

Original article

Evaluation of growth responses and cadmium and lead accumulation capacity in different organs of sorghum (*Sorghum bicolor* L.)

Ahmad Bagheri¹, Mohammad Reza Rezaei² , Hossein Hammami^{3, 4} 

1. MSc. Student, Department of Environment, University of Birjand, Birjand, Iran

2. Associate Professor, Department of Environment Sciences, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran

3. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

4. Member of the Plant and Environmental Stresses Research Group, University of Birjand, Birjand, Iran

Received 22 November 2025; Revised 01 February 2024; Accepted 7 February 2024

Extended abstract

Introduction

Heavy metals (HMs) are commonly defined as metals with a density greater than 5 g cm⁻³. Lead (Pb), zinc (Zn), copper (Cu), cadmium (Cd), nickel (Ni), arsenic (As), iron (Fe), manganese (Mn), molybdenum (Mo), cobalt (Co), magnesium (Mg), mercury (Hg), chromium (Cr), silver (Ag), and selenium (Se) are among the metals commonly classified as HMs. Some HMs, such as copper (Cu), selenium (Se), and zinc (Zn), are essential in trace amounts for maintaining normal physiological functions but can be toxic at higher concentrations. Cadmium is a non-essential heavy metal that is highly toxic to humans, animals, and plants. Cadmium exhibits relatively high solubility in water, allowing it to enter plants through contaminated soil and water and subsequently propagate through the food chain when herbivores consume contaminated plant biomass. Lead is a heavy metal used in diverse sectors, including the military, chemical, healthcare, agricultural, petroleum, and mining industries. Consequently, lead is regarded as one of the most significant and pervasive contaminants globally. In light of the hazards posed by soil contamination with cadmium and lead, remediation of affected areas is essential to mitigate the risks associated with these pollutants. Phytoremediation, or bioremediation using plants, improves environmental quality and is regarded as a sustainable bioengineering approach for remediating contaminated ecosystems. During phytoremediation, plants can sequester or stabilize contaminants, thereby inhibiting their release into the environment. This study was conducted to examine the growth characteristics of sorghum and assess its capacity to absorb and transport cadmium and lead at different soil concentrations, given the importance of phytoremediation and the substantial growth potential of sorghum under adverse environmental conditions.

Materials and methods

A pot factorial experiment with three replications was conducted in the research greenhouse of the Faculty of Agriculture, University of Birjand, to assess the effects of cadmium and lead on sorghum growth and its potential for phytoremediation in a completely randomized design. The experiment included two metal types (cadmium and lead) and six soil metal concentrations: 0, 25, 50, 100, 200, and 400 mg kg⁻¹. The treatment soils were prepared by adding cadmium chloride and lead chloride. After harvesting, the plant parts were powdered using an electric grinder. Then, 0.5 g of each shoot and root sample was digested with 10 mL of a 9:4 mixture of HNO₃ and HClO₄. The samples were placed in a sand bath at 100 °C and heated until they became translucent. After digestion, the samples were diluted to a final volume of 20 mL with deionized water and filtered through Whatman No. 1 filter paper. The

* Corresponding author: Hossein Hammami; E-Mail: hhammami@birjand.ac.ir

cadmium and lead concentrations in the samples were determined using an atomic absorption spectrometer (Perkin-Elmer AAnalyst 700) at the Pollution Laboratory, Faculty of Environment, University of Birjand. Cadmium and lead concentrations were determined using calibration curves. Finally, the bioconcentration factor, bioaccumulation coefficient, transfer factor, transfer efficiency, and tolerance index were calculated.

Results and discussion

The comparison of means for plant height, greenness index, root dry weight, and shoot dry weight revealed reductions of 38.3%, 0.51%, 41.4%, and 38.9%, respectively, at the highest heavy metal concentration (400 mg kg⁻¹). The comparison of means regarding the effects of heavy metals on sorghum growth characteristics revealed that cadmium had a greater effect on plant height and root dry weight than lead, with corresponding effects of 29.6% and 30.8%, respectively. Increasing the concentrations of Cd and Pb resulted in increased levels of these metals in the roots and shoots. An increase in the concentration from 25 to 400 mg kg⁻¹ resulted in a 74.6% increase in heavy metal concentration in the roots and a 49.4% increase in the shoots. The bioconcentration factors, root bioaccumulation coefficients, and shoot bioaccumulation coefficients decreased as the concentrations of both cadmium and lead increased. The transfer factor and transfer efficiency for lead were higher than those for cadmium. Sorghum plants appear to mitigate the toxicity of cadmium and lead by predominantly sequestering these metals in their roots and transferring only a small fraction to the shoots.

