایی که با بیوچار تیمار شدند، ۷/۳۵ درصد در مقایسه با بوته‌های شاهد افزایش نشان داد. بیشترین میزان کاروتنوئید در تیمار تلفیقی مصرف بیوچار و محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید به دست آمد. با افزایش سطوح سرب میزان فنل افزایش یافت که این افزایش در گیاهانی که با سالیسیلیک اسید محلول‌پاشی شده بودند بیشتر بود. همچنین، میزان فلاونوئید تحت تاثیر مصرف بیوچار ۱۰/۵۷ درصد افزایش نشان داد. بیشترین ظرفیت آنتی‌اکسیدان (۳۶/۵۵) با مصرف توام بیوچار و سالیسیلیک اسید در غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم سرب به دست آمد. همچنین مصرف توام بیوچار و سالیسیلیک اسید باعث افزایش ۸۸/۴۸ درصدی پرولین نسبت به شاهد بود. نتایج این تحقیق نشان داد که سالیسیلیک اسید درصد نشت الکترولیت را در گیاهان تیمار شده با سرب کاهش معنی‌دار داد، درحالیکه مصرف سرب سبب کاهش مقدار نسبی آب برگ شد. شایان ذکر است که بیشترین غلظت سرب در شاخساره و ریشه (به ترتیب ۶۷۱/۱۷ و ۳۹۸/۷۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم ماده خشک) و فاکتور تجمع زیستی ریشه (۳/۶۵) در تیمار مصرف توام بیوچار و سالیسیلیک اسید در ۱۶۰۰

میلی‌گرم سرب خاک به دست آمد. علاوه بر این، گیاهانی که با بیوپچار تیمار شدند نسبت به عدم استفاده از بیوپچار به‌طور معنی‌داری وزن خشک شاخساره بیشتری تحت شرایط تنش سرب نشان دادند و محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید نیز موجب افزایش وزن خشک شاخساره گیاه سورگوم شد.

نتیجه‌گیری: نتایج تحقیق حاضر بیانگر تأثیر مثبت و معنی‌دار سالیسیلیک اسید و بیوپچار به‌عنوان تعدیل‌کننده و کاهش‌دهنده اثرهای منفی سمیت سرب بر ویژگی‌های این گیاه بود. با توجه به این که بیوپچار و سالیسیلیک اسید باعث افزایش غلظت سرب در اندام‌های گیاهی و فاکتور تجمع زیستی ریشه می‌شوند؛ لذا استفاده از این مواد ارزان و قابل دسترس در خاک می‌تواند یک روش مناسب و مقرون به صرفه برای حذف یا کاهش آلودگی خاک بوده تا ضمن افزایش فعالیت‌های متابولیک گیاه سورگوم، مقاومت گیاه را در برابر تنش سرب بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: پرولین، فلزهای سنگین، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، نشت الکترولیت

مقدمه

مشاهده و گزارش شده است. بنابراین با توجه به اثرات نامطلوب این آلاینده‌ها، استفاده از یک روش سریع و ایمن برای حذف آن‌ها با حداقل هزینه و تأثیر بر محیط زیست ضروری است (خسروی و همکاران ۲۰۰۹).

یکی از روش‌های مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزهای سنگین، گیاه‌پالایی می‌باشد (دنگ و سائو ۲۰۱۶) که در آن سازگاری مقاومتی برخی از گیاهان امکان ذخیره غلظت‌های بالایی از فلزهای سنگین را در بافت‌های خود بدون بروز علایم مسمومیت داشته که موجب حذف آن‌ها و احیاء دوباره محیط زیست می‌شوند (تشکری و همکاران، ۲۰۱۷). یک گونه گیاهی مناسب جهت گیاه‌پالایی باید شامل ویژگی‌هایی چون رشد سریع و فراوان، پراکندگی زیاد در منطقه مورد مطالعه و توان بالقوه جهت جذب و تجمع فلزهای سنگین باشد (حمیدیان و همکاران ۲۰۱۳؛ حسن‌پور و همکاران، ۲۰۱۹). بنابراین سورگوم علوفه‌ای با نام علمی *Sorghum bicolor* L. گیاهی از تیره غلات با زیست توده بالا، ظرفیت تولید بالا و سازگار با شرایط اقلیمی مختلف می‌باشد (فومن و همکاران ۲۰۰۶). این گیاه به دلیل داشتن سیستم ریشه‌ای گسترده و زیست توده بالا، می‌تواند در خاک‌های آلوده به‌عنوان گزینه‌ای مناسب در امر گیاه‌پالایی محسوب شود. طی سال‌های اخیر در جهان تحقیقات گسترده‌ای در زمینه گیاه‌پالایی روی این گیاه صورت گرفته است (ژانگ و همکاران ۲۰۰۹). این محصول به دلیل نیازهای

آلودگی فلزهای سنگین در خاک ممکن است به‌طور طبیعی و یا به‌خاطر فعالیت‌های انسانی مانند صنایع فلزی، کودهای آلوده، علف‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها و آبیاری با آب‌های زیرزمینی آلوده اتفاق بیافتد (دوربیل و همکاران ۲۰۰۷). در سال‌های اخیر آلودگی فلزات سنگین در خاک شدیداً مورد توجه قرار گرفته است؛ چرا که وجود این عناصر در اتمسفر، خاک و آب حتی در مقادیر بسیار کم می‌تواند مشکلاتی را برای موجودات به وجود آورد (بیریا و همکاران ۲۰۱۷)، بطوریکه تأثیر سوء آن بر محیط زیست باعث نگرانی بسیاری از دانشمندان، سیاستمداران و عموم مردم گردیده است (آل‌چمی و همکاران ۲۰۱۵).

از مهم‌ترین فلزهای سنگین می‌توان به مس، جیوه، سرب و روی اشاره نمود. سرب از عناصر غیرضروری برای گیاه و از مهم‌ترین آلاینده‌ها می‌باشد که وجود آن در محیط کشت تأثیر منفی بر سرعت جوانه‌زنی، وضعیت آب در گیاه، وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاه، فتوسنتز و فعالیت‌های آنزیمی دارد (وجودی مهربانی و همکاران ۲۰۱۷) و کاهش جذب برخی عناصر مانند آهن و در نتیجه کلروزه شدن برگ‌ها را به همراه دارد (خداوردی لو و همکاران ۲۰۱۳). در مطالعاتی در همین رابطه اثرات سمیت سرب در گیاهانی مانند ذرت (*Zea mays* L.) (لین و همکاران ۲۰۰۹) و کنگر فرنگی (*Cynara scolymus* L.) (کریمی و همکاران ۲۰۱۵)

چون که پراکندگی فلزهای سنگین رو به افزایش است کاربرد بیوچار و سالیسیلیک اسید یکی از روش‌های ارزان و آسان برای بهبود رشد گیاهان محسوب می‌شوند، لذا، هدف از انجام این آزمایش بررسی اثر بیوچار و سالیسیلیک اسید برای حذف یا کاهش آلودگی خاک با توجه به تغییر ویژگی‌های فیزیولوژی و بیوشیمیایی گیاه سورگوم تحت آلودگی خاک به فلز سنگین سرب می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایش حاضر به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۴ تکرار در گلخانه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در اواخر بهار سال ۱۳۹۸ صورت گرفت. تیمارهای این آزمایش شامل سرب (۰، ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم از منبع سرب نیترات)، بیوچار (عدم مصرف و مصرف بیوچار ۲۰ گرم بیوچار به ازای هر کیلوگرم خاک) و سالیسیلیک اسید (شامل عدم محلول‌پاشی و محلول‌پاشی ۲ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید در اوایل رشد رویشی) بود. غلظت‌های مورد بررسی سرب با توجه به در نظر داشتن حد مجاز سرب در خاک (۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) (چن و همکاران ۲۰۰۳) در غلظت‌های چندین برابر سمی منطقه مورد در نظر گرفته شدند. بیوچار استفاده شده در این آزمایش از مواد اولیه سلولزی شامل بقایای درختان جنگلی از شرکت کربن اکتیو بشل تهیه شد، که مشخصات آن شامل مساحت سطح بر اساس استاندارد ASTM: ۹۵۰ تا ۱۱۰۰ متر مربع بر گرم، عدد متیلن بلو: ۲۵۰-۱۵۰ میلی‌گرم بر گرم، میزان رطوبت: ۴-۳ درصد، pH: ۸/۵، میزان خاکستر: ۵-۴ درصد، دانه‌بندی: ۰/۱ میلی‌متر و کمتر بود. غلظت بیوچار نیز بر اساس غلظت معمول در آزمایشات پیشین سایر محققین انتخاب شد (ابراهیم و همکاران ۲۰۱۹؛ احمد و همکاران ۲۰۱۶). برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۱ درج شده است.

ورودی نسبتاً کم، تحمل به خشکی و شوری، توانایی استفاده بهینه از آب و حفظ عملکرد بالا در دامنه وسیعی از خاک و شرایط محیطی یک محصول کاملاً سازگار با پتانسیل تولید انرژی زیستی محسوب می‌شود (پاناچی و بارتولینی ۲۰۱۸).

یکی از راهکارهای اصلاحی مناسب خاک جهت بهبود رشد گیاه استفاده از بیوچار می‌باشد (بی‌ریا و همکاران ۲۰۱۷). بیوچار ماده‌ای آلی غنی از کربن (چن و همکاران، ۲۰۱۸)، با تخلخل بالا است؛ که گروه‌های عاملی فراوانی داشته و در جذب سطحی فلزهای سنگین به‌ویژه در محیط‌های آبی بسیار مؤثر است. در پژوهشی محققین گزارش کردند که بیوچار منجر به کاهش ضریب انتقال و فاکتور تجمع زیستی کادمیم و سرب در گیاه ذرت گردید که نشان‌دهنده توان بیوچار در تثبیت و غیرقابل جذب کردن سرب و کادمیم در خاک بود (بی‌ریا و همکاران ۲۰۱۷). اما در اثر تیمار بیوچار، جعفری و همکاران (۲۰۱۷) به این نتیجه رسیدند که کاربرد مواد کمپوست زباله شهری و بیوچار باعث افزایش جذب فلزهای سنگین کادمیم، سرب، روی و نیکل در خاک‌های آلوده اطراف شهرک صنعتی البرز قزوین توسط گیاه *Bromus tementum* می‌شود.

سالیسیلیک اسید نیز به‌عنوان یکی از تنظیم‌کننده‌های رشد به افزایش کارآمدی گیاهان در گیاه‌پالایی کمک می‌کند (بقایی و عقیلی‌ظفری ۲۰۲۰). در واقع کاربرد خارجی تنظیم‌کننده‌های رشد ممکن است با تحریک رشد و کاهش تنش‌های زیستی و غیرزیستی موجب بهبود فرآیند گیاه‌پالایی شوند (کابلو کنجو و همکاران ۲۰۱۳). گزارش‌های متعددی مبنی بر استفاده از سالیسیلیک اسید در جهت کاهش عوارض ناشی از تجمع فلزات سنگین در گیاهان وجود دارد. به‌عنوان مثال کاربرد کادمیم، باعث کاهش وزن تر و خشک ریشه، طول ریشه و ساقه شد؛ ولی اسید سالیسیلیک این کاهش را در اجزاء گیاه بهبود و اثرات تنش را تخفیف داد (راو و همکاران، ۲۰۱۲). شفیق و همکاران (۲۰۱۷) به اثرات مثبت سالیسیلیک اسید در افزایش کارایی جذب و فاکتور غلظت نیکل در ریشه دست یافتند.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Pb	Cd	K	P	N	EC	pH	بافت خاک
	قابل جذب (mg.kg^{-1})			(%)	(dS.m^{-1})		
۶/۲۷۴	۰/۰۰۵	۲۶۶	۱۰	۰/۱۸	۱/۷۲۳	۷/۲۱	رسی

برای آبیاری گلدان‌ها، زمانی که گیاه نیاز به آب داشت؛ رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه به‌روش توزین به داخل زیرگلدانی اضافه می‌شد. یک ماه پس از کاشت، سالیسیلیک اسید بر شاخساره محلول‌پاشی شد. صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی مورد مطالعه حدود دو ماه بعد از کاشت در مرحله حداکثر رشد رویشی (قبل از گلدهی) اندازه‌گیری شدند.

