

توانایی گیاه پالایی سرب توسط سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) تحت کاربرد بیوچار و اسید سالیسیلیک

سیده آسیه جلالی^۱، فائزه زعفریان^{۲*}، رقیه حسن پور^۳، ارستو عباسیان^۴
۱ و ۲ و ۳ و ۴ - به ترتیب کارشناسی ارشد، دانشیار، دکتری و استادیار، گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۲۳ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۱)

چکیده

به منظور بررسی اثر بیوچار و اسید سالیسیلیک بر گیاه پالایی فلز سنگین سرب (Pb) توسط سورگوم (*Sorghum bicolor* L.)، آزمایشی به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در گلخانه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در سال ۱۳۹۸ انجام شد. تیمارها شامل پنج سطح سرب (صفر (شاهد)، ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۶۰۰ میلی گرم سرب در کیلوگرم خاک)، دو سطح بیوچار (عدم مصرف و مصرف ۲۰ گرم بیوچار در کیلوگرم خاک) و دو سطح اسید سالیسیلیک (عدم محلول پاشی و محلول پاشی دو میلی مولار) بودند. وزن خشک شاخساره و ریشه، غلظت سرب در شاخساره، ریشه و خاک، شاخص تحمل، فاکتور انتقال و تجمع زیستی شاخساره و میزان جذب سرب در شاخساره اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار و اسید سالیسیلیک، سبب کاهش اثر منفی سرب در وزن خشک سورگوم و بهبود صفات مرتبط با گیاه پالایی شدند. بیشترین غلظت سرب شاخساره و ریشه (به ترتیب ۶۷۱/۱۷ و ۳۹۸/۷۰ میلی گرم سرب در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار مصرف بیوچار و اسید سالیسیلیک در ۱۶۰۰ میلی گرم سرب خاک به دست آمد. به طور کلی نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار و اسید سالیسیلیک در گیاه سورگوم، سبب بهبود استخراج گیاهی سرب در خاک آلوده می شود.

واژه های کلیدی: استخراج گیاهی، جذب سرب، خاک، فلز سنگین، وزن خشک.

Ability of lead phytoremediation by sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under the application of biochar and salicylic acid

Seyedeh Asieh Jalali¹, Faezeh Zaefarian^{2*}, Roghayeh Hasanpour³, Arastoo Abbasian⁴
1,2,3,4. Agronomy Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
(Received: October 14, 2020 - Accepted: December 1, 2020)

ABSTRACT

In order to investigate the effect of biochar and salicylic acid on phytoremediation of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) to lead heavy metal (Pb), a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with 4 replications in the greenhouse of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University in 2019. Treatments were five levels of lead (0, 400, 800, 1200 and 1600 mg Pb kg⁻¹ soil), two levels of biochar (no-consumption and consumption of 20 g biochar kg⁻¹soil) and two levels of salicylic acid (no-foliar application and 2 mM foliar application). Shoot and root dry weights, tolerance index, Pb concentration in shoot, root and soil, transfer and bioaccumulation factors and Pb uptake in the shoot were measured. The results showed that the application of biochar and salicylic acid reduced the negative effect of Pb on dry weight of sorghum and improved traits related to phytoremediation. The highest Pb concentration in shoot and root (671.17 and 398.70 mg Pb kg⁻¹ dry matter, respectively) were obtained in the combined treatment of biochar and salicylic acid application at 1600 mg Pb kg⁻¹ soil. Generally, the results showed that biochar and salicylic acid application in sorghum improves Pb phytoextraction in contaminated soil.

Keywords: Dry weight, heavy metal, lead uptake, phytoextraction, soil.

مقدمه

(Hatami, 2017)؛ از این رو، اصلاح خاک های آلوده به سرب الزامی است (Orekanti *et al.*, 2019). یکی از روش های مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست

ورود سرب به زنجیره غذایی مانند سایر فلزات سنگین موجود در خاک، می تواند تهدیداتی را برای سلامت انسان و حیوانات به دنبال داشته باشد & Fahimirad

* Corresponding author E-mail: fa.zaefarian@sanru.ac.ir

آزمایشی به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در گلخانه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در اواخر بهار سال ۱۳۹۸ صورت گرفت. تیمارهای این آزمایش شامل سرب (صفر، ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم از منبع نیترات سرب)، بیوپچار (عدم مصرف و مصرف ۲۰ گرم بیوپچار به ازای هر کیلوگرم خاک) و اسید سالیسیلیک (شامل عدم محلول‌پاشی و محلول‌پاشی دو میلی‌مولار اسید سالیسیلیک) بود.

غلظت‌های مورد بررسی سرب با در نظر داشتن حد مجاز سرب در خاک (۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) (Chen *et al.*, 2003) و بر اساس گزارشات مختلف در غلظت‌های چندین برابر سمی در نظر گرفته شدند (Pereira *et al.*, 2007; Amanifar *et al.*, 2012). بیوپچار استفاده شده در این آزمایش از مواد اولیه سلولزی شامل بقایای درختان جنگلی از شرکت کربن اکتیو بشل تهیه شد که مشخصات آن شامل عدد ید: ۹۵۰ تا ۱۱۰۰ میلی‌گرم بر گرم، مساحت سطح بر اساس استاندارد ASTM: ۹۵۰ تا ۱۱۰۰ متر مربع بر گرم، عدد متیلن بلو: ۲۵۰-۱۵۰ میلی‌گرم بر گرم، میزان رطوبت: سه تا چهار درصد، pH: ۸/۵، میزان خاکستر: چهار تا پنج درصد، دانه‌بندی: ۰/۱ میلی‌متر و کمتر بود. غلظت بیوپچار نیز بر اساس غلظت معمول در آزمایشات پیشین سایر محققین (Ahmed *et al.*, 2016; Ibrahim *et al.*, 2019) انتخاب شد. برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۱ آمده است.