Conclusion

The results of this study indicated that the presence of heavy metals, including cadmium and lead, in the soil resulted in reduced sorghum growth and biomass production, particularly at elevated concentrations. The effect of cadmium on the growth parameters of sorghum was significantly greater than that of lead. Moreover, elevated concentrations of cadmium and lead in the soil were associated with increased levels of these elements in the roots and shoots of sorghum. The bioconcentration factors, root bioaccumulation coefficients, and shoot bioaccumulation coefficients decreased with increasing concentrations of both cadmium and lead. The transfer factor and transfer efficiency were higher for lead than for cadmium. Despite the higher rate of lead translocation from roots to shoots compared with cadmium, the observed reduction in absorption and translocation with increasing concentrations of cadmium and lead in the soil suggests that sorghum functions as a stabilizing agent for these elements in bioremediation.

Keywords: Accumulation factor, Bioaccumulation, Heavy metal, Tolerance index, Transfer factor

ارزیابی واکنش‌های رشدی و توانایی تجمع کادمیوم و سرب در اندام‌های مختلف گیاه سورگوم (*Sorghum bicolor* L.)

احمد باقری^۱، محمدرضا رضایی^۲، حسین حمامی^۳ 

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد علوم و مهندسی محیط‌زیست، گرایش آلودگی‌های محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲. دانشیار گروه مهندسی محیط‌زیست دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳. دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۴. عضو گروه پژوهشی گیاه و تنش‌های محیطی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی:	آلودگی خاک به فلزات سنگین به دلیل خطرات زیست‌محیطی که برای سلامت انسان دارند، در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. به منظور بررسی واکنش‌های زیستی گیاه سورگوم (<i>Sorghum bicolor</i> L.) در شرایط تنش (کادمیوم و سرب)، این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل نوع عنصر در دو سطح (شامل کادمیوم و سرب) و غلظت‌های هر عنصر در شش سطح (شامل صفر، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) بود. به منظور آماده‌سازی خاک تیمارها از کلرید کادمیوم و کلرید سرب استفاده شد. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد صفت‌های شاخص سبزی، وزن خشک ریشه و وزن خشک اندام هوایی در مقایسه با شاهد در بالاترین غلظت فلزات سنگین (۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، به ترتیب ۵۱/۰، ۴۱/۴ و ۳۸/۹ درصد به صورت معنی‌داری کاهش یافت. علاوه بر این نتایج مقایسه میانگین داده‌های اثر نوع فلزات سنگین بر خصوصیات رشدی سورگوم نشان داد که فلز کادمیوم با ۳۰/۸ درصد کاهش، نسبت به فلز سرب اثر بیشتری بر وزن خشک ریشه سورگوم داشت. افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک منجر به افزایش غلظت آن‌ها در ریشه و در اندام هوایی شد. با افزایش غلظت از ۲۵ به ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب افزایش ۷۴/۶ و ۴۹/۴ درصدی در غلظت فلزهای سنگین در ریشه و در اندام هوایی مشاهده شد. فاکتورهای غلظت زیستی، ضریب تجمع زیستی در ریشه، ضریب تجمع زیستی در اندام هوایی با افزایش غلظت برای هر دو عنصر کادمیوم و سرب کاهش یافتند. فاکتور انتقال و راندمان انتقال نیز برای سرب در مقایسه با کادمیوم بیشتر بود. در نهایت به نظر می‌رسد گیاه سورگوم به‌منظور کاهش سمیت کادمیوم و سرب تا حدود زیادی این عناصر را در ریشه نگه‌داری کرده و درصد کمی از آن‌ها را به اندام هوایی منتقل می‌کند.