برای اندازه‌گیری کلروفیل نمونه‌هایی از آخرین برگ گسترش یافته گیاه انتخاب گردید. سپس سنجش کلروفیل با روش پورا (۲۰۰۲) به‌وسیله دستگاه اسپکتوفتومتر مدل Analytik Jena-SPEKOL 1300 اندازه‌گیری و با استفاده از روابط زیر محاسبه شد.

$$\text{Chl a } (\mu\text{g.mL}^{-1}) = 16/72 A_{665.2} - 9.16 A_{652.4}$$

رابطه [۱]

$$\text{Chl b } (\mu\text{g.mL}^{-1}) = 34.09 A_{652.4} - 15.28 A_{665.2}$$

رابطه [۲]

$$\text{Chl a+b } (\mu\text{g.mL}^{-1}) = \text{Chl a} + \text{Chl b}$$

رابطه [۳]

$$\text{Chl a/b } (\mu\text{g.mL}^{-1}) = \frac{\text{Chl a}}{\text{Chl b}}$$

رابطه [۴]

$$\text{Carotenoid } (\mu\text{g.mL}^{-1}) = \frac{(1000A_{470} - 1.63\text{Chl a} - 104.96\text{Chl b})}{221}$$

رابطه [۵]

قرار داده شد و پس از خروج از آون توزین انجام شد و در نهایت مقدار نسبی آب برگ توسط رابطه زیر و بر حسب درصد محاسبه گردید (ریچی و نگوین ۱۹۹۰).

$$\text{RWC} = \frac{(\text{Fw} - \text{Dw})}{(\text{Tw} - \text{Dw})} \times 100 \quad \text{رابطه [۶]}$$

Fw: وزن تر برگ بلافاصله بعد از نمونه‌برداری، Dw: وزن خشک برگ بعد از قرار گرفتن در آون، Tw: وزن اشباع برگ بعد از قرار گرفتن در آب مقطر. به‌منظور اندازه‌گیری نشت الکتروولت ۱۰ عدد دیسک برگی به قطر ۰/۵ سانتی‌متر از آخرین برگ توسعه یافته تهیه و بلافاصله دوبار با آب مقطر شستشو و سپس در داخل ظروف درب‌دار پلاستیکی حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر قرار داده شد. پس از ۲۴ ساعت هدایت الکتریکی

برای هر گلدان مقدار ۴ کیلوگرم خاک از مزرعه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در نظر گرفته شد و بعد از هوا خشک شدن خاک، تیمار سرب و بیوپچار به گلدان‌های مورد نظر اضافه شدند و سپس با زیر و رو کردن خاک سعی شد تا به‌خوبی سرب و بیوپچار با خاک مخلوط شوند. همچنین به‌منظور آلوده‌سازی یکنواخت خاک، خاک گلدان‌ها به‌مدت ۲۰ روز چندین مرتبه مرطوب و خشک شدند تا به شرایط طبیعی نزدیک شوند. در ۲۹ خرداد تعداد ۵ بذر برای هر گلدان در نظر گرفته شد که پس از استقرار گیاه عمل تنک کردن صورت گرفت و در نهایت برای هر گلدان یک بوته باقی ماند. تفاوت در نیترات تیمارهای آلوده و شاهد از طریق کود اوره محاسبه و اعمال شد. در طول دوره رشد

در این رابطه $A_{665.2}$ ، $A_{652.4}$ و A_{470} میزان نور جذبی محلول در طول موج‌های ۶۶۵/۲، ۶۵۲/۴ و ۴۷۰ نانومتر می‌باشند. جهت اندازه‌گیری مقدار نسبی آب برگ (RWC) نیز از آخرین برگ توسعه یافته بوته نمونه تهیه شد و پس از حذف بافت‌های مرده و خشک شده، وزن تر آن‌ها با ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد (Fw). آب مقطر درون بشرها اضافه شد و نمونه‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت نگه‌داری شد تا برگ‌ها آماس پیدا کنند. برای محاسبه وزن آماس، برگ‌ها از بشر خارج و رطوبت اضافی با دستمال کاغذی گرفته شد و بعد نمونه‌ها وزن شدند (Tw). سپس نمونه‌ها در پاکت در آون ۷۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۲۴ ساعت یا تا زمان ثابت شدن وزن

هیدرین و ۲ میلی‌لیتر سالیسیلیک اسید گلیسین مخلوط و به مدت یک ساعت در حمام آب ۱۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفت. مخلوط واکنش با ۴ میلی‌لیتر تولوئن جدا شده و در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد. نهایتاً با استفاده از منحنی استاندارد، مقدار پرولین در گرم وزن تر برگ محاسبه گردید.

پس از برداشت گیاهان در مرحله حداکثر رشد رویشی، اندازه‌گیری وزن خشک شاخساره، غلظت سرب در شاخساره و ریشه انجام شد. به این صورت که ابتدا ۰/۵ گرم از نمونه‌های پودر شده در ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ به مدت یک شبانه روز قرار داده شد تا نمونه گیاهی به خوبی در اسید هضم شود. سپس محلول حاصل در دمای ۸۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت حرارت داده شد. و پس از صاف کردن عصاره با کمک کاغذ صافی، حجم محلول به ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. غلظت سرب موجود در نمونه‌های گیاهی با دستگاه جذب اتمی قرائت و مقدار قابل جذب آن محاسبه شد (وودیز جونیور و همکاران ۱۹۷۷). غلظت سرب قابل جذب خاک با روش لیندسی و نورول (۱۹۷۸) تعیین شد و با استفاده از غلظت سرب قابل جذب خاک، فاکتور تجمع زیستی ریشه از طریق رابطه ۸، محاسبه شد (ما و همکاران ۲۰۰۱).

$$\text{رابطه [۸]} = \frac{\text{غلظت فلز سرب در ریشه (mg.kg}^{-1}\text{)}}{\text{غلظت فلز سرب قابل جذب خاک (mg.kg}^{-1}\text{)}} = \text{فاکتور تجمع زیستی ریشه}$$

در این روابط a: عرض از مبدا در سطح بدون تنش (غلظت صفر تیمار سرب)، b_1 و b_2 : شیب تغییرات مؤلفه به ترتیب در مرحله ۱ و ۲ و x_0 : نقطه چرخش بین دو مرحله می‌باشد.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس داده‌های به دست آمده از آزمایش نشان داد که تیمار سرب بر میزان کلروفیل a، کلروفیل b، مجموع کلروفیل a+b، نسبت کلروفیل a/b و کاروتنوئید تأثیر معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد داشت (جدول

محلول (C_1) اندازه‌گیری گردید. پس از آن، ظروف حاوی دیسک‌های برگی، به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس بن‌ماری شده و پس از خنک شدن در دمای اتاق، مجدداً هدایت الکتریکی محلول (C_2) اندازه‌گیری شد. میزان نشت الکترولیت از غشاءها بر اساس رابطه زیر محاسبه گردید (لوتوس و همکاران ۱۹۹۵).

$$\text{رابطه [۷]} = \frac{C_1}{C_2} \times 100 = \text{نشت الکترولیت غشا (\%)}$$

مقدار ترکیبات فنل کل با روش فولین سیکالتو (مک‌دولاند ۲۰۰۱) محاسبه و برای تعیین فلاونوئید از روش رنگ‌سنجی کلرید آلومینیوم استفاده گردید (چانگ و همکاران ۲۰۰۲). ظرفیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌ها با استفاده از روش اندازه‌گیری کاهش ظرفیت رادیکالی ۲-دیفنیل-۱-پیکریل هیدرازیل (DPPH) (سانچز-مورنو و همکاران ۱۹۹۹) مورد ارزیابی قرار گرفت. برای استخراج و سنجش پرولین از روش نین هیدین (بیتس و همکاران ۱۹۷۳) استفاده گردید. به این منظور ۰/۵ گرم از بافت تر برگ در ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوسالیسیلیک ۳ درصد کاملاً ساییده شد تا همگن شود و پس از سانتریفیوژ با سرعت ۱۵۰۰۰ دور به مدت ۱۰ دقیقه، ۲ میلی‌لیتر از این محلول با ۲ میلی‌لیتر از معرف نین

در نهایت تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS و کمی‌سازی اثر تنش سرب از طریق تجزیه رگرسیونی و برازش معادله خطی یک تکه (رابطه ۹) و دوتکه‌ای (رابطه ۱۰) صورت گرفت و برای رسم منحنی‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده شد. همچنین از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد جهت مقایسه میانگین‌ها استفاده شد.

$$\text{رابطه [۹]} \quad y = b_1x + a$$

$$\text{رابطه [۱۰]} \quad y = b_1x + a \quad \text{if } x \leq x_0$$

$$y = (b_1x_0 + a) + b_2(x - x_0) \quad \text{if } x > x_0$$

و سالیسیلیک اسید بر میزان کلروفیل b معنی‌دار شد (جدول ۲). همچنین اثر متقابل تیمار بیوچار و سالیسیلیک اسید در میزان کاروتنوئید در سطح احتمال پنج درصد اثر معنی‌داری داشت (جدول ۲).

۲). اثر ساده بیوچار و سالیسیلیک اسید بر میزان کلروفیل a در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. اما مجموع کلروفیل a+b تحت تاثیر اثر ساده سالیسیلیک اسید و نسبت کلروفیل a/b تحت اثر ساده بیوچار قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده برهمکنش تیمار سرب

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر رنگیزه‌های فتوسنتزی و ترکیبات آنتی‌اکسیدان غیر آنزیمی گیاه

سورگوم

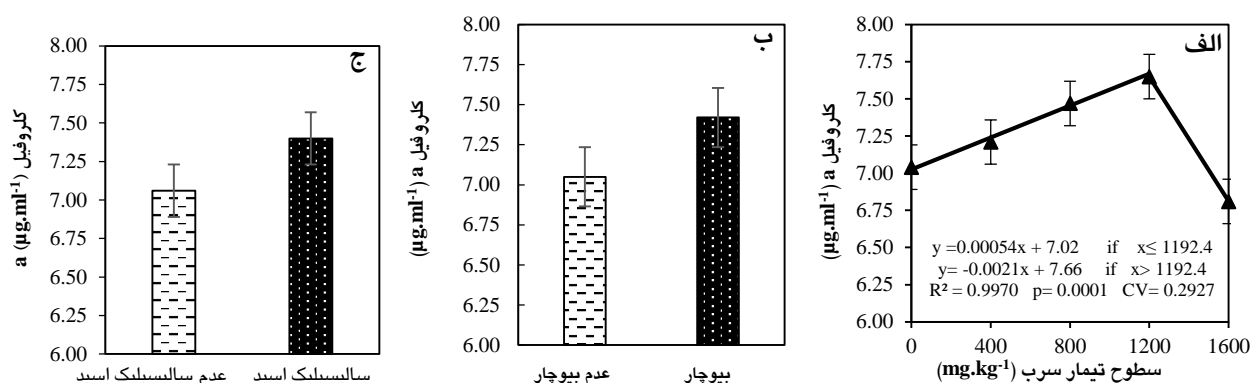
منابع تغییر	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	مجموع کلروفیل a+b	نسبت کلروفیل a/b	کاروتنوئید	فنل	فلاونوئید	ظرفیت آنتی‌اکسیدانی
سرب	۴	۱/۷۹**	۲/۲۲**	۴/۲۰**	۰/۲۴**	۰/۷۵**	۲۳۳/۷۳**	۵۷/۷۹**	۸/۷۴**
بیوچار	۱	۲/۶۴*	۰/۱۹ ^{NS}	۱/۴۱ ^{NS}	۰/۲۱**	۰/۱۲ ^{NS}	۱۵۱/۳۰ ^{NS}	۱۶۰/۰۶**	۸۴/۰۰**
سالیسیلیک اسید	۱	۲/۳۱*	۰/۵۸ ^{NS}	۵/۲۱*	۰/۰۱ ^{NS}	۰/۰۳ ^{NS}	۲۵۰۸/۱۳**	۱۵۸/۲۵**	۹۱/۸۵**
سرب×بیوچار	۴	۰/۶۹ ^{NS}	۰/۱۶ ^{NS}	۱/۲۸ ^{NS}	۰/۰۲ ^{NS}	۰/۰۷ ^{NS}	۱۸/۲۲ ^{NS}	۱۹/۲۱ ^{NS}	۳۱/۸۷**
سرب×سالیسیلیک اسید	۴	۰/۳۴ ^{NS}	۰/۶۵**	۱/۶۵ ^{NS}	۰/۰۲ ^{NS}	۰/۱۳ ^{NS}	۸۱/۵۸**	۸۶/۰۳**	۳۹/۳۳**
بیوچار×سالیسیلیک اسید	۱	۰/۰۲ ^{NS}	۰/۰۸ ^{NS}	۰/۱۹ ^{NS}	۰/۰۱ ^{NS}	۰/۰۲۶*	۱۹/۸۴ ^{NS}	۲/۷۳ ^{NS}	۰/۱۵ ^{NS}
سرب×بیوچار×سالیسیلیک اسید	۴	۰/۰۹ ^{NS}	۰/۲۸ ^{NS}	۰/۴۹ ^{NS}	۰/۰۲ ^{NS}	۰/۰۹ ^{NS}	۱۴/۹۱ ^{NS}	۱۳/۶۸ ^{NS}	۱۴/۵۴*
خطای آزمایش	۶۰	۰/۴۰	۰/۱۶	۰/۸۷	۰/۰۱	۰/۰۵	۸/۱۲	۹/۴۹	۴/۸۵
ضریب تغییرات (%)		۸/۷۱	۷/۷۳	۷/۵۱	۷/۲۹	۸/۳۱	۱۰/۳۱	۱۰/۹۲	۷/۲۴

*, **, NS: به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و عدم معنی‌داری می‌باشد.