برای هر گلدان، چهار 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 شد. به منظور آلوده‌سازی یکنواخت خاک، به مدت ۲۰ روز آبیاری از طریق زیرگلدانی صورت گرفت. در ۲۹ خرداد، تعداد پنج بذر برای هر گلدان در نظر گرفته شد که پس از استقرار گیاه، تنک شدند و در نهایت در هر گلدان، یک بوته باقی ماند. یک ماه پس از کاشت، اسید سالیسیلیک بر شاخساره محلول‌پاشی شد و حدود دو

برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، گیاه‌پالایی می‌باشد (Deng & Cao, 2016) که برای بهبود راندمان آن، بهینه‌سازی روش‌های کشاورزی صورت می‌گیرد (Cioica *et al.*, 2019)، به طوری که از روش‌های مختلفی برای کاهش اثرات غلظت بالای فلزات سنگین موجود در خاک، استفاده می‌شود. در این راستا، استفاده از بیوپچار، روش موثری در جهت کاهش سمیت فلزات سنگین می‌باشد. بیوپچار به دلیل ظرفیت بالای نگهداشت آب، بهبود رشد گیاه را به دنبال دارد (Birja *et al.*, 2017). همچنین کاربرد بیوپچار سبب بهبود ظرفیت جذب سطحی خاک‌ها می‌شود و ممکن است بر سمیت و انتقال فلز در خاک تاثیر گذارد (Liu & Zhang, 2009). اسید سالیسیلیک نیز به عنوان یکی از تنظیم‌کننده‌های رشد، به افزایش کارآمدی گیاهان در گیاه‌پالایی کمک می‌کند (Baghaie & Aghilizefreei, 2020). در واقع کاربرد خارجی تنظیم‌کننده‌های رشد ممکن است با تحریک رشد و کاهش تنش‌های زیستی و غیرزیستی، موجب بهبود فرایند گیاه‌پالایی شوند (Cabello-Conejo *et al.*, 2013). از طرفی، یک گونه گیاهی مناسب جهت گیاه‌پالایی باید دارای ویژگی‌هایی چون رشد سریع و فراوان، پراکندگی زیاد در منطقه مورد مطالعه و توان بالقوه جهت جذب و تجمع فلزات سنگین باشد (Hasanpour *et al.*, 2019). همچنین، توانایی پالایش و جذب عناصر سنگین به وسیله سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) گزارش شده است (Galavi *et al.*, 2010). از آنجا که پراکندگی فلزات سنگین رو به افزایش است، کاربرد بیوپچار و اسید سالیسیلیک، یکی از روش‌های ارزان و آسان برای بهبود رشد گیاهان محسوب می‌شوند؛ بنابراین هدف از انجام این آزمایش، بررسی اثرگذاری بیوپچار و اسید سالیسیلیک بر گیاه‌پالایی سورگوم تحت آلودگی خاک به فلز سنگین سرب می‌باشد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثر بیوپچار و اسید سالیسیلیک بر توانایی گیاه‌پالایی سورگوم در شرایط تنش سرب،

جهت تعیین وزن خشک به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شدند و با ترازوی دیجیتالی، وزن خشک نمونه‌ها تعیین شد.

ماه بعد از کاشت در مرحله حداکثر رشد رویشی یعنی قبل از گلدهی، سورگوم برداشت شد. پس از برداشت شاخساره، ریشه‌ها از گلدان خارج و در نهایت با آب شستشو شدند. سپس، نمونه‌های شاخساره و ریشه

جدول ۱- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1. Physicochemical properties of the experimental site soil

Pb	K	P	N	EC	pH	Soil texture
	Available(mg Kg ⁻¹)		(%)	(dS m ⁻¹)		
6.274	266	10	0.18	1.723	7.21	Clay

بین دو مرحله می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایش بر وزن خشک شاخساره و ریشه گیاه سورگوم (جدول ۲) نشان داد که سه اثر ساده سرب، بیوپچار و اسید سالیسیلیک و اثر دوگانه سرب و بیوپچار در هر دو صفت مذکور معنی‌دار شد، درحالی‌که سایر اثرات دوگانه و سه‌گانه برای وزن خشک شاخساره و ریشه معنی‌دار نشد (جدول ۲).

برهمکنش اثر بیوپچار و سرب بر صفت وزن خشک شاخساره (شکل ۱ الف) نشان می‌دهد که روند تغییرات وزن خشک شاخساره تحت تیمار عدم مصرف بیوپچار و مصرف بیوپچار به صورت دو تکه‌ای تا غلظت ۱۱۱۱/۴ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک افزایش و با افزایش غلظت سرب از این حد، کاهش یافت (شکل ۱ الف). در تیمار مصرف بیوپچار در بالاترین سطح سرب نسبت به سطح صفر آن، وزن خشک شاخساره حدود ۱۸/۳۸ درصد کاهش یافت، درحالی‌که در تیمار عدم مصرف بیوپچار در بالاترین سطح سرب نسبت به سطح صفر آن، ۳۹/۳۴ درصد کاهش نشان داد (شکل ۱ الف). همچنین نتایج آزمایش نشان داد که محلول‌پاشی با اسید سالیسیلیک موجب افزایش ۳/۱۱ درصدی وزن خشک شاخساره گیاه سورگوم نسبت به عدم محلول‌پاشی شد (شکل ۱ ب).

با توجه به برهمکنش اثر بیوپچار و سرب بر صفت وزن خشک ریشه (شکل ۲ الف)، در تیمار مصرف بیوپچار با افزایش سطوح سرب از صفر تا ۸۰۰، وزن خشک ریشه

همچنین غلظت سرب در گیاه (Woodis Jr *et al.*, 1977) و غلظت سرب قابل استفاده خاک (Lindsay & Norvell, 1978) اندازه‌گیری شد. علاوه بر صفات گفته شده، شاخص تحمل و برخی از صفات مرتبط با گیاه‌پالایی از طریق روابط ۱ تا ۴ محاسبه شد.