مقدمه

خاک به‌عنوان محیط کشت گیاهان، نقش بسیار مهمی در تأمین غذای موردنیاز جمعیت در حال افزایش دنیا دارد (Huang et al. 2011). فعالیت‌های انسان باعث برهم‌خوردن تعادل ترکیبات موجود در خاک شده و همچنین موجب رهاسازی ترکیبات آلاینده سمی در خاک شده که می‌تواند سلامت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را تحت تأثیر قرار دهد (Huang et al. 2011; Ali et al. 2013; Saifullah et al. 2009). از آنجاکه بخش زیادی از عناصر غذایی موردنیاز گیاه از خاک تأمین می‌شود، آلاینده‌های خاک نظیر فلزات سنگین نیز می‌تواند وابسته به نوع آن‌ها جذب گیاه شوند که علاوه بر اثر منفی بر رشد گیاه می‌توانند زمینه انتقال به زنجیره غذایی را نیز فراهم کنند (Ali et al. 2013). فلز سنگین به فلزات و شبه فلزاتی گفته می‌شود که چگالی آن‌ها بیش از ۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب باشد (Ali et al. 2013).

خاک به‌عنوان محیط کشت گیاهان، نقش بسیار مهمی در تأمین غذای موردنیاز جمعیت در حال افزایش دنیا دارد (Huang et al. 2011). فعالیت‌های انسان باعث برهم‌خوردن تعادل ترکیبات موجود در خاک شده و همچنین موجب رهاسازی ترکیبات آلاینده سمی در خاک شده که می‌تواند سلامت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را تحت تأثیر قرار دهد (Huang et al. 2011; Ali et al. 2013; Saifullah et al. 2009).

(Saifullah et al. 2009). گیاه‌پالایی یا پالایش زیستی به‌وسیله گیاهان باعث بهبود کیفیت محیط‌زیست می‌شود و از آن به‌عنوان یک فناوری مهندسی زیستی سبز نام‌برده می‌شود که منجر به احیای مجدد یک محیط آلوده می‌گردد (Pilon-Smits, 2005). در طول دوره گیاه‌پالایی گیاه به تجمع آلاینده‌ها و یا تثبیت آن‌ها و جلوگیری از انتشار آن‌ها در محیط می‌پردازد؛ بنابراین گیاه‌پالایی می‌تواند منجر به کاهش آلاینده‌ها به‌ویژه فلزات سنگین در خاک‌ها و آب‌های آلوده به سطح قابل‌قبول از نظر محیط‌زیست گردد (Ghosh and Singh, 2005). گیاه‌پالایی به‌عنوان یک روش پالایش در جای خاک، ارزان و پایدار شناخته‌شده است که جهت احیای خاک بدون آسیب به ویژگی‌های خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Salt et al. 1998; Pilon-Smits 2005). باتوجه به اهمیت گیاه‌پالایی و توان رشد بالای گیاه سورگوم به‌ویژه در شرایط تنش‌زای محیطی این مطالعه باهدف بررسی خصوصیات رشدی و ارزیابی توان جذب و انتقال گیاه سورگوم در شرایط حضور مقادیر مختلف کادمیوم و سرب انجام شد.

مواد و روش‌ها

قبل از شروع آزمایش یک نمونه از خاک مورد استفاده برای آزمایش تهیه شده و خصوصیات آن در آزمایشگاه آلودگی‌های دانشکده کشاورزی و محیط‌زیست دانشگاه بیرجند اندازه‌گیری شد. خصوصیات خاک مورد استفاده در آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است. خاک مورد نیاز برای هر تیمار از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده و سپس در شرایط سایه خشک شدند. سپس مقدار محاسبه‌شده بر اساس نوع تیمارها تعیین شده و به خاک‌ها اضافه شد. خاک مورد استفاده برای هر تیمار به‌صورت مجزا داخل پلاستیک قرار داده شده و هر سه روز به آن‌ها مقداری آب اضافه می‌شد (آبیاری تا حد ۹۰ درصد ظرفیت زراعی انجام می‌شد). قبل از اضافه کردن آب خاک هر تیمار به‌صورت مجزا کاملاً مخلوط می‌شد. پس از گذشت دو ماه گلدان‌ها با خاک تیمار شده پر شدند. آزمایش به‌صورت فاکتوریل دو عاملی در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل نوع عنصر در دو سطح (کادمیوم و سرب) و غلظت‌های هر عنصر در شش سطح شامل صفر، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود. به‌منظور آماده‌سازی خاک تیمارها از کلرید کادمیوم و کلرید سرب استفاده شد.