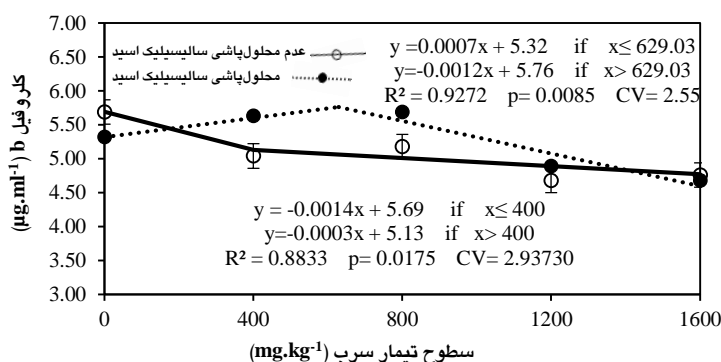
افزایش ۴/۸۱ درصدی کلروفیل a نسبت به شاهد شد (شکل ۱-ج).

روند تغییرات کلروفیل b با محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید به صورت دو تکه‌ای بود (شکل ۲). محلول‌پاشی با افزایش کلروفیل b با شیب ۰/۰۰۰۷ واحد شد و در ادامه با شیب ۰/۰۰۱۲- واحد کاهش یافت. عدم محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید در غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک باعث کاهش کلروفیل b با شیب ۰/۰۰۱۴- واحد شد و در ادامه نیز با شیب ۰/۰۰۰۳- واحد کاهش یافت (شکل ۲).

روند تغییرات کلروفیل a در برابر افزایش غلظت سرب خاک از نوع غیرخطی و به صورت دو تکه‌ای بود (شکل ۱-الف). کلروفیل a از سطح صفر تیمار سرب تا غلظت ۱۱۹۲/۴ میلی‌گرم سرب با شیب ۰/۰۰۰۵۴ افزایش یافت و سپس از غلظت ۱۱۹۲/۴ تا ۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب، با شیب ۰/۰۰۲۱- کاهش نشان داد؛ به گونه‌ای که در بالاترین سطح تیمار سرب نسبت به سطح صفر آن حدود ۳/۲۷ درصد کاهش یافت (شکل ۱-الف). همچنین نتایج پژوهش حاضر نشان داد بیوچار سبب افزایش ۵/۲۵ درصدی کلروفیل a نسبت به شاهد شد (شکل ۱-ب). علاوه بر این، مصرف سالیسیلیک اسید نیز سبب



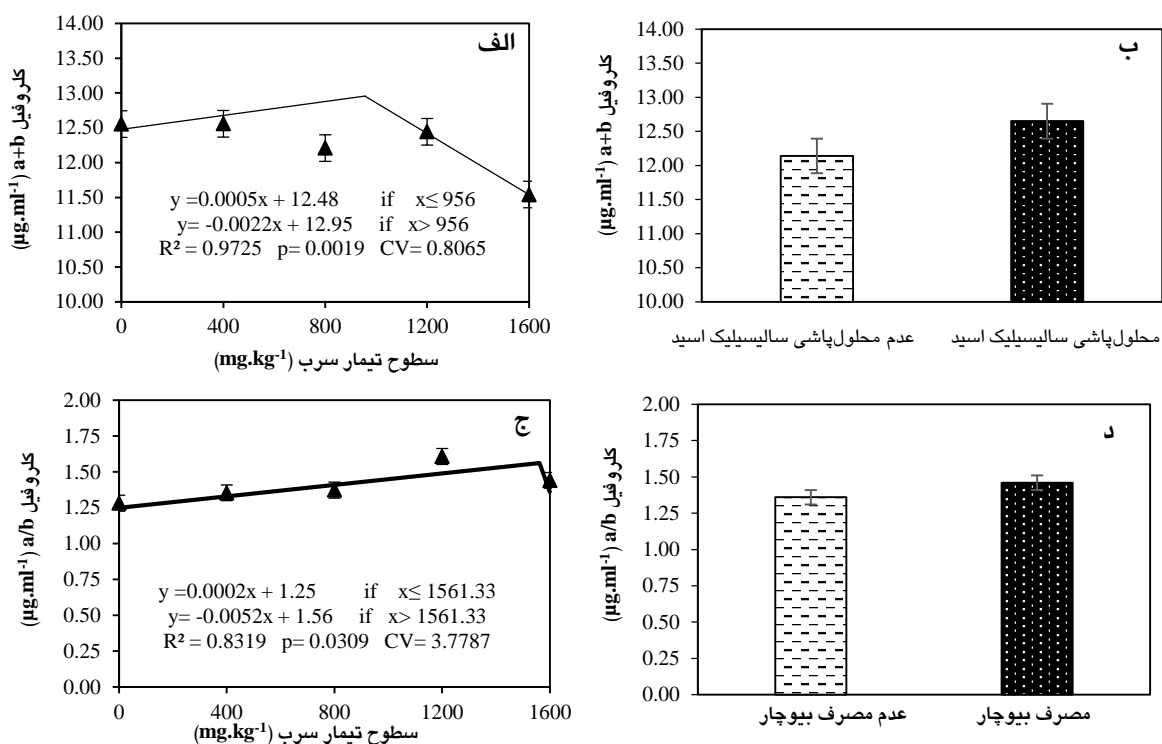
شکل ۱- روند تغییرات کلروفیل a سورگوم در افزایش آلودگی سرب (الف) و اثر ساده بیوچار و سالیسیلیک اسید بر میزان کلروفیل a سورگوم تحت تنش سرب (ب و ج)



شکل ۲- برهمکنش اثر سرب و سالیسیلیک اسید بر روند تغییرات میزان کلروفیل b سورگوم در پاسخ به افزایش آلودگی سرب

با توجه به شکل ۳- ج روند تغییرات کلروفیل a/b در برابر افزایش غلظت سرب خاک از نوع غیرخطی و به صورت دو تکه‌ای بود (شکل ۳- الف). کلروفیل a+b از سطح صفر تیمار سرب تا غلظت ۹۵۶ میلی‌گرم سرب با شیب ۰/۰۰۰۵ افزایش یافت و سپس از غلظت ۹۵۶ تا ۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب، با شیب ۰/۰۰۲۲- کاهش نشان داد؛ به گونه‌ای که در بالاترین سطح تیمار سرب نسبت به سطح صفر آن حدود ۸/۰۵ درصد کاهش یافت (شکل ۳- الف). همچنین مصرف سالیسیلیک اسید سبب افزایش ۴/۲۰ درصد کلروفیل a+b نسبت به شاهد شد (شکل ۳- ب).

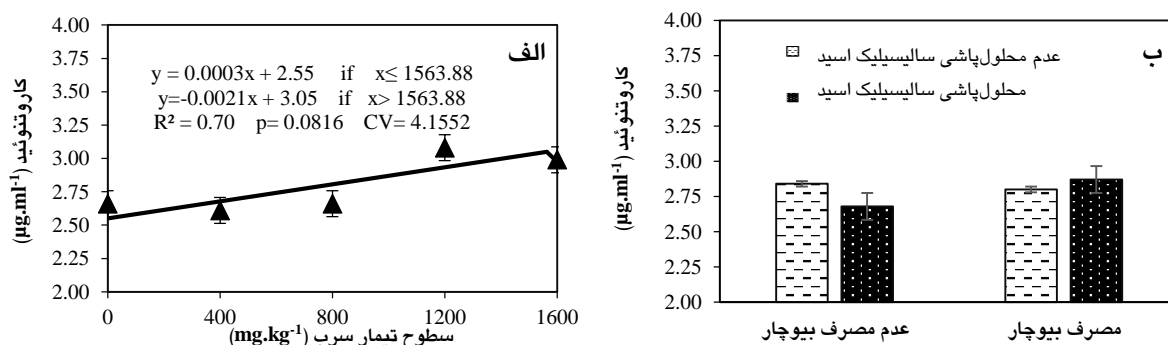
با توجه به شکل ۳- ج روند تغییرات کلروفیل a/b در برابر افزایش غلظت سرب خاک از نوع غیرخطی و به صورت دو تکه‌ای بود. از سطح صفر تیمار سرب تا غلظت ۱۵۶۱/۳۳ میلی‌گرم سرب با شیب ۰/۰۰۰۲ افزایش یافت و سپس در ادامه، با شیب ۰/۰۰۵۲- کاهش نشان داد. همچنین نتایج پژوهش حاضر نشان داد بوته‌هایی که با بیوچار تیمار شدند نسبت کلروفیل a/b، ۷/۳۵ درصد نسبت به بوته‌های شاهد (عدم مصرف بیوچار) افزایش نشان داد (شکل ۳- د).



شکل ۳- روند تغییرات کلروفیل a+b و a/b سورگوم در افزایش آلودگی سرب (الف و ج)، اثر ساده سالیسیلیک اسید بر میزان کلروفیل a+b (ب) و اثر ساده بیوجار بر نسبت کلروفیل a/b سورگوم تحت تنش سرب (د)

روند تغییرات کاروتنوئید در برابر افزایش غلظت سرب خاک از نوع غیرخطی و به‌صورت دو تکه‌ای بود (شکل ۴- الف). کاروتنوئید با افزایش آلودگی سرب از صفر تا ۱۵۶۳/۸۸ میلی‌گرم با شیب حدود ۰/۰۰۰۳ واحد افزایش یافت؛ سپس در ادامه، روند کاهشی با شیب

داشت (شکل ۴- الف). همچنین نتایج نشان داد بیشترین میزان کاروتنوئید در تیمار تلفیقی مصرف بیوجار و محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید بدست آمد (شکل ۴- ب).



شکل ۴- روند تغییرات کاروتنوئید سورگوم در افزایش آلودگی سرب (الف) و برهمکنش بیوجار و سالیسیلیک اسید بر میزان کاروتنوئید سورگوم در پاسخ به افزایش آلودگی سرب (ب)

کلروفیل b و کاروتنوئید در گیاه شلغم روغنی (*Brassica campestris* L.) پس از قرار گرفتن در معرض فلز

مشابه نتایج این مطالعه هوانگ و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهش خود مشاهده کردند میزان محتوای کلروفیل a،

۲۰۰۶). ازمیت و همکاران (۲۰۰۶) اظهار داشتند که سرب به علت جلوگیری از فعالیت فتوسیستم II و همچنین غیرفعال کردن آنزیم‌های غشایی موجب آسیب و گسستگی غشاء پلاسمایی شده و در نهایت سبب کاهش فتوسنتز و رشد گیاه می‌گردد.

بیوپچار می‌تواند از طریق محدودیت فراهمی زیستی فلزهای سنگین و کاهش دسترسی مستقیم فلزها برای ریشه‌ها و همچنین با مکانیسم جذب و تبادل کاتیونی، فلزهای سنگین را تثبیت کند. به همین ترتیب بیوپچار می‌تواند با تثبیت رنگدانه‌های مختلف مانند کلروفیل سرعت فتوسنتز را بهبود بخشد (مظهر و همکاران ۲۰۲۰). لذا افزودن بیوپچار به خاک به دلیل بهبود محتوای کلروفیل باعث افزایش عملکرد محصولات می‌شود (زهانگیر آلام و همکاران ۲۰۱۹).

ترکیبات فنلی، فلاونوئید و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی

تجزیه واریانس داده‌های به دست آمده از آزمایش نشان داد که غلظت تیمار سرب در میزان فنل و فلاونوئید و میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدان در سطح احتمال یک درصد اثر معنی‌داری داشت (جدول ۲). همچنین اثر تیمار بیوپچار در صفات فلاونوئید و میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدان در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. در حالی که اثر محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید بر تمامی ترکیبات آنتی‌اکسیدان غیرآنزیمی اندازگیری شده معنی‌دار شد (جدول ۲). برهمکنش تیمار سرب و بیوپچار در میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدان در سطح یک درصد معنی‌دار شد. همچنین برهمکنش تیمار سرب و سالیسیلیک اسید در تمامی صفات مذکور در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. اثر سه گانه سرب، بیوپچار و سالیسیلیک اسید در فعالیت آنتی‌اکسیدان در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۲).