وزن خشک شاخساره در خاک آلوده (g) × ۱۰۰ = شاخص تحمل
وزن خشک شاخساره در خاک غیر آلوده (g)

غلظت فلز سرب در شاخساره (mg kg⁻¹)
غلظت فلز سرب در ریشه (mg kg⁻¹) = فاکتور انتقال

رابطه (۲) (Zhang *et al.*, 2002)

غلظت فلز سرب در شاخساره (mg kg⁻¹)
غلظت فلز سرب قابل جذب خاک (mg kg⁻¹) = فاکتور تجمع زیستی شاخساره

رابطه (۳) (Ma *et al.*, 2001)

جذب سرب در شاخساره = غلظت سرب در شاخساره × وزن خشک شاخساره

رابطه (۴) (Aravind & Prasad, 2005)

که در آن، واحد جذب سرب و غلظت سرب در شاخساره و وزن خشک شاخساره، به ترتیب میلی‌گرم در گیاه، میلی‌گرم در گرم و گرم در گرم در گیاه است.

آنالیز آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS و کمی‌سازی اثر تنش سرب از طریق تجزیه رگرسیونی و برازش معادله خطی یک تکه (رابطه ۵) و دو تکه‌ای (رابطه ۶) صورت گرفت و برای رسم منحنی‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

رابطه (۵) $y = b_1x + a$

رابطه (۶) $y = b_1x + a \text{ if } x \leq x_0$

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

در این روابط، a: عرض از مبدا در سطح بدون تنش (غلظت صفر تیمار سرب)، b₁ و b₂: شیب تغییرات مؤلفه به ترتیب در مرحله ۱ و ۲ و x₀: نقطه چرخش

با شیب 0.000020 واحد افزایش یافت و سپس با شیب -0.00018 کاهش یافت (شکل ۲ الف). همچنین شکل ۲ ب نشان می‌دهد که محلول‌پاشی با اسید سالیسیلیک، موجب افزایش $8/56$ درصدی وزن خشک ریشه نسبت به عدم محلول‌پاشی شده است.

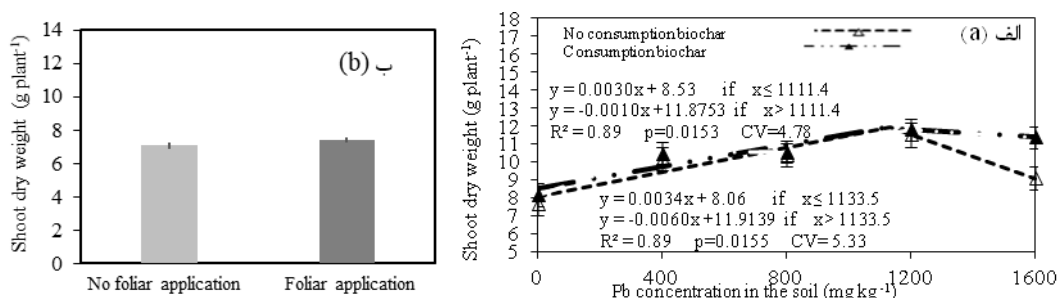
جدول ۲- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر صفات مورد مطالعه

Table 2. Variance analysis of the effect of experimental treatments on the studied traits

S.O.V	df	Shoot dry weight	Root dry weight	Tolerance factor	Pb concentration in shoot	Pb concentration in root	Pb concentration in soil	Transfer factor	bioaccumulation factor	Pb uptake in shoot
Lead (Pb)	4	29.59**	0.095*	0.46**	851041.72**	232999.83**	32216.98**	9.35**	41.36**	89.35**
Biochar (B)	1	10.00**	0.76**	0.16**	57.83 ^{ns}	11984.42**	1044.16**	0.43**	1.74**	1.91**
Salicilic acid (SA)	1	1.83*	0.67**	0.03*	39640.60**	31707.07**	4210.22**	0.12**	17.29**	5.75**
Pb×B	4	3.21**	0.13*	0.05**	1281.14**	3713.62**	348.46**	0.87**	0.03 ^{ns}	0.71**
Pb×SA	4	0.35 ^{ns}	0.05 ^{ns}	0.01 ^{ns}	17480.01**	1225.48**	1676.92**	0.78**	4.60**	2.26**
Pb×SA	1	0.14 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.002 ^{ns}	591.55*	1143.07**	380.62**	0.57**	0.05 ^{ns}	0.16**
Pb×B×SA	4	0.35 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.005 ^{ns}	1818.88**	867.07**	353.12**	0.35**	0.04 ^{ns}	0.30**
Error	60	0.33	0.04	0.005	100.91	33.33	9.30	0.006	0.02	0.01
CV (%)		5.66	8.52	5.66	5.09	5.45	4.44	4.65	6.34	5.16

*, ** و ns: به ترتیب معنی‌دار در سطح پنج و یک درصد و عدم معنی‌داری.

*, ** and ns: Significance at 5% and 1% of probability levels and non significant, respectively.

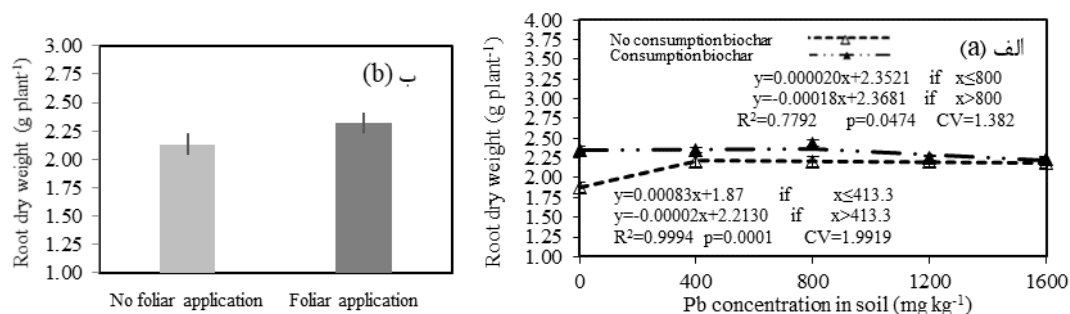


شکل ۱- برهمکنش اثر بیوچار و سرب بر روند تغییرات وزن خشک شاخساره در پاسخ به افزایش غلظت سرب خاک (الف) و اثر ساده اسید سالیسیلیک بر وزن خشک شاخساره تحت شرایط تنش سرب (ب)

Figure 1. Interaction effect of biochar and Pb on shoot dry weight changes trend in response to the increasing soil Pb concentration (a) and the simple effect of salicylic acid on shoot dry weight under Pb stress (b)

می‌شود (Tafvizi *et al.*, 2014). انباشته شدن فلزات سنگین در محیط ریشه، سبب کاهش جذب آب و عناصر غذایی، مهار فعالیت آنزیم‌ها، کاهش متابولیسم سلولی، کاهش فتوسنتز، کاهش جذب و در نهایت منجر به کاهش تولید ماده خشک می‌شوند (Countrey, 2006). ایجاد تنش اکسیداتیو در گیاهان در معرض فلزات سنگین، سبب اختلال در سوخت و ساز طبیعی سلول و اختلال در تنفس و فتوسنتز می‌شود (Mishra *et al.*, 2006).