سرب (Pb)، روی (Zn)، مس (Cu)، کادمیوم (Cd)، نیکل (Ni)، آرسنیک (As)، آهن (Fe)، منگنز (Mn)، مولیبدن (Mo)، کبالت (Co)، منیزیم (Mg)، جیوه (Hg)، کروم (Cr)، نقره (Ag) و سلنیوم (Se) از جمله این فلزات هستند (Akpor et al. 2014; Ali et al. 2013; Mohammed et al., 2011). اگرچه برخی از فلزات سنگین به‌عنوان عناصر کم‌مصرف نقش مهمی در فعالیت‌های متابولیسمی گیاه دارند، ولی اغلب نقش خاصی در گیاه ندارند (Salt et al. 1998). کادمیوم یکی از فلزات سنگین غیرضروری و فوق‌العاده سمی برای موجودات زنده مختلف نظیر انسان، حیوانات و گیاهان است (Satarug et al. 2003). کادمیوم دارای حالیت بالا در آب بوده و می‌تواند از طریق خاک و آب آلوده وارد گیاه شده و با مصرف زیست‌توده آلوده گیاهی توسط گیاهخواران به زنجیره غذایی منتقل شود (Satarug et al. 2003). تنها نقش بیولوژیکی شناخته شده برای کادمیوم، تحت شرایط کمبود روی است که جایگزین روی به‌عنوان کاتالیزور در یک نوع خاص از آنهیدرازهای کربنیک در نوعی دیاتومه دریایی (*Thalassiosira weissflogii*) می‌شود (Sigel et al., 2013). علاوه بر این، یافته‌های اخیر نشان داد که کادمیوم، کبالت و روی می‌توانند از نظر عملکردی جایگزین یکدیگر شوند تا رشد مطلوب را در دیاتومه‌های دریایی حفظ کنند (Sigel et al., 2013). کادمیوم در انسان منجر به بروز سرطان‌های مختلف نظیر مثانه، پروستات، کلیه و پانکراس می‌شود. علاوه بر این در سیستم عصبی مرکزی اختلال ایجاد می‌کند که در نهایت منجر به بروز آلزایمر و پارکینسون می‌گردد (Rasin et al. 2025; Sigel et al., 2013).

سرب یکی از عناصر سنگین دارای کاربرد بسیار زیاد در صنایع مختلف نظیر صنایع جنگی، شیمیایی، بهداشتی، کشاورزی، نفتی و معدنی است. به همین دلیل یکی از آلاینده‌های بسیار مهم و گسترده در نقاط مختلف دنیا محسوب می‌شود (Jarup 2003; Saifullah et al. 2009). قرارگیری در معرض غلظت‌های بالای سرب در کوتاه‌مدت منجر به آسیب به مغز، کلیه و غدد درون‌ریز شده و در بلندمدت منجر به آسیب به سیستم عصبی مرکزی، کبد، خون و سیستم تولیدمثلی می‌گردد (Han et al. 2008; Zaier et al. 2010)؛ بنابراین باتوجه به خطرات مربوط به آلودگی خاک با کادمیوم و سرب، پالایش مکان‌های آلوده به‌منظور کاهش خطرات مربوط به این آلاینده‌ها ضروری است

جدول ۱. خصوصیات خاک گلدان‌های آزمایش

Table 1. Soil characteristics of experimental pots

Absorbable potassium	Absorbable phosphorus	Nitrogen	Organic matter	اسیدیته pH	EC	Bulk density	Soil texture	Particle size percentage		
								Sand	Silt	Clay
-----mg.kg ⁻