نتایج رگرسیون فنل در برابر افزایش آلودگی سرب (صفر تا ۱۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) در هر دو سطح تیمار سالیسیلیک اسید از نوع غیرخطی و به صورت دو تکه‌ای بود (شکل ۵- الف). با محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید میزان فنل ابتدا با افزایش سرب از صفر تا ۴۰۰

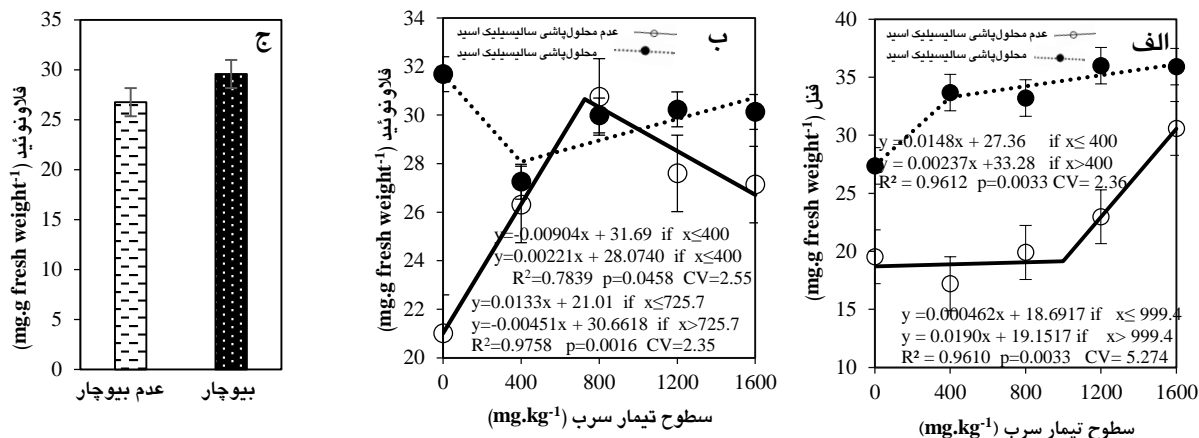
سنگین کادمیم به طور معنی‌داری کاهش یافتند. محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی در برگ‌های گیاه می‌تواند به عنوان شاخص ظرفیت فتوسنتز برای توصیف آسیب گیاهان در شرایط نامطلوب مورد استفاده قرار گیرد (گو و همکاران ۲۰۱۸). در شرایط تنش افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلز سبب تغییر بیوسنتز رنگدانه‌ها و تجزیه آن‌ها می‌شود (هاشم و همکاران ۲۰۱۶). علاوه بر این، کاهش تولید کلروفیل ممکن است به کاهش توسعه محتویات لاملا در پروتئین‌های کلروفیل نسبت داده شود (انجوم و همکاران ۲۰۱۷). همچنین، کاهش در میزان کلروفیل به اختلال در جذب و انتقال آهن نیز نسبت داده شد که منجر به کاهش تعداد لاملای گرانا و استروما در کلروپلاست می‌شود (موسی و همکاران ۲۰۱۶).

سالیسیلیک اسید ممکن است مستقیماً به عنوان یک آنتی‌اکسیدان، گونه‌های اکسیژن فعالی را که در تنش اکسیداتیو اعمال شده توسط فلزهای سنگین تولید شده‌اند، جاروب کند یا به طور غیرمستقیم واکنش احیایی را توسط فعال کردن پاسخ‌های آنتی‌اکسیدان تعدیل کند؛ به این ترتیب منجر به کاهش آسیب به رنگینه‌های فتوسنتزی می‌گردد؛ که با نتایج پوپووا و همکاران (۲۰۰۸) هم‌راستا می‌باشد. نتایج نشان داد به کارگیری بیوپچار سبب افزایش کلروفیل a می‌شود (شکل ۱- ب)؛ نتایج مطالعات متعددی حکایت از اثر مثبت کاربرد بیوپچار بر افزایش میزان کلروفیل و یا فتوسنتز داشته است که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد (وانگ و همکاران ۲۰۱۴؛ زو و همکاران ۲۰۱۵). کارتنوئید به دلیل عملکرد آنتی‌اکسیدانی نقش مهمی در پیشگیری تنش در گیاهان دارد و به عنوان مهارکننده‌های گیاهی برای کاهش سطوح بالای گونه‌های اکسیژن فعال معرفی شدند (دوگان ۲۰۱۹). کاهش محتوای کارتنوئید ممکن است مربوط به تولید شدید گونه‌های فعال اکسیژن باشد (نیکولیک و همکاران ۲۰۱۵).

به نظر می‌رسد یکی از دلایل کاهش میزان کلروفیل جانشین شدن فلزهای سنگین به جای Mg مرکزی کلروفیل باشد که این جانشینی سبب کاهش دریافت نور به وسیله کلروفیل شده و منجر به زردی برگ‌ها و در نهایت کاهش فتوسنتز می‌شود (شارما و همکاران

سالیسیلیک اسید از صفر تا ۹۹۹/۴ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک با شیب ملایم ۰/۰۰۰۴۶۲ افزایش و در ادامه با شیب ۰/۰۱۹۰ افزایش یافت (شکل ۵-الف).

میلی‌گرم با شیب حدود ۰/۰۱۴۸ افزایش یافت و در ادامه با افزایش غلظت سرب از ۴۰۰ تا ۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم، روند افزایشی با شیب ۰/۰۰۲۳۷ واحد داشت (شکل ۵-الف). میزان فنل در تیمار عدم‌مصرف



شکل ۵- برهمکنش اثر سرب و سالیسیلیک اسید بر روند تغییرات میزان فنل (الف) و فلاونوئید (ب) در پاسخ به افزایش آلودگی سرب و اثر ساده تیمار بیوچار بر میزان فلاونوئید سورگوم تحت تنش سرب (ج)

سرب، ظرفیت آنتی‌اکسیدان افزایش یافت؛ بیشترین میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدان (۳۶/۵۵) در تیمار مصرف توام بیوچار و سالیسیلیک اسید در غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم سرب به‌دست آمد که نسبت به شاهد آن (عدم مصرف بیوچار و عدم محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید در غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم سرب) ۴۷/۵۲ درصد افزایش یافت. همچنین جدول ۳ نشان می‌دهد با افزایش آلودگی سرب، و کاربرد بیوچار و محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید در غلظت صفر، ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۶۰۰ میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدان در گیاه سورگوم افزایش یافت.

نتایج این مطالعه نشان داد یک روند افزایشی در میزان فنل، فلاونوئید و ظرفیت آنتی‌اکسیدان با افزایش غلظت سرب وجود دارد (شکل ۵-الف و ب؛ جدول ۳). دوی چینمایی و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که در مقایسه با گیاهان شاهد محتوای فنلی موجود در گیاه جاتروفا کارکاس (*Jatropha curcas* L.) در اندام‌های گیاهان تیمار شده با سرب افزایش یافت. سینگ و پراساد (۲۰۱۶) در آزمایشی که روی گیاه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) تحت تنش کادمیم انجام

همچنین نتایج رگرسیونی فلاونوئید در برابر افزایش آلودگی سرب خاک (غلظت صفر تا ۱۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) در هر دو سطح تیمار سالیسیلیک اسید از نوع غیرخطی و به‌صورت دو تکه‌ای بود (شکل ۵-ب). با محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید میزان فلاونوئید ابتدا با افزایش سطوح تیمار سرب از صفر تا ۴۰۰ میلی‌گرم با شیب حدود ۰/۰۰۹۰۴- کاهش یافت و در ادامه با افزایش سطح سرب از ۴۰۰ تا ۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم، روند افزایشی با شیب ۰/۰۰۲۲۱ واحد داشت (شکل ۵-ب). میزان فلاونوئید در تیمار عدم‌مصرف سالیسیلیک اسید از صفر تا ۷۲۵/۷ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک با شیب ۰/۰۱۳۳ افزایش و در ادامه با شیب ۰/۰۰۴۵۱- کاهش یافت (شکل ۵-ب). همچنین گیاهانی که با بیوچار تیمار شدند نسبت به گیاهان شاهد (عدم مصرف بیوچار) فلاونوئید به‌میزان ۱۰/۵۷ درصد افزایش نشان دادند (شکل ۵-ج).

نتایج حاصل از مقایسه میانگین برد‌دهی اثر سرب در سطوح بیوچار و سالیسیلیک اسید بر میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدان (جدول ۳) نشان داد با افزایش آلودگی

کایسا و همکاران (۲۰۱۶)، استفاده از فلزهای سنگین، موجب افزایش ترکیبات فنلی برگ‌های ذرت نسبت به گروه‌های شاهد شد.

بالا بودن ترکیبات فنلی دلیل عمده بالا بودن فعالیت آنتی‌اکسیدانی بعضی از عصاره‌ها می‌باشد و شواهد موجود ارتباط مثبتی بین میزان ترکیبات فنلی و قدرت آنتی‌اکسیدانی بسیاری از گیاهان را نشان می‌دهد (حسینی و شیخی ۲۰۱۷؛ پاسکولن و همکاران ۲۰۱۴). همچنین نتایج گویای این مطلب بود که ترکیبات فنلی مانند فنل کل، فلاونوئید و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی تیمار شده با سالیسیلیک اسید نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش یافت. دلیل این افزایش می‌تواند تولید ROS توسط سالیسیلیک اسید با توجه به نقش آن در پیام‌رسانی در گیاه باشد (مالکی و احسانپور ۲۰۱۸). که با نتایج سایر محققین هم‌راستا می‌باشد (کومار و همکاران ۲۰۱۳، پرزبالیبرآ و همکاران ۲۰۱۱).

دادند، بیان کردند که بوته‌هایی که در غلظت ۳ و ۹ میلی‌گرم کادمیم رشد یافتند به ترتیب ۳۴ و ۳۷ درصد ظرفیت آنتی‌اکسیدان بالاتری نسبت به شرایط بدون تنش نشان دادند. ترکیبات فنلی دارای خاصیت آنتی-اکسیدانی هستند که با جمع‌آوری و احیای گونه‌های فعال اکسیژن مانع از اکسیداسیون مولکول‌های زیستی سلول می‌شوند (اوه و همکاران ۲۰۰۹) و هم به‌عنوان ترکیبات کلاته‌کننده فلزها (ماتسوکا و همکاران ۲۰۱۱) نقش مهمی در ایجاد تحمل نسبت به تنش عناصر سنگین در گیاهان به‌عهده دارند و مانع از تنش اکسیداتیو و یا کاهش اثرات آن در سلول‌های گیاه می‌شوند. افزایش ترکیبات فنلی می‌تواند به دلایلی از قبیل افزایش فعالیت آنزیم‌هایی که در متابولیسم این ترکیبات وجود دارد (میچالاک ۲۰۰۶) و یا عملکرد محافظتی این ترکیب‌ها علیه تنش توسط به دام‌اندازی عناصر سنگین و حذف گونه‌های فعال اکسیژن باشد (لاوید و همکاران، ۲۰۰۱). در مطالعه

جدول ۳- مقایسه میانگین برش‌دهی برهمکنش سرب، بیوچار و سالیسیلیک اسید در میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدان

ظرفیت آنتی‌اکسیدان (%)	سالیسیلیک اسید	بیوچار	سرب (میلی‌گرم در کیلوگرم)
۳۰/۳۸ ^c	عدم محلول پاشی	عدم مصرف	.
۲۹/۷۱ ^a	محلول پاشی	عدم مصرف	
۲۹/۳۵ ^a	عدم محلول پاشی	مصرف	
۳۳/۳۷ ^a	محلول پاشی	مصرف	
۲۴/۷۸ ^c	عدم محلول پاشی	عدم مصرف	۴۰۰
۳۲/۴۶ ^b	محلول پاشی	عدم مصرف	
۳۱/۷۵ ^b	عدم محلول پاشی	مصرف	
۳۶/۵۵ ^a	محلول پاشی	مصرف	
۲۸/۱۲ ^b	عدم محلول پاشی	عدم مصرف	۸۰۰
۲۸/۹۰ ^b	محلول پاشی	عدم مصرف	
۳۰/۵۵ ^b	عدم محلول پاشی	مصرف	
۳۴/۹۳ ^a	محلول پاشی	مصرف	
۳۰/۲۷ ^b	عدم محلول پاشی	عدم مصرف	۱۲۰۰
۲۸/۱۲ ^a	محلول پاشی	عدم مصرف	
۳۱/۳۱ ^a	عدم محلول پاشی	مصرف	
۲۸/۴۲ ^a	محلول پاشی	مصرف	
۲۸/۲۶ ^b	عدم محلول پاشی	عدم مصرف	۱۶۰۰
۳۲/۹۱ ^a	محلول پاشی	عدم مصرف	
۲۸/۶۷ ^b	عدم محلول پاشی	مصرف	
۲۹/۵۱ ^b	محلول پاشی	مصرف	

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند، براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

برهمکنش سرب و سالیسیلیک اسید در تمام صفات موجود در جدول ۴ معنی‌دار شد. در حالی که برهمکنش اثر سرب و بیوچار و اثر بیوچار و سالیسیلیک اسید تنها روی میزان پرولین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). همچنین جدول ۴ نشان می‌دهد تمامی اثرات به غیر از اثر ساده بیوچار در میزان غلظت سرب در شاخساره معنی‌دار بود. در حالی که تمامی اثرات ساده، دوگانه و سه‌گانه مورد مطالعه در میزان غلظت سرب در ریشه و فاکتور تجمع زیستی ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴).