سرب تا حدودی باعث افزایش وزن گیاه شد؛ این افزایش را می‌توان به تجمع این فلز در اندام گیاهی برای مقابله با تنش فلزات نسبت داد (Mousavi *et al.*, 2020). اما کاهش وزن خشک اندام‌های گیاهی از حدی با توجه به نتایج، نشان‌دهنده کاهش جذب مواد غذایی و اختلال در انتقال ترکیبات ضروری از ریشه‌ها به اندام هوایی می‌باشد (Mousavi *et al.*, 2020). سرب بر جذب فلزاتی مانند آهن که در فتوسنتز نقش دارند، مؤثر است و مانع جذب آن‌ها توسط گیاه



شکل ۲- برهمکنش اثر بیوچار و سرب بر روند تغییرات وزن خشک ریشه در افزایش غلظت سرب خاک (الف) و اثر ساده اسید سالیسیلیک بر وزن خشک ریشه تحت شرایط تنش سرب (ب)

Figure 2. Interaction effect of biochar and Pb on the of root dry weight changes trend in the increasing soil Pb concentration (a) and simple effect of salicylic acid on root dry weight under Pb stress (b)

بخشید و اثرات تنش را تخفیف داد (Rao *et al.*, 2012). در مطالعه‌ای در زمینه اثر غلظت‌های مختلف سرب و اسید سالیسیلیک بر برخی از شاخص‌های رشد گیاه بادمجان (*Solanum melongena* L.)، نتایج نشان داد که تیمار استات سرب، سبب کاهش شاخص‌های رشد شد، ولی تیمار با اسید سالیسیلیک تا حد زیادی سبب بهبود شاخص‌های رشد گیاه می‌شود (Tavakoli *et al.*, 2011). در واقع کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط تنش، منجر به افزایش فتوسنتز و سرعت رشد در اثر افزایش شاخص سطح برگ و تراکم کلروفیل در واحد سطح (Rajasekaran *et al.*, 2002) برگ می‌شود. همچنین اسید سالیسیلیک از طریق سنتز پروتئین‌های خاصی به نام پروتئین کیناز که وظیفه تنظیم تقسیم، تمایز و ریختزایی سلول را بر عهده دارند، فرایندهای فیزیولوژیکی مختلف مثل رشد و تکامل گیاه را تنظیم می‌کند (Moradi & Pourghasemian, 2018).

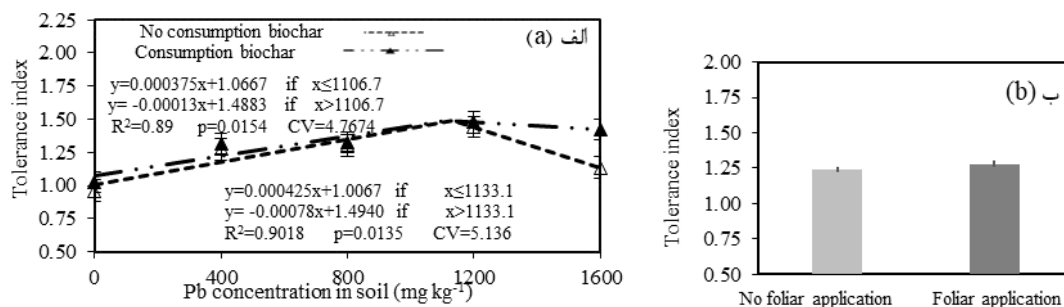
نتایج تجزیه رگرسیونی اثر سطوح مختلف سرب خاک بر شاخص تحمل سرب در گیاه سورگوم (شکل ۳ الف) نشان داد که در تیمار مصرف بیوچار از صفر تا ۱۱۰۶/۷ میلی‌گرم، سرب در کیلوگرم خاک با شیب ۰/۰۰۰۳۷۵ افزایش و در ادامه با شیب ۰/۰۰۰۱۳- کاهش یافت. همچنین شاخص تحمل در گیاهانی که با اسید سالیسیلیک

همچنین نتایج این مطالعه نشان داد در گیاهان تیمار شده با بیوچار نسبت به عدم استفاده از بیوچار، وزن خشک شاخساره و ریشه بیشتری تحت شرایط تنش سرب تولید شد (شکل ۱ الف، ۲ الف). یکی از دلایل افزایش رشد گیاهان در خاک آلوده به فلزات سنگین بر اثر افزودن مواد آلی، افزایش کربن آلی کل و کربن آلی محلول است که سبب ایجاد محیطی مناسب جهت رشد گیاه می‌شوند (Hanc *et al.*, 2009). همسو با این نتایج، در مطالعه‌ای گزارش شد که گیاه کاهو (*Lactuca sativa* L.) با مصرف بیوچار نسبت به شاهد، زیست توده بیشتری در شرایط تنش فلزات سنگین سرب و کادمیم تولید کرد (Valizadeh Ghale *et al.*, 2020). همچنین در این راستا، پژوهشگرانی به این نتیجه رسیدند که کاربرد بیوچار، باعث افزایش جذب فلزات سنگین کادمیم، سرب، روی و نیکل در خاک‌های آلوده توسط گیاه علف پشمکی (*Bromus tomentellus* L.) می‌شود (Jafari *et al.*, 2017).

مشابه نتایج این مطالعه، گزارش‌های متعددی مبنی بر استفاده اسید سالیسیلیک در جهت کاهش عوارض ناشی از تجمع فلزات سنگین از قبیل کاهش زیست توده در گیاهان وجود دارد (شکل ۱ ب، ۲ ب)؛ به‌عنوان مثال گزارش شده است که کاربرد کادمیم، باعث کاهش وزن تر و خشک ریشه و طول ریشه و ساقه ذرت (*Zea mays* L.) شد، ولی اسید سالیسیلیک این کاهش را در اجزای گیاه، بهبود

سنگین می‌باشد و سورگوم به دلیل این که شاخص تحمل بالای یک دارد (شکل ۳ الف، ب)، جزو گیاه بسیار متحمل طبقه‌بندی می‌شود (Lux et al., 2004).

محلول پاشی شدند نسبت به گیاهان شاهد (عدم محلول پاشی اسید سالیسیلیک)، به میزان ۳/۰۲۵ درصد افزایش نشان دادند (شکل ۳ ب). شاخص تحمل، نشان دهنده درجه تحمل گیاه به فلزات



شکل ۳- برهمکنش اثر سرب و بیوچار بر روند تغییرات شاخص تحمل در گیاه سورگوم در پاسخ به افزایش غلظت سرب خاک (الف) و اثر ساده اسید سالیسیلیک بر شاخص تحمل تحت شرایط تنش سرب (ب)

Figure 3. Interaction effects of Pb and biochar on the tolerance index changes trend in sorghum in response to increasing soil Pb concentration (a) and simple effect of salicylic acid on tolerance index under Pb stress (b)

سنگین در اندام‌های گیاه می‌شود؛ قابل ذکر است که غلظت سرب در شاخساره حدوداً دو برابر ریشه بود (جدول ۳) و این افزایش غلظت سرب در اندام‌های گیاهی با کاهش زیست توده همراه بود (شکل ۱ الف، ۲ الف). در همین راستا، نتایج پژوهشی تاثیر بیوچار باگاس نیشکر بر رشد گیاه ذرت (*Zea mays* L.) در خاک آلوده به کادمیم و سرب حاکی از آن بود که افزایش کاربرد کادمیم و سرب، غلظت این دو عنصر در اندام هوایی و ریشه گیاه ذرت را به شدت افزایش داد، درحالی‌که وزن خشک اندام هوایی را ۴۰ تا ۵۰ درصد و ریشه را بین ۶۰ تا ۷۰ درصد کاهش داد.

با توجه به جدول ۳ و با افزایش سطوح تیمار سرب، غلظت سرب قابل استفاده در خاک افزایش یافت، درحالی‌که کاربرد جداگانه و تلفیقی بیوچار و اسید سالیسیلیک، غلظت سرب قابل استفاده خاک در همان سطح تیمار سرب کاهش نشان داد. تیمار تلفیقی مصرف بیوچار و محلول پاشی اسید سالیسیلیک در سطح ۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب، باعث کاهش ۴۰/۴۶ درصدی غلظت سرب قابل استفاده خاک نسبت به شاهد (در سطح ۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک) شد. بیوچار به دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی بالا،

با توجه به جدول ۲، تمامی اثرات ساده، دوگانه و سه‌گانه مورد مطالعه بر میزان غلظت سرب در ریشه گیاه سورگوم و غلظت سرب قابل استفاده خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، درحالی‌که تمامی اثرات به غیر اثر ساده بیوچار در غلظت سرب شاخساره معنی‌دار شد؛ بنابراین برای صفات مذکور برش‌دهی اثر متقابل انجام شد (جدول ۳).

نتایج حاصل از مقایسه میانگین برش‌دهی اثر سرب در سطوح بیوچار و اسید سالیسیلیک (جدول ۳) نشان داد که با افزایش سطوح سرب در خاک، غلظت سرب در شاخساره و ریشه افزایش یافت، به طوری‌که بیشترین غلظت سرب در شاخساره و ریشه، به ترتیب ۶۷۱/۱۷ و ۳۹۸/۷۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم ماده خشک در تیمار مصرف توام بیوچار و اسید سالیسیلیک در سطح ۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب در خاک به دست آمد که نسبت به شاهد (عدم مصرف بیوچار و عدم محلول پاشی اسید سالیسیلیک در سطح ۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب)، به ترتیب ۲۴/۶۸ و ۹۵/۹۶ درصد افزایش یافت.

همچنین نتایج پژوهش حاضر نشان داد که افزایش غلظت سرب در خاک، منجر به افزایش غلظت این فلز

این آزمایش و با توجه به افزایش غلظت سرب شاخساره و ریشه می‌توان گفت که بیوچار باعث افزایش تحرک این فلز به اندام‌های گیاهی و در نهایت سبب کاهش سرب قابل استفاده در خاک شده است؛ از طرفی اسید سالیسیلیک با بهبود رشد و انتقال بیشتر سرب به اندام هوایی، سرب قابل استفاده خاک را کاهش داده است.

وفور گروه‌های عاملی و سطح ویژه بالا، جذب، تثبیت و کاهش غلظت قابل جذب فلزات سنگین را در خاک در پی دارد؛ همچنین، اشباع بار منفی موجود در سطوح بیوچار توسط سرب و کاهش توانایی جذب آن‌ها، منجر به افزایش غلظت قابل جذب سرب در خاک می‌شود (Biria *et al.*, 2017). بنابراین این مواد به شکل محلول و کلوئیدی، تحرک فلزات سنگین در خاک را افزایش می‌دهند (Tipping *et al.*, 2003).