پرولین، مقدار نسبی آب برگ و نشت الکترولیت، میزان غلظت سرب در شاخساره، غلظت سرب در ریشه و فاکتور تجمع زیستی ریشه واریانس داده‌های به‌دست آمده از آزمایش نشان داد که غلظت سرب در میزان پرولین و نشت الکترولیت در سطح احتمال یک درصد اثر معنی‌داری داشت (جدول ۴). اثر تیمار بیوچار در تولید پرولین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. اما اثر محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید در دو صفت پرولین و نشت الکترولیت معنی‌دار شد. همچنین جدول ۴ نشان می‌دهد از میان اثرات متقابل

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر میزان پرولین، مقدار نسبی آب برگ، نشت الکترولیت و وزن خشک شاخساره گیاه سورگوم

منابع تغییر	درجه آزادی	پرولین	نشت الکترولیت	مقدار نسبی آب برگ	غلظت سرب در شاخساره	غلظت سرب در ریشه	فاکتور تجمع زیستی ریشه	وزن خشک شاخساره
سرب	۴	۲۰/۵۲**	۷/۳۶**	۱۵۷/۵۴ ^{ns}	۸۵۱۰۴۱/۷۲**	۲۳۲۹۹۹/۸۳**	۱۰/۱۸**	۲۹/۵۹**
بیوچار	۱	۶/۵۰**	۰/۰۳ ^{ns}	۲۳۵/۸۲ ^{ns}	۵۷/۸۳ ^{ns}	۱۱۹۸۴/۴۲**	۲/۲۱**	۱۰/۰۰**
سالیسیلیک اسید	۱	۴۶/۵۹**	۱۱/۹۹*	۳۳/۶۷ ^{ns}	۳۹۶۴۰/۶۰**	۳۱۷۰۷/۰۷**	۷/۸۳**	۱/۸۳*
سرب×بیوچار	۴	۱/۵۸**	۲/۳۲ ^{ns}	۱۵/۳۵ ^{ns}	۱۲۸۱/۱۴**	۳۷۱۳/۶۲**	۰/۳۷**	۳/۲۱**
سرب×سالیسیلیک اسید	۴	۲/۶۰**	۷/۴۴**	۳۱۶/۰۵*	۱۷۴۸۰/۰۱**	۱۲۲۵/۴۸**	۱/۹۳**	۰/۳۵ ^{ns}
بیوچار×سالیسیلیک اسید	۱	۱/۱۷**	۰/۰۴ ^{ns}	۸۳/۷۷ ^{ns}	۵۹۱/۵۵*	۱۱۴۳/۰۷**	۰/۲۲**	۰/۱۴ ^{ns}
سرب×بیوچار×سالیسیلیک اسید	۴	۰/۳۴ ^{ns}	۲/۰۹ ^{ns}	۶۴/۸۵ ^{ns}	۱۸۱۸/۸۸**	۸۶۷/۰۷**	۰/۱۸**	۰/۳۵ ^{ns}
خطای آزمایش	۶۰	۰/۱۵	۱/۷۸	۶۵/۹۵	۱۰۰/۹۱	۳۳/۳۳	۰/۰۰۶	۰/۳۳
ضریب تغییرات (%)		۱۱/۹۷	۱/۳۶	۱۰/۳۵	۵/۰۸۸	۵/۴۵	۶/۴۴	۵/۶۶

*, ** و ^{ns}: به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و عدم معنی‌داری می‌باشد.

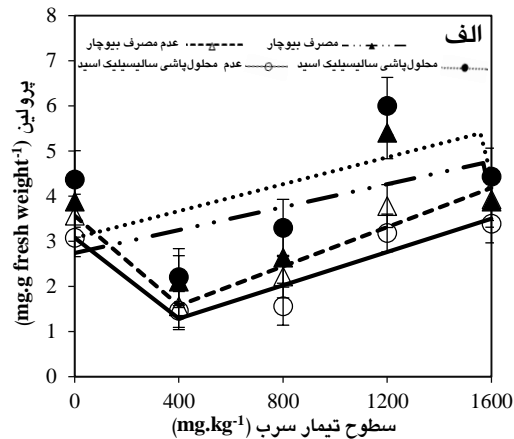
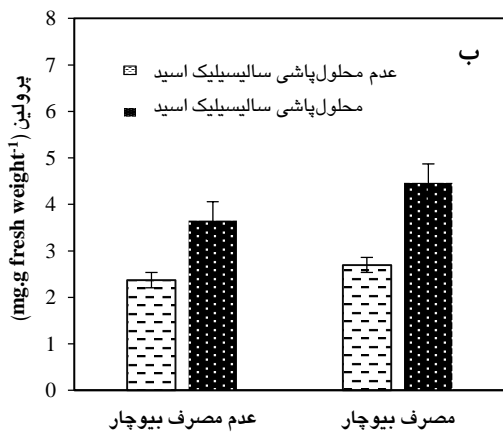
مصرف بیوچار و عدم محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید) افزایش نشان دادند.

مشابه نتایج این مطالعه میزان پرولین برگ در گیاه فلفل آنوم (*Capsicum annuum* L.) در مجاورت فلز سنگین سرب به‌میزان قابل توجهی افزایش یافت (کایا و همکاران ۲۰۱۹). پرولین یک آمینواسید است که به‌صورت معمول در شرایط وجود استرس در گیاه تجمع می‌یابد (احمد و سیدیگو ۲۰۰۷). به نظر می‌رسد افزایش مقدار پرولین تحت تنش فلز سنگین در این آزمایش، به‌ویژگی اسمولیتی آن و هم به‌ویژگی آنتی‌اکسیدانی آن در شرایط تنش (رئییسی ساداتی و همکاران ۲۰۱۵) مربوط باشد. در مطالعات متعددی

روند تغییرات پرولین در برابر افزایش غلظت سرب خاک در هر دو سطح تیمارهای بیوچار و سالیسیلیک اسید نیز به‌صورت دو تکه‌ای بود و در تیمارهای مصرف بیوچار و محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید به‌ترتیب از غلظت صفر تا ۱۵۶۹/۲ و ۱۵۵۷/۳ میلی‌گرم سرب با شیب ۰/۰۰۱۲۷ و ۰/۰۰۱۴۹ افزایش یافت و در ادامه تا غلظت ۱۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک به‌ترتیب با شیب ۰/۰۲۸- و ۰/۰۲۲۶- کاهش یافت (شکل ۶- الف و جدول ۵). همچنین شکل ۶- ب نشان می‌دهد بوته‌هایی که هم با بیوچار و هم با سالیسیلیک اسید تیمار شدند میزان پرولین ۸۸/۴۸ درصد نسبت به شاهد (عدم

همچنین گزارش شده که سالیسیلیک اسید از طریق تجمع پرولین باعث تحمل به تنش جیوه در یونجه (*Medicago sativa*) می‌شود (زو ۲۰۰۹). لذا افزایش غلظت پرولین می‌تواند افزایش توانایی گیاه سورگوم علوفه‌ای در تحمل تنش سرب را در این مطالعه نشان دهد.

گزارش شده پرولین در گیاهان تحت شرایط نامطلوب رشد مانند تنش فلزات سنگین تجمع می‌یابد (کشته‌گر و همکاران ۲۰۱۴، امامیان و همکاران ۲۰۲۰). طبق نتایج به‌دست آمده سالیسیلیک اسید باعث افزایش سطح پرولین در گیاه سورگوم تیمار شده با سرب شده است که با نتایج احمد و همکاران (۲۰۱۰) مطابقت دارد.



شکل ۶- برهمکنش اثر سرب و سالیسیلیک اسید بر روند تغییرات میزان پرولین برگ سورگوم در پاسخ به افزایش سطوح تیمار سرب (الف) و برهمکنش بیوجار و سالیسیلیک اسید بر میزان پرولین برگ سورگوم تحت تنش سرب (ب)

جدول ۵- معادله مناسب توصیف کننده اثر تیمارهای بیوجار و سالیسیلیک اسید بر روند تغییرات پرولین در پاسخ به افزایش سطوح تیمار سرب

نام صفت	عدم مصرف بیوجار	مصرف بیوجار	عدم محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید	محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید
پرولین	$y = -0.00499x + 3.5650$ if $x \leq 400$ $y = 0.00217x + 1.573$ if $x > 400$ $R^2 = 0.9255$ $p = 0.0088$ $CV = 10.6648$	$y = 0.00127x + 2.7418$ if $x \leq 1569.2$ $y = -0.028x + 4.7347$ if $x > 1569.2$ $R^2 = 0.2153$ $p = 0.4312$ $CV = 16.964$	$y = -0.00447x + 3.07$ if $x \leq 400$ $y = 0.00185x + 1.2820$ if $x > 400$ $R^2 = 0.8772$ $p = 0.0190$ $CV = 14.068$	$y = 0.00149x + 3.0706$ if $x \leq 1557.3$ $y = -0.0226x + 5.3910$ if $x > 1557.3$ $R^2 = 0.2435$ $p = 0.3982$ $CV = 17.29$

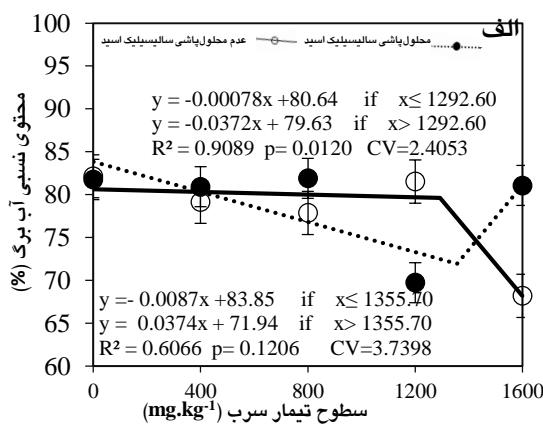
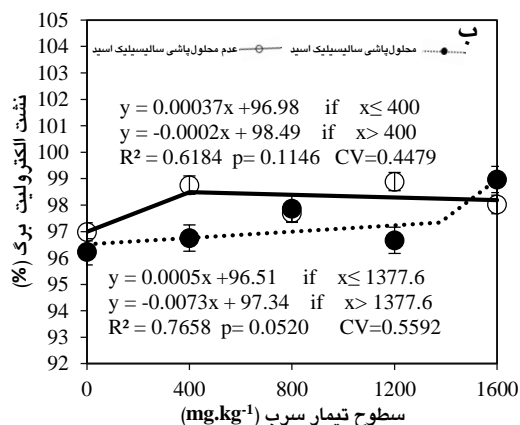
شدند از غلظت صفر تا ۱۳۵۵/۷۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک باعث کاهش مقدار نسبی آب برگ با شیب ۰/۰۰۸۷- واحد شد و در ادامه تا ۱۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم با شیب ۰/۰۳۷۴- واحد افزایش یافت (شکل ۷- الف). این کاهش در مقدار نسبی آب برگ ممکن است به این دلیل باشد که تنش فلزهای سنگین سبب بسته شدن روزنه‌ها می‌شوند (الظهرانی و همکاران ۲۰۲۰). همچنین، سرب موجود در خاک از طریق کاهش هدایت روزنه‌ای،

روند تغییرات مقدار نسبی آب برگ با محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید به صورت دو تکه‌ای بود (شکل ۷- الف). در سطح عدم محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید از غلظت صفر تا ۱۲۹۲/۶۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک باعث کاهش مقدار نسبی آب برگ با شیب ۰/۰۰۷۸- واحد شد و در ادامه تا ۱۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم با شیب ۰/۰۳۷۲- واحد کاهش یافت (شکل ۷- الف). بوته‌هایی که با سالیسیلیک اسید محلول‌پاشی

(۲۰۱۷) در گل گندم (*Centaurea cyanus*) نشان داد سرب موجب کاهش مقدار نسبی آب برگ گردید. سرب در گیاه با کاهش اندازه و تعداد سلول‌های نگهبان روزنه موجب کاهش انتقال آب به برگ‌ها و کاهش سطح برگ شده و با آسیب به دیواره سلولی و در نتیجه اختلال در سرعت تعرق برگ و بروز تغییرات فراساختاری در اندامک‌های سلول، مقدار نسبی آب برگ را کاهش می‌دهد (سنکیس و همکاران ۲۰۱۰). در آزمایشی مشابه که روی گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) تحت تنش سرب انجام شد مشاهده شد که کاربرد کمپوست و بیوچار موجب افزایش مقدار نسبی آب برگ در مقایسه با شاهد تحت تنش سرب شد (رشید و همکاران ۲۰۲۰). بیوچار ترکیبی است پایدار از کربن که باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی در خاک می‌شود. علاوه بر این، باعث افزایش فراهمی عناصر غذایی ماکرو و نیز ظرفیت بالای نگه‌داشت آب و به‌دنبال آن بهبود رشد گیاه می‌گردد (بی‌ریا و همکاران ۲۰۱۷).