جدول ۳- مقایسه میانگین برش‌دهی برهمکنش اثر تیمارهای آزمایشی بر صفات مرتبط با قابلیت گیاه‌پالایی سورگوم

Table 3. Mean comparison of the cutting of the interaction effect of experimental treatments the on traits related to phytoremediation of sorghum

Pb (mg kg ⁻¹)	Biochar	Salicylic acid	Pb concentration in shoots (mg kg ⁻¹)	Pb concentration in roots (mg kg ⁻¹)	Available Pb concentration in soil (mg kg ⁻¹)	Transfer factor	Pb uptake in shoot (mg plant ⁻¹)
0	No consumption	No foliar application	0.07 ^d	0.64 ^c	1.75 ^a	0.11 ^c	0.001 ^d
	No consumption	Foliar application	0.57 ^b	0.94 ^c	1.66 ^b	0.61 ^b	0.004 ^b
	Consumption	No foliar application	0.42 ^a	0.78 ^b	1.69 ^b	0.54 ^b	0.003 ^c
400	Consumption	Foliar application	0.92 ^a	0.99 ^a	1.55 ^c	0.94 ^a	0.01 ^a
	No consumption	No foliar application	46.43 ^c	32.23 ^c	56.25 ^a	1.44 ^b	0.45 ^c
	No consumption	Foliar application	62.66 ^b	40.56 ^a	52.73 ^c	1.55 ^a	0.69 ^a
800	Consumption	No foliar application	58.16 ^b	37.60 ^b	54.59 ^b	1.54 ^{ab}	0.59 ^b
	Consumption	Foliar application	67.50 ^a	41.51 ^a	45.99 ^d	1.62 ^a	0.72 ^a
	No consumption	No foliar application	99.08 ^d	38.87 ^c	67.08 ^a	2.55 ^c	1.2 ^c
1200	No consumption	Foliar application	135.39 ^b	50.68 ^a	64.50 ^b	2.67 ^{ab}	1.42 ^a
	Consumption	No foliar application	124.93 ^c	47.36 ^b	64.82 ^{ab}	2.64 ^b	1.31 ^b
	Consumption	Foliar application	139.19 ^a	50.99 ^a	56.54 ^c	2.73 ^a	1.48 ^a
1600	No consumption	No foliar application	201.26 ^d	74.84 ^c	99.75 ^a	2.69 ^a	2.30 ^d
	No consumption	Foliar application	224.94 ^b	162.54 ^b	81.35 ^b	1.38 ^b	2.61 ^b
	Consumption	No foliar application	216.08 ^c	158.77 ^b	88.58 ^b	1.36 ^b	2.47 ^c
1600	Consumption	Foliar application	237.49 ^a	179.32 ^a	86.20 ^b	1.33 ^b	2.88 ^a
	No consumption	No foliar application	538.31 ^b	203.46 ^d	183.23 ^a	2.64 ^a	4.79 ^d
	No consumption	Foliar application	657.00 ^a	332.21 ^b	113.45 ^c	1.97 ^b	6.08 ^b
1600	Consumption	No foliar application	466.88 ^c	265.73 ^c	140.43 ^b	1.76 ^c	5.27 ^c
	Consumption	Foliar application	671.17 ^a	398.70 ^a	109.10 ^c	1.68 ^c	7.69 ^a

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند، براساس آزمون LSD و در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند. Means with the same letters in the same column are not significantly different at 5% of probability level, based on the LSD test.

افزایش و سپس در ادامه کاهش یافت؛ به عبارت دیگر، بیشترین فاکتور انتقال در تیمار ۸۰۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک به‌دست آمد. غلظت‌های صفر، ۴۰۰ و ۸۰۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک مصرف توام بیوچار و اسید سالیسیلیک، باعث افزایش فاکتور انتقال نسبت به شاهد (عدم مصرف بیوچار و عدم محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک) شد؛ اما با کاربرد توام بیوچار و اسید سالیسیلیک در سطوح ۱۲۰۰ و ۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب، کاهش فاکتور انتقال نسبت به شاهد (عدم مصرف بیوچار و عدم محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک) مشاهده شد. فاکتور بالای فلزات سنگین، نشان دهنده کارآمدی گیاهان در گیاه‌پالایی می‌باشد

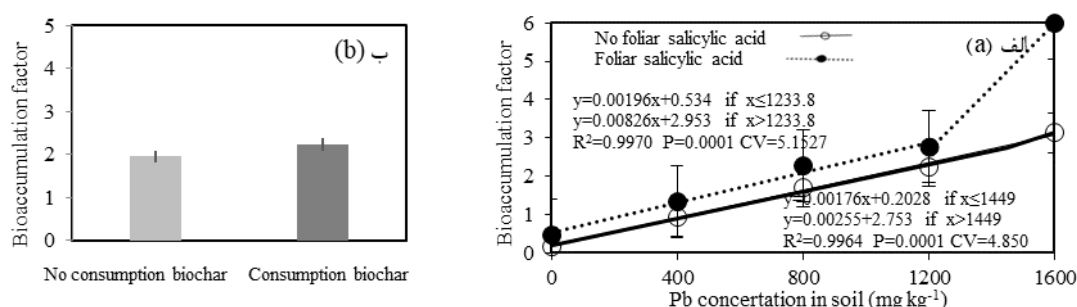
نتایج تجزیه واریانس صفات فاکتور انتقال، تجمع زیستی شاخساره و جذب سرب در شاخساره در جدول ۲ نشان می‌دهد که تمامی اثرات ساده سرب، بیوچار و اسید سالیسیلیک و اثرات دوگانه و سه‌گانه بر فاکتور انتقال و جذب سرب در شاخساره در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). همچنین تمامی اثرات ساده و اثر دوگانه سرب و اسید سالیسیلیک در فاکتور تجمع زیستی شاخساره معنی‌دار شد (جدول ۲).

برش‌دهی اثرات سه‌گانه بر فاکتور انتقال (جدول ۳) نشان داد که با افزایش غلظت سرب از صفر تا ۸۰۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک، فاکتور انتقال

ب). بر اساس فاکتور تجمع زیستی شاخساره که در محدوده یک تا ۱۰ می‌باشد، سورگوم به‌عنوان تجمع‌کننده سرب طبقه‌بندی می‌شود (Baker, 1981). همچنین جدول ۳ نشان داد با افزایش سطوح سرب، میزان شاخص جذب افزایش یافت؛ بیشترین جذب سرب در شاخساره در تیمار ۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک و کاربرد توام بیوچار و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک (۷/۶۹ میلی‌گرم در بوته) مشاهده شد که نسبت به شاهد (عدم مصرف بیوچار و عدم محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در ۱۶۰۰ میلی‌گرم سرب)، میزان جذب سرب در شاخساره ۶۰/۷۳ درصد افزایش یافت (جدول ۳). در این راستا، اثرات مثبت اسید سالیسیلیک در افزایش شاخص جذب و فاکتور غلظت نیکل در ریشه ذرت (*Zea mays* L.) نیز گزارش شده است (Shafiq et al., 2017).

(Hussain et al., 2013).

کاربرد تیمار تلفیقی بیوچار و اسید سالیسیلیک در بیشتر سطوح سرب، باعث افزایش فاکتور انتقال شد (جدول ۳). ضریب تعیین (R^2) که نشان‌دهنده رابطه بین فاکتور انتقال و تیمار سرب می‌باشد حاکی از آن است که توانایی انتقال سرب از خاک به شاخساره به میزان سرب در خاک بستگی دارد (جدول ۳). فاکتور انتقال بالاتر از یک، نشان می‌دهد که فلزات سنگین در شاخساره تجمع می‌یابند (Prasad et al., 2001). اثر اسید سالیسیلیک در سطوح سرب خاک در فاکتور تجمع زیستی شاخساره سورگوم (شکل ۴ الف) به‌صورت دوتکه‌ای افزایش یافت؛ بوته‌هایی که با اسید سالیسیلیک محلول‌پاشی شدند، فاکتور تجمع زیستی بالاتری نشان دادند. همچنین در بوته‌هایی که در خاک حاوی بیوچار کشت شدند، این فاکتور حدود ۱۵/۱۵ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت (شکل ۴



شکل ۴- برهمکنش اثر اسید سالیسیلیک و سرب بر روند تغییرات فاکتور تجمع زیستی شاخساره در پاسخ به افزایش غلظت سرب خاک (الف) و اثر ساده بیوچار بر فاکتور تجمع زیستی شاخساره تحت شرایط تنش سرب (ب)

Figure 4. Interaction effect of the salicylic acid and Pb on the bioaccumulation factor changes trend in response to increasing soil Pb concentration (a) and simple effect of biochar on bioaccumulation factor under Pb stress (b)

محلول خاک شده است و در نتیجه انتقال آن به گیاه افزایش یافته است (Jafari et al., 2017). این امر می‌تواند به دلیل بهبود ظرفیت تبادل کاتیونی و وضعیت زهکشی خاک (Razzaghi & Rezaie, 2017)، تعامل با چرخه مواد غذایی خاک از طریق تعدیل pH خاک و کاهش شستشوی عناصر غذایی در اثر بیوچار باشد (Glaser, 2007). در واقع نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از بیوچار با بهبود ساختمان خاک و تامین عناصر غذایی، احتمالاً موجب افزایش

نقش اسید سالیسیلیک در کاهش تنش و بهبود رشد گیاه، به خاصیت هورمونی و آنتی‌اکسیدانی و تاثیر آن روی تولید اسمولیت‌های آلی و تنظیم اسمزی نسبت داده شده است (Moradi & Pourghasemian, 2018). از طرفی بیوچار بسته به نوع فلز سنگین می‌تواند هم به‌عنوان تثبیت‌کننده در خاک و هم کمک‌کننده به استخراج گیاهی کمک کند (Arefi, 2015). افزایش جذب سرب در شاخساره سورگوم نشان می‌دهد که تیمار بیوچار باعث افزایش زیست‌فراهمی سرب در

ریشه و شاخساره افزایش یافت و گیاه سورگوم توانایی انتقال بیشتر سرب به شاخساره دارد. گیاه سورگوم به دلیل زیست توده مناسب و رشد سریع می‌تواند برای گیاه‌پالایی مناسب باشد. کاربرد اسید سالیسیلیک و بیوچار در بوته‌های سورگوم تحت تنش سرب، موجب رشد رویشی بهتر و در نهایت انباشت بیشتر سرب در اندام‌های گیاهی می‌شود؛ بنابراین، کشت سورگوم به همراه تیمار بیوچار و اسید سالیسیلیک جهت کاهش آلودگی سرب در خاک توصیه می‌شود.

رشد و کاهش سمیت می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از شاخص تحمل، فاکتور انتقال و تجمع زیستی شاخساره و جذب سرب در شاخساره، سورگوم کاندیدای مناسبی برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به سرب از طریق فرآیند استخراج گیاهی می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که با افزایش غلظت سرب، غلظت این عنصر سنگین در

REFERENCED

- Ahmed, I. A. M., Bykova, A., Akgöl, H., Çevik, İ., Rafique, M. & Ortaş, İ. (2016). Biochar doze and mycorrhiza application on sorghum plant growth and nutrient uptake. In: *Eurosoil Congress*, 16-21 Oct., WOW Convention Center, Istanbul-Turkey.
- Amanifar, S., Aliasgharzad. N., Najafi, N., Oustan, S. H. & Bolandnazar, S. (2012). Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Lead Phytoremediation by Sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Water and Soil Science*, 22(1), 155-170. (In Persian)
- Aravind, P. & Prasad, M. N. V. (2005). Cadmium-zinc interaction in hydroponic system using *Ceratophyllum demersum* L.: adaptive ecophysiology, biochemistry and molecular toxicology. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17, 3-20.
- Arefi, A. (2015). *The effect of mycorrhizal inoculation, sewage sludges and its biochar on Cd soil uptake under corn*. MS.c. Thesis. Isfahan University of Technology, Iran.
- Baghaie, A. H. & 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.
- Baker, A. J. M. (1981). Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*, 3, 643-654.
- Biria, M., Moezzzi, A. A. & Ameri Khan, H. (2017). Effect of *Sugarcane bagasse* made biochar on maize plant growth, grown in lead and cadmium contaminated soil. *Journal of Water and Soil*, 31(2), 609-626. (In Persian)
- Cabello-Conejo, M., Centofanti, T., Kidd, P., Prieto-Fernández, Á. & Chaney, R. (2013). Evaluation of plant growth regulators to increase nickel phytoextraction by *Alyssum* species. *International Journal of Phytoremediation*, 15, 365-75.
- Chen, M., Ma, L. Q., Cao, R. X., Melamed, R. & Singh S. P. (2003). Field demonstration of in situ immobilization of soil Pb using Pamendments. *Advances in Environmental Research*, 8, 93-102.
- Cioica, N., Tudora, C., Iuga, D., Deak, G., Matei, M., Nagy, E. M. & Gyorgy, Z. (2019). A review on phytoremediation as an ecological method for in situ clean up of heavy metals contaminated soils. *E3S Web of Conferences*, 112, 03024.
- Country, N. (2006). Influence of cadmium on growth of root vegetable and accumulation of cadmium in the edible root. *International Journal Applied Science and Engineering*, 3, 243-252.
- Deng, Z. & Cao, L. (2016). Fungal endophytes and their interactions with plants in phytoremediation. *Chemosphere*, 168, 1100-1106.
- Fahimirad, S. & Hatami, M. (2017). Heavy metal-mediated changes in growth and phytochemicals of edible and medicinal plants. In: M. Ghorbanpour & A. Varma (Ed), *Medicinal Plants and Environmental Challenges*. (pp. 259-277.) Springer.
- Galavi, M., Jalali, A. & Ramroodi, M. (2010). Effects of treated municipal wastewater on soil chemical properties and heavy metal uptake by sorghum (*Sorghum Bicolor* L.). *Journal of Agricultural Science*, 2(7), 235-271.
- Glaser, B. (2007). Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Biological Sciences*, 362(1478), 187-196.
- Hanc, A. P., Tlustos, J. & Szakova, J. (2009). Changes in cadmium mobility during composting and after soil application. *Waste Management*, 9, 2282-2288.