نرخ تعرق و محتوای نسبی آب برگ، سبب تنش آبی در گیاهان می‌شود. علاوه بر این سرب بر نفوذپذیری غشای پلاسمایی یا غشای سلولی تأثیر می‌گذارد و باعث کاهش میزان آب گیاهان می‌شود (شانینگ و همکاران ۲۰۱۷). عناصر سنگین با کاهش طول ریشه، کاهش میزان انتقال مواد از ریشه به شاخساره، کاهش قابلیت تراوایی ریشه، کاهش اندازه و تعداد آوندهای چوبی، افزایش چوب پنبه-ای شدن و لیگنینی شدن ریشه، جلوگیری از تولید ریشه-های موئین، آسیب به نوک

ریشه‌های اصلی (بارسلو و پستچنریدر ۱۹۹۰) موجب ایجاد اختلال در جذب آب و به‌هم ریختن تعادل آبی در گیاه می‌گردد. تجمع پرولین و آمینواسیدهای آزاد، در پاسخ به تنش عناصر سنگین، دلیل مناسبی برای کاهش در میزان نسبی آب بافت و بوجود آوردن خشکی فیزیولوژیکی در گیاه است (حسین و همکاران ۲۰۱۳، علی و همکاران ۲۰۰۷). در همین زمینه نتایج خدوردی‌لو و همکاران (۲۰۱۳) در گیاه گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) و نتایج فاطمی و همکاران



شکل ۷- برهمکنش اثر سرب و سالیسیلیک اسید بر روند تغییرات مقدار نسبی آب برگ (الف) و نشت الکترولیت برگ (ب) در گیاه سورگوم در پاسخ به افزایش آلودگی سرب

کیلوگرم با شیب ۰۰۰۲- واحد کاهش یافت (شکل ۷-ب). درحالیکه بوته‌هایی که با سالیسیلیک اسید محلول‌پاشی شدند از غلظت صفر تا ۱۳۷۷/۶ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک باعث افزایش نشت الکترولیت آب برگ با شیب ۰/۰۰۰۵ واحد شد و در ادامه تا ۱۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم با شیب ۰/۰۰۷۳- واحد کاهش یافت (شکل ۷-ب).

همچنین روند تغییرات نشت الکترولیت با محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید به‌صورت دو تکه‌ای بود (شکل ۷-ب). در سطح عدم محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید از غلظت صفر تا ۴۰۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک باعث افزایش نشت الکترولیت آب برگ با شیب ۰/۰۰۰۳۷ واحد شد و در ادامه تا ۱۶۰۰ میلی‌گرم در

۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب در خاک به‌دست آمد که نسبت به شاهد آن (عدم مصرف بیوپچار و عدم محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید در سطح ۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب) به‌ترتیب ۲۴/۶۸ و ۹۵/۹۶ درصد افزایش یافت. همچنین نتایج پژوهش حاضر نشان داد که غلظت سرب در شاخساره حدوداً ۲ برابر ریشه می‌باشد (جدول ۶). علاوه بر این جدول ۶ نشان می‌دهد با افزایش سطوح سرب میزان فاکتور تجمع زیستی ریشه افزایش یافت. بیشترین فاکتور تجمع زیستی ریشه (۳/۶۵) در تیمار ۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک و کاربرد توام بیوپچار و محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید مشاهده شد که نسبت به شاهد (عدم مصرف بیوپچار و عدم محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید در ۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب) فاکتور تجمع زیستی ریشه ۲۲۸/۸۳ درصد افزایش یافت (جدول ۶). هم‌راستا با نتایج این مطالعه، اثر مثبت سالیسیلیک اسید در افزایش جذب عنصر سنگین نیکل و فاکتور تجمع زیستی نیکل در ریشه ذرت (*Zea mays L.*) نیز گزارش شده است (شفیق و همکاران ۱۳۹۶). همچنین نتایج آزمایشی نشان داد که استفاده از بیوپچار تولید شده از چوب ذرت تاثیر قابل توجهی در اثربخشی گیاه *Ipomoea reptans* Poir در جذب کادمیم داشته است (رتنساری و همکاران ۲۰۲۰). با توجه به این که بیوپچار و سالیسیلیک اسید باعث افزایش غلظت سرب در اندام‌های گیاهی و افزایش فاکتور تجمع زیستی ریشه (جدول ۶) می‌شوند؛ می‌توان از این گیاه برای گیاه‌پالایی سرب به‌ویژه در تثبیت گیاهی استفاده کرد (آگگاراول و گوپال ۲۰۰۷).

نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایش بر وزن خشک شاخساره گیاه سورگوم (جدول ۴) نشان داد که سه اثر ساده سرب، بیوپچار و سالیسیلیک اسید و اثر دوگانه سرب و بیوپچار معنی‌دار شد. همچنین برهمکنش اثر بیوپچار و سرب بر وزن خشک شاخساره (شکل ۸ الف) نشان می‌دهد که روند تغییرات وزن خشک شاخساره تحت تیمار عدم مصرف بیوپچار و مصرف بیوپچار به‌صورت دو تکه‌ای تا غلظت ۱۱۱۱/۴ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک افزایش و با افزایش غلظت سرب از این حد کاهش یافت (شکل ۸ - الف). در تیمار مصرف بیوپچار در بالاترین سطح سرب

(ب). علت افزایش نشت الکترولیت توسط عناصر سنگین تمایل بالای فلزات به لیگاندهای دارای نیتروژن، سولفور و پروتئین می‌باشد که در نتیجه با تشکیل پیوند درون پروتئین‌ها منجر به اختلال در کانال‌های یونی غشاء و نشت یون‌ها می‌شود (میشرا و همکاران ۲۰۰۶). در آزمایشی مشابه نیز افزودن سرب، کادمیم، نیکل و مس موجب افزایش نشت الکترولیت در گیاه لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris L.*) شد (بلوچی و همکاران ۲۰۱۶). علت افزایش نشت‌پذیری غشاءهای زیستی و آسیب به غشاءهای زیستی در تنش‌های مختلف محیطی، افزایش پراکسیداسیون لیپیدها می‌باشد (وحید ۲۰۰۷). همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که سالیسیلیک اسید درصد نشت الکترولیت را در گیاهان تیمار شده با سرب کاهش داده است (شکل ۷- ب). کاهش نشت الکترولیت غشاء به کاربرد بیوپچار و سالیسیلیک اسید می‌تواند به‌نقش حفاظتی بیوپچار و افزایش سازگاری گیاه به‌شرایط تنش باشد (جانوسکووا و همکاران ۲۰۰۶). همچنین افزایش درصد نشت الکترولیت تحت تنش سرب در آزمایش‌های دیگری مانند ال- ماهروک و همکاران (۲۰۱۹) در گیاه *Salix mucronata* تحت تنش سرب گزارش شده است. نشت الکترولیت نشان‌دهنده واکنش گیاه به تنش‌هایی مانند شوری، عوامل بیماری‌زا، خشکی، فلزهای سنگین و غیره است. ایجاد نشت الکترولیت ناشی از تنش به‌طور کلی منجر به تجمع گونه‌های اکسیژن فعال و در نتیجه باعث مرگ برنامه‌ریزی شده سلولی می‌شود (داس و سرکارا ۲۰۱۶). به‌خوبی شناخته شده است که تحت تنش کادمیم، سطح گونه‌های اکسیژن فعال بیش از حد افزایش می‌یابد و همراه با آسیب اکسیداتیو منجر به مرگ سلولی می‌شود. بنابراین، کنترل مداوم گونه‌های اکسیژن فعال و متابولیسم آن‌ها در شرایط تنش ضروری است (ژانگ و همکاران ۲۰۱۵).

نتایج حاصل از مقایسه میانگین برش‌دهی اثر سرب در سطوح بیوپچار و سالیسیلیک اسید (جدول ۶) نشان داد که با افزایش سطوح سرب در خاک، غلظت سرب در شاخساره و ریشه افزایش یافت؛ بطوریکه بیشترین غلظت سرب در شاخساره و ریشه به‌ترتیب ۶۷۱/۱۷ و ۳۹۸/۷۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم ماده خشک در تیمار مصرف توام بیوپچار و سالیسیلیک اسید در سطح

جدول ۶- مقایسه میانگین برش‌دهی برهمکنش سرب، بیوچار و سالیسیلیک اسید بر میزان غلظت سرب در شاخساره، غلظت سرب در ریشه و فاکتور تجمع زیستی ریشه

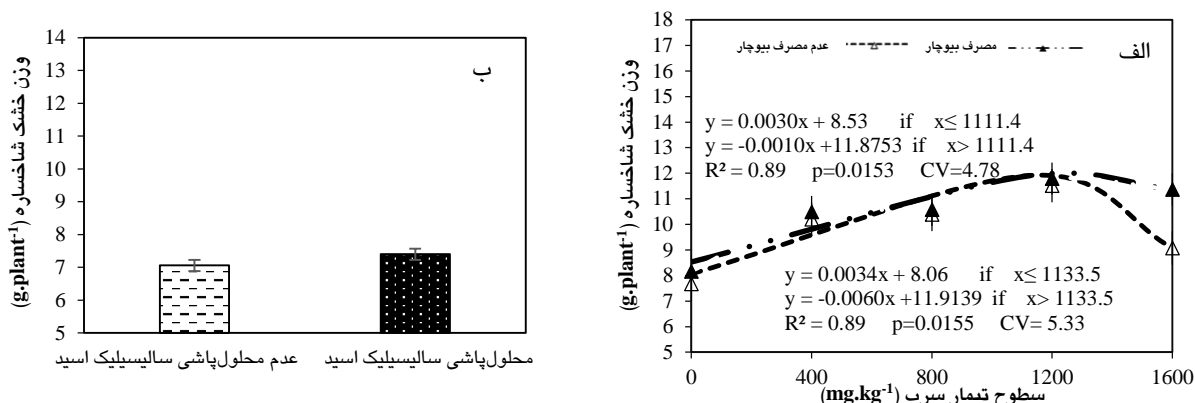
فاکتور تجمع زیستی ریشه	غلظت سرب در ریشه (mg.kg^{-1})	غلظت سرب در شاخساره (mg.kg^{-1})	سالیسیلیک اسید	بیوچار	سرب (mg.kg^{-1})
۰/۳۶ ^c	۰/۶۴ ^c	۰/۰۷ ^d	عدم محلول‌پاشی	عدم مصرف	
۰/۵۶ ^a	۰/۹۴ ^a	۰/۵۷ ^b	محلول‌پاشی	عدم مصرف	
۰/۴۶ ^b	۰/۷۸ ^b	۰/۴۲ ^a	عدم محلول‌پاشی	مصرف	
۰/۶۳ ^a	۰/۹۴ ^a	۰/۹۲ ^a	محلول‌پاشی	مصرف	
۰/۵۷ ^d	۳۲/۲۳ ^c	۴۶/۴۳ ^c	عدم محلول‌پاشی	عدم مصرف	۴۰۰
۰/۷۷ ^b	۴۰/۵۶ ^a	۶۲/۶۶ ^b	محلول‌پاشی	عدم مصرف	
۰/۶۹ ^c	۳۷/۶۰ ^b	۵۸/۱۶ ^b	عدم محلول‌پاشی	مصرف	
۰/۹۰ ^a	۴۱/۵۱ ^a	۶۷/۵۰ ^a	محلول‌پاشی	مصرف	
۰/۵۸ ^d	۳۸/۸۷ ^c	۹۹/۰۸ ^d	عدم محلول‌پاشی	عدم مصرف	۸۰۰
۰/۷۸ ^b	۵۰/۶۸ ^a	۱۳۵/۳۹ ^b	محلول‌پاشی	عدم مصرف	
۰/۷۳ ^c	۴۷/۳۶ ^b	۱۲۴/۹۳ ^c	عدم محلول‌پاشی	مصرف	
۰/۹۰ ^a	۵۰/۹۹ ^a	۱۳۹/۱۹ ^a	محلول‌پاشی	مصرف	
۰/۷۵ ^c	۷۴/۸۴ ^c	۲۰۱/۲۶ ^d	عدم محلول‌پاشی	عدم مصرف	۱۲۰۰
۱/۹۹ ^a	۱۶۲/۵۴ ^b	۲۲۴/۹۴ ^b	محلول‌پاشی	عدم مصرف	
۱/۸۰ ^b	۱۵۸/۷۷ ^b	۲۱۶/۰۸ ^c	عدم محلول‌پاشی	مصرف	
۲/۰۷ ^a	۱۷۹/۳۲ ^a	۲۳۷/۴۹ ^a	محلول‌پاشی	مصرف	
۱/۱۱ ^d	۲۰۳/۴۶ ^d	۵۳۸/۳۱ ^b	عدم محلول‌پاشی	عدم مصرف	۱۶۰۰
۲/۹۳ ^b	۳۳۲/۲۱ ^b	۶۵۷/۰۰ ^a	محلول‌پاشی	عدم مصرف	
۱/۸۹ ^c	۲۶۵/۷۳ ^c	۴۶۶/۸۸ ^c	عدم محلول‌پاشی	مصرف	
۳/۶۵ ^a	۳۹۸/۷۰ ^a	۶۷۱/۱۷ ^a	محلول‌پاشی	مصرف	