17. Hasanpour, R., Zaefarian, F., Rezvani, M. & 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.
18. Hussain, A., Abbas, N., Arshad, F., Akram, M., Khan, Z. I., Ahmad, K., Mansha, M. & Mirzaei F. (2013). Effects of diverse doses of lead (Pb) on different growth attributes of *Zea mays* L. *Agricultural Science*, 4(5), 262-265.
19. Ibrahim, M. E. H., Ali, A. Y. A., Elsiddig, A. M. I., Zhou, G., Nimir, N. E. A., Ahmad, I., Suliman, M. S. E., Elradi, S. B. M. & Salih, E. G. I. S. (2019). Biochar improved sorghum germination and seedling growth under salinity stress. *Agronomy Journal*, 112(2), 911-920.
20. Jafari, M., Moameri, M., Jahantab, E. & 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)
21. Lindsay, W. L. & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 421-428.
22. Liu, Z. & Zhang, F. S. (2009). Removal of lead from water using biochars prepared from hydrothermal liquefaction of biomass. *Journal of Hazardous Materials*, 167, 933-939.
23. Lux, A., Sottnikova, A., Opatrna, J. & Greger, M. (2004). Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity. *Physiologia Plantarum*, 120, 537-545.
24. Ma, L. Q., Komar, K. M., Tu, C., Zhang, W., Cai, Y. & Kenelly, E. D. (2001). A fern that hyper accumulates arsenic. *Nature*, 409, 579-582
25. Mishra, S., Srivastava, S. & Tripathi, P. D. (2006). Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Baccopa monnieri* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, 44, 25-37.
26. Moradi, R. & Pourghasemian, N. (2018). Effect of salicylic acid application on mitigating impacts of drought stress in marigold (*Calendula officinalis* L). *Water and Soil Science*, 28(2), 15-28.
27. Mousavi, S. A., Oveysi, M. & 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.
28. Orekanti, E. R., Muni, K. M. & Devarajan, S. K. (2019). Pilot study on phytoremediation of contaminated soils with different plant species. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 23(4), 1-13.
29. Pereira, B. F. F., Abreu, C. A., Romeiro, S., LagôaII, A. M. M. A. & Paz-González, A. (2007). Pb-phytoextraction by maize in a Pb-EDTA treated Oxisol. *Scientia Agricola*, 64(1), 52-60.
30. Prasad, M. N. V., Greger, M. & Landberg, T. (2001). *Acacia nilotica* L. bark removes toxic metals from solution: Corroboration from toxicity bioassay using *Salix viminalis* L. in hydroponic system. *International Journal of Phytoremediation*, 3, 289-300.
31. Rajasekaran, L. R., Stiles, A., Surette, M. A., Sturz, A.V., Blake, T. J, Caldwell, C. & Nowak, J. (2002). Stand establishment technologies for processing carrots: Effects of various temperature regimes on germination and the role of salicylates in promoting germination at low temperatures. *Canadian Journal of Plant Science*, 82, 443-450.
32. Rao, S. R., Qayyum, A., Razzaq, A., Ahmad, M., Mahmood, I. & 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.
33. Razzaghi, F. & Rezaie, N. (2017). Effects of different levels of biochar on soil physical properties with different textures. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 7(1), 75-88.
34. Shafiq, M., Ghasemi-Fasaei, R. & Ronaghi, A. (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)
35. Tafvizi, M., Motesharezadeh, B. & Savaghebi, G. R. (2014). Investigating the effects of lead contamination and foliar application of iron on some physiological characteristics in two forage corn (*Zea mays* L.) hybrids in calcareous soil. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 45(2), 213-226. (In Persian)
36. Tavakoli, M., Chehregani rad, A., Lariyazdi, H. & Pakdel, A. (2011). Study on the effects of different concentrations of Pb and salicylic acid on some growth factors in eggplant (*Solanum melongena* L.). *Journal of Plant Biology*, 3(7), 29-40. (In Persian)

37. Tipping, E., Rieuwerts, J., Pan, G., Ashmore, M. R., Lofts, S., Hill, M. T. R., Farago, M. E. & Thornton, I. (2003). The solid-solution partitioning of heavy metals (Cu, Zn, Cd, Pb) in upland soils of England and Wales. *Environmental Pollution*, 125, 213-225.
38. Valizadeh Ghale Beig, A., Nemati, S. H., Emami, H. & Aroie, H. (2020). The effect of cutflower-rose waste biochar on morphological traits and heavy metals in lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Syaho). *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 10(4), 21-35. (In Persian)
39. Woodis Jr, T. C., Hunter, G. B. & Johnson, F. J. (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. *Analytical Chemistry Acta*, 90, 127-136.
40. Zhang, G., Fukami, M. & Sekimoto, H. (2002). Influence of cadmium on mineral concentration and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seedling stage. *Field Crop Reserch*, 77, 3-98.