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند، براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

از حدی با توجه به نتایج نشان‌دهنده کاهش جذب مواد غذایی و اختلال در انتقال ترکیبات ضروری از ریشه‌ها به اندام هوایی می‌باشد (موسوی و همکاران ۲۰۲۰)، بیوچار باعث بهبود احتباس مواد مغذی، جذب آب، افزایش کربن آلی، عناصر پرمصرف (نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منگنز) و افزایش ریزمغذی‌ها در خاک شده، در نتیجه حاصل‌خیزی خاک را بهبود می‌بخشد و رشد رویشی را افزایش می‌دهد (عباس و همکاران ۲۰۲۰). در این آزمایش در هر یک از سطوح کادمیم، با مصرف بیوچار زیست توده بیشتری تولید شد و اگر این امر نشان دهنده این است که بیوچار اثرات سمی این عناصر را کاهش می‌دهد.

نسبت به سطح صفر آن حدود ۱۸/۳۸ درصد وزن خشک شاخساره کاهش یافت؛ در حالی که وزن خشک شاخساره در تیمار عدم مصرف بیوچار در بالاترین سطح سرب نسبت به سطح صفر آن ۳۹/۳۴ درصد کاهش نشان داد (شکل ۸ الف). همچنین نتایج آزمایش نشان داد محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید موجب افزایش ۳/۱۱ درصدی وزن خشک شاخساره گیاه سورگوم نسبت به عدم محلول‌پاشی شده است (شکل ۸ ب).

سرب تا حدودی باعث افزایش وزن خشک شاخساره شد؛ این افزایش را می‌توان به تجمع این فلز در اندام گیاهی برای مقابله با تنش فلزها نسبت داد (موسوی و همکاران ۲۰۲۰)، اما کاهش وزن خشک اندام‌های گیاهی



شکل ۸- برهمکنش اثر بیوجار بر روند تغییرات وزن خشک شاخساره در پاسخ به افزایش غلظت سرب خاک (الف) و اثر ساده سالیسیلیک اسید بر وزن خشک شاخساره تحت شرایط تنش سرب (ب)

دسترس در خاک می‌تواند یک روش مناسب و مقرون به‌صرفه برای حذف یا کاهش آلودگی خاک باشد تا ضمن افزایش فعالیت‌های متابولیک گیاه سورگوم، مقاومت گیاه را در برابر تنش سرب بهبود بخشد.

سپاسگزاری

به این وسیله از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری بخاطر حمایت مالی این پژوهش مراتب سپاسگزاری به‌عمل می‌آید.

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی نتایج پژوهش حاضر بیانگر تأثیر مثبت و معنی‌دار سالیسیلیک اسید و بیوجار بر بهبود صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه و در نهایت وزن خشک شاخساره بود. به‌عبارت دیگر، کاربرد سالیسیلیک اسید به‌عنوان محرک و تنظیم‌کننده رشد گیاه و یا کاربرد بیوجار به‌عنوان یک ماده آلی با قابلیت ماندگاری بالا در خاک، می‌تواند اثرات منفی سرب بر ویژگی‌های رشدی گیاه سورگوم تحت تنش را بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. به‌عبارتی، استفاده از این مواد ارزان و قابل

منابع مورد استفاده

- Abbas A, Azeem M, Naveed M, Latif A, Bashir S, Ali A, Bilal M and Ali L. 2020. Synergistic use of biochar and acidified manure for improving growth of maize in chromium contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, 22(1): 52-61.
- Aggarwal H and Goyal D. 2007. Phytoremediation of some heavy metals by agronomic crops. *Developments in Environmental Science*, 5: 79-98.
- Ahamed M and Siddiqui MK. 2007. Low level lead exposure and oxidative stress. *Clinica Chimica Acta*, 383: 57-64.
- Ahmad P, Nabi G and Ashraf M. 2010. Cadmium-induced oxidative damage in mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern. and Coss.] plants can be alleviated by salicylic acid. *South African Journal of Botany*, 77(1): 36-44.
- Ahmed IAM, Bykova A, Akgöl H, Çevik İ, Rafique M and Ortaş İ. 2016. Biochar doze and mycorrhiza application on sorghum plant growth and nutrient uptake. *Eurosoil Congress*, 16-21 Oct. WOW Convention Center. Istanbul-Turkey.
- Al-Chami Z, Amer N, Al-Bitar L and Cavoski I. 2015. Potential use of *Sorghum bicolor* and *Carthamus tinctorius* in phytoremediation of nickel, lead and zinc. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12: 3957-3970.

- Ali B, Rani I, Hayat S and Ahmad A. 2007. Effect of 4-cl-indul-3-aceticacid on seed germination of *Cicer arietinum* exposed to cadmium. *Acta Botanica Croatica*, 66(1): 57-65.
- Alzahrani Y, Alharby HF, Hakeem KR and Alsamadany H. 2020. Modulating effect of EDTA and SDS on growth, biochemical parameters and antioxidant defense system of *Dahlia variabilis* grown under cadmium and lead-induced stress. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48(2): 906-923.
- Anjum SA, Tanveer M, Hussain S, Shahzad B, Ashraf U, Fahad S, Hassan W, Jan S, Khan I, Saleem MF, Bajwa AA, Wang L, Mahmood A, Samad RA and Tung SA. 2016. Osmoregulation and antioxidant production in maize under combined cadmium and arsenic stress. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(12): 11864-11875.
- Azmat R, Haider S and Askari S. 2006. Phytotoxicity of Pb: effect of Pb on germination, growth, morphology and histomorphology of *Phaseolus mungo* and *Lens culinaris*. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 9(5): 979-984.
- Baghaie AH and Aghilizefreei A. 2020. Effects of salicylic acid, humic acid, and EDTA chelate on the increasing Pb concentration in the barley inoculated with PGPR. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 8(1): 10-18.
- Balouchi HR, Amini F, Movahhedi Dehnavi M and Attarzadeh M. 2017. Effect of different growing organic substrates on growth and yield components of pinto bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under heavy metals stress. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 26(2): 57-73. (In Persian)
- Barcelo L and Poschenrieder Ch. 1990. Plant water relations as affected by heavy metal stress: A reaview. *Journal of Plant Nutrition*, 13(1): 1-37.
- Bates IS, Waldern RP and Tear ID. 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, 39: 205-207.
- Biria M, Moezzi AA and AmeriKhah H. 2017. Effect of sugercan bagasse biochar on maize plant growth, grown in lead and cadmium contaminated soil. *Water and Soil*, 31(2): 609-626. (In Persian)
- Cabello-Conejo M, Centofanti T, Kidd P, Prieto-Fernández Á and Chaney R. 2013. Evaluation of plant growth regulators to increase nickel phytoextraction by *Alyssum* species. *International Journal of Phytoremediation*, 15: 365-375.
- Cenkci S, Cioerci IH, Yildiz M, Oezay C, Bozdao A and Terzi H. 2010. Lead contamination reduces chlorophyll biosynthesis and genomic template stability in *Brassica rapa* L. *Environmental Experimental Botany*, 67: 467-470.
- Chang C, Yang M, Wen H and Chern J. 2002. Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10: 178-182.
- Chen D, Liu X, Bian R, Cheng K, Zhang X, Zheng J, Joseph S, Crowley D, Pan G and Li L. 2018. Effects of biochar on availability and plant uptake of heavy metals - A metaanalysis. *Journal of Environmental Management*, 222: 76-85.
- Chen M, Ma LQ, Cao RX, Melamed R and Singh SP. 2003. Field demonstration of in situ immobilization of soil Pb using Pamendments. *Advances in Environmental Research*, 8: 93-102.
- Das J and Sarkar P. 2018. Remediation of arsenic in mung bean (*Vigna radiata*) with growth enhancement by unique arsenic-resistant bacterium *Acinetobacter lwoffii*. *Science of the Total Environment*, 624: 1106-1118.
- Deng Z and Cao L. 2016. Fungal endophytes and their interactions with plants in phytoremediation. *Chemosphere*, 168: 1100-1106.
- Devi Chinmayee M, Anu MS, Mahesh B, Mary sheeba A, Mini I and Swapna TS. 2014. A comparative study of heavy metal accumulation and antioxidant responses in *Jatropha curcas* L. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8(7): 58-67.

- Dogan M. 2019. Effect of cadmium, chromium, and lead on micropropagation and physio-biochemical parameters of *Bacopa monnieri* (L.) Wettst. cultured in vitro. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 30: 351-366.
- Duruibe JO, Oguwuegbu MOC and Egwurugwu JN. 2007. Heavy metal pollution and human biotoxic effects. *International Journal of Physical Sciences*, 2(5): 112-118.
- El-Mahrouk ESM. 2019. Phytoremediation of cadmium-, copper-, and lead-contaminated soil by *Salix mucronata* (synonym *Salix safsaf*). *Hortscience*, 54(7): 1249-1257.
- Emamian Tabarestani M, Pirdashti H, Tajik Ghanbary MA and Sadeghzadeh F. 2020. Quantifying the response of growth, some physiological and biochemical traits of canola (*Brassica napus* L.) plant to lead concentration in the soil. *Journal of Plant Process and Function*, 9(36): 453-468. (In Persian)
- Fatemi H, Esmailpour B, Soltani-Toolarood AA and Nematolah Zadeh A. 2017. Effects of silicon nanoparticle nutrition on growth and physiological characteristics of *Coriandrum sativum* L. under lead stress. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 33(5): 853-870. (In Persian)
- Fooman A, Ghanadha MR, Hosseinzadeh AA and Shakib AM. 2006. Quantitative and qualitative traits of new forage sorghum cultivars in different harvest. *Seed Breeding Research Institute*. 22: 224-215. (In Persian)
- Gu CS, Yang YH, Shao YF, Wu KW and Liu ZL. 2018. The effects of exogenous salicylic acid on alleviating cadmium toxicity in *Nymphaea tetragona* Georgi. *South African Journal of Botany*, 114: 267-271.
- Hamidian AH, Khorasani N, Parvizi Mosaed H, Cheraghi M and Mohammadi A. 2013. Investigation and comparison of mercury (Hg) content and its weekly intake by body in some imported and Iranian kinds of rice. *Journal of Natural Environment*, 66(3): 301-309. (In Persian)
- Hasanpour R, Zaefarian F, Rezvani M and Jalili B. 2019. Potential of *Mentha aquatica* L. *Eryngium caucasicum* Trautv. and *Froriepia subpinnata* Ledeb. for phytoremediation of Cd-contaminated soil. *Brazilian Journal of Botany*, 42: 399-406.
- Hashem A, Abd-Allah EF, Alqarawi AA and Egamberdieva D. 2016. Bioremediation of adverse impact of cadmium toxicity on *Cassia italica* Mill by arbuscular mycorrhizal fungi. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 23: 39-47.
- Hosseini SM and Sheikhi Z. 2017. Antioxidant activities and total phenolic contents in *Triticum turgidum* L. and *Triticum phananicum* Heslot. *International Journal of ChemTech Research*, 10(6): 1059-1065.
- Hussain A, Abbas N, Arshad F, Akram M, Khan ZI, Ahmad K, Mansha M and Mirzaei F. 2013. Effects of diverse doses of lead (Pb) on different growth attributes of *Zea mays* L. *Agricultural Sciences*, 4(5): 262-265.
- Ibrahim MEH, Ali AYA, Elsiddig AMI, Zhou G, Nimir NEA, Ahmad I, Suliman MSE, Elradi SBM and Salih EGI. 2019. Biochar improved sorghum germination and seedling growth under salinity stress. *Agronomy Journal*, 112(2): 911-920.
- Jafari M, Moameri M, Jahantab E and Zargham N. 2017. Effects of municipal solid waste compost and biochar on the phytoremediation potential of *Bromus tomentellus* Boiss. in greenhouse condition. *Journal of Rangeland*, 11(2): 194-206. (In Persian).
- Janouskova M, Pavlikova D and Vosatka M. 2006. Potential contribution of arbuscular mycorrhiza to cadmium immobilisation in soil. *Chemosphere*, 65: 1959-1965.
- Karimi F, Sepehri M, Afuni M and Hajabbasi MA. 2015. Effect of endophytic fungus, *Piriformospora indica*, on barley resistance to lead. *Journal of Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, 19(71): 311-320. (In Persian)
- Kaya C, Akram NA, Surucu A and Ashraf M. 2019. Alleviating effect of nitric oxide on oxidative stress and antioxidant defence system in pepper (*Capsicum annuum* L.) plants exposed to cadmium and lead toxicity applied separately or in combination. *Scientia Horticulturae*, 255: 52-60.

- Kehstegar M, Afshar SA and Nematpour SF. 2014. Effect of heavy metals Cu and Pb on some growth characteristics, proline content and lipid peroxidation in two varieties of mung bean (*Vigna radiate*). Journal of Crop Ecophysiology, 8(31): 363-374. (In Persian).
- Khodaverdilou MH, Rasouli Sedghiyani MH and Karimi A. 2013. Influence of microbial inoculation of a Pb-contaminated soil on growth, some physiological properties, and uptake and translocation of Pb, Fe, and Zn by *Centaurea* (*Centaurea cyanus*). Soil Management and Sustainable Production, 3(2): 75-93. (In Persian).
- Khosravi F, Savaghebi Firoozabadi GH and Farahbakhsh H. 2009. The effect of potassium chloride on cadmium uptake by canola and sunflower in a polluted soil. Journal of Water and Soil Science, 23(3): 28-35. (In Persian).
- Kisa D, Elmastas M, Zturk LO and Kayir O. 2016. Responses of the phenolic compounds of *Zea mays* under heavy metal stress. Applied Biological Chemistry, 59(6): 813-820.
- Kumar D, Mishra DS, Chakraborty B and Kumar P. 2013. Pericarp browning and quality management of litchi fruit by antioxidants and salicylic acid during ambient storage. Journal of Food Science and Technology, 50: 797-802.
- Lavid N, Schwartz A, Yarden O and Tel-Or E. 2001. The involvement of polyphenols and peroxides activities in heavy metal accumulation by epidermal glands of waterlily (*Nymphaeaceae*). Planta, 212(3): 323-331.
- Lin C, Liu J, Liu L, Zhu T, Sheng L and Wang D. 2009. Soil amendment application frequency contributes to phytoextraction of lead by sunflower at different nutrient levels. Environmental and Experimental Botany, 65(2-3): 410-416.
- Lindsay WL and Norvell WA. 1978. Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Science Society of America Journal. 42: 421-428.
- Lutts S, Kinet JM and Bouharmont J. 1995. Changes in plant response to NaCl during development of rice (*Oryza sativa* L.) varieties differing in salinity resistance. Journal of Experimental Botany, 46: 1843-1852.
- Ma LQ, Komar KM, Tu C, Zhang W, Cai Y and Kenelly ED. 2001. A fern that hyper accumulates arsenic. Nature, 409: 579-582.
- Maleki MS and Ehsanpour AA. 2018. Effect of salicylic acid on total phenol, flavonoid, anthocyanin and PAL and TAL enzymes in tomato (*Solanum lycopersicum* Mill) plants. Iranian Journal of Plant Biology, 9(4): 55-67. (In Persian)
- Matsouka I, Beri D, Chinou I, Haralampidis K and Spyropoulos CG. 2011. Metals and selenium induce medicarpin accumulation and excretion from the roots of fenugreek seedlings: a potential detoxification mechanism. Plant and Soil, 343(1-2): 235-245.
- Mazhar R, Ilyas N, Arshad M and Khalid A. 2020. Amelioration potential of biochar for chromium stress in wheat. Pakistan Journal of Botany, 52(4): 1159-1168.
- McDonald S, Prenzler PD, Autolovich M and Robards K. 2001. Phenolic content and antioxidant activity of olive extracts. Food Chemistry, 73: 73-84.
- Michalak A. 2006. Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress. Polish Journal of Environmental Studies, 15(4): 523-530.
- Mishra A and Choudhuri MA. 1997. Ameliorating effects of salicylic acid on lead and mercury-induced inhibition of germination and early seedling growth of two rice cultivars. Seed Science and Technology, 25(2): 263-270 .
- Mousavi SA, Oveysi M and Iranbakhsh A. 2020. The effects of lead and cadmium contamination on seed germination of sorghum (*Sorghum bicolor* L.). Iranian Journal of Dynamic Agriculture, 14(3): 217-229.

- Nikolic NP, Borisev MK, Pajevic SP, Arsenov DD, Zupunski MD, Orlovic SS and Pilipovic AR. 2015. Photosynthetic response and tolerance of three willow species to cadmium exposure in hydroponic culture. *Archives of Biological Science Belgrade*, 67(4): 1411-1420.
- Oh MM, Trick HN and Rajasheka CB. 2009. Secondary metabolism and antioxidant are involved in environmental adaptation and stress tolerance in lettuce. *Journal of Plant Physiology*, 166(2): 180-191.
- Pannacci E and Bartolini S. 2018. Effect of nitrogen fertilization on sorghum for biomass production. *Agronomy Research*, 16(5): 2146-2155.
- Pasqualone A, Delvecchio LN, Mangini G, Taranto F and Blanco A. 2014. Variability of total soluble phenolic compounds and antioxidant activity in a collection of tetraploid wheat. *Agricultural and Food Science*, 23(4): 307-316.
- Pérez-Balibrea S, Moreno DA and García-Viguera C. 2011. Improving the phytochemical composition of broccoli sprouts by elicitation. *Food Chemistry*, 129: 35-44.
- Popova L, Maslenkova L, Yordanova R, Krantev A, Szalai G and Janda T. 2008. Salicylic acid protects photosynthesis against cadmium toxicity in pea plants. *General and Applied Plant Physiology*, 34(3- 4): 133-148.
- Porra RJ. 2002. The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls a and b. *Photosynthesis Research*, 73: 149-156.
- Raesi sadati SY and Jahanbakhsh Godekahriz S. 2015. The effect of heavy metals on some of amino acids, soluble sugars content and total protein in two wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.). *Research in Crop Ecosystems*, 2(1): 85-95. (In Persian)
- Rao SR, Qayyum A, Razaq A, Ahmad M, Mahmood I and Sher A. 2012. Role of foliar application of salicylic acid and l-tryptophan in drought tolerance of maize. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 22(3): 768-772.
- Rashid A, Naz T, Iqbal MM, Akhtar J, Saqib M, Anwar-ul-Haq HM, Ullah R, Kabir S and Ikram QD. 2020. Influence of organic amendments on growth and lead uptake of spinach (*Spinacia oleracea* L.) grown in lead-contaminated soil. *Environmental and Earth Sciences Research Journal*, 7(2): 53-61.
- Ratnasari IFD, Hadi SN, Suparto SR, Herliana O and Ahadiyat YR. 2020. Phytoremediation of cadmium-contaminated soil using terrestrial kale (*Ipomoea reptans* Poir) and corncob biochar. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 7(4): 2313-2318.
- Ritchie SW and Nguyen HT. 1990. Leaf water content and gas exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Science*, 30: 105-111.
- Sanchez-Moreno J, Larrauri JA and Saura-Calixto F. 1999. Free radical scavenging capacity of selected red, rose and white wines. *Journal of the Science of Food and Agricultural*, 79(10): 1301-1304.
- Shafigh M, Ghasemi-Fasaei R and Ronaghi AM. 2017. Influence of plant growth regulators and humic substance on the phytoremediation of nickel in a Ni-polluted soil. *Journal of Water and Soil*, 31(1): 144-155. (In Persian).
- Shanying HE, Xiaoe Y, Zhenli HE and Baligar VC. 2017. Morphological and physiological responses of plants to cadmium toxicity: A review. *Pedosphere*, 27(3): 421-438.
- Sharma RK and Agrawal M. 2006. Single and combined effects of cadmium and zinc on carrots: uptake and bioaccumulation. *Journal of Plant Nutrition*, 31: 19-34.
- Singh S and Prasad SM. 2016. Kinetin ameliorates cadmium induced toxicity on growth, pigments and photosynthesis by regulating antioxidant potential in tomato seedlings. *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science*, 2(1): 229-243.
- Tashakori Fard E, Taghavi Ghasemkheyli F, Pirdashti H, Tajick Ghanbary MA and Bahmanyar MA. 2017. Symbiotic effect of *Trichoderma atroviride* on growth characteristics and yield of two cultivars of

- rapeseed (*Brassica napus* L.) in a contaminated soil treated with copper nitrate. Iranian Journal of Field Crops Research, 15(1): 74-86, (In Persian).
- Toler HD, Morton JB and Cumming JR. 2005. Growth and metal accumulation of mycorrhizal sorghum exposed to elevated copper and zinc. Journal of Water, Air, and Soil Pollution, 164(1-4): 155-172.
- Vojodi Mehrabani L, Valizadeh Kamran R, Fattahi N and Safar-Doost M. 2017. The effects of lead on growth characteristic and some physiological traits of garden cress (*Lepidium sativum*) under in vitro conditions. Genetic Engineering and Biosafety Journal, 6(1): 85-94. (In Persian)
- Wahid A. 2007. Physiological implications of metabolites biosynthesis in net assimilation and heat stress tolerance of sugarcane (*Saccharum officinarum*) sprouts. Journal Plant Research, 120: 219-228.
- Wang YF, Pana F, Wanga G, Zhanga G, Wang Y, Chena X and Maa ZH. 2014. Effects of biochar on photosynthesis and antioxidative system *Oenothera lamarckiana* Rehd. seedlings under replant conditions. Scientia Horticulturae, 175: 9-15.
- Woodis Jr TC, Hunter GB and Johnson FJ. 1977. Statistical studies of matrix effects on the determination of cadmium and lead in fertilizer and material and plant tissue by flame atomic absorption spectrophotometry. Analytica Chemica Acta, 90: 127-136.
- Xu CY, Hosseini-Bai SH, Hao Y, Rachaputi R, Wang H, Xu Z and Wallace H. 2015. Effect of biochar amendment on yield and photosynthesis of peanut on two types of soils. Environmental Science and Pollution Research, 22: 6112-6125.
- Yao P, Zhou H, Li X, Wei L, Wang J Zhang S and Ye X. 2021. Effect of biochar on the accumulation and distribution of cadmium in tobacco (*Yunyan 87*) at different developmental stages. Ecotoxicology and Environmental Safety, 207: 111295-111305.
- Zahangeer Alam M, McGee R, Hoque MA, Ahammed GJ and Carpenter-Boggs L. 2019. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi, selenium and biochar on photosynthetic pigments and antioxidant enzyme activity under arsenic stress in mung bean (*Vigna radiata*). Frontiers in Physiology, 10: 193-205.
- Zhang L, Pei Y, Wang H, Jin Z, Liu Z, Qiao Z, Fang H and Zhang Y. 2015. Hydrogen sulfide alleviates cadmium-induced cell death through restraining ROS accumulation in roots of *Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 1: 1-11.
- Zhou ZS, Guo K, Elbaz AA and Yang ZM. 2009. Salicylic acid alleviates mercury toxicity by preventing oxidative stress in roots of *Medicago sativa*. Environmental and Experimental Botany, 65: 27-34.
- Zhuang P, Shu W, Li Z, Liao B, Li J and Shao J. 2009. Removal of metals by sorghum plants from contaminated land. Journal of Environmental Sciences, 21(10): 1432-1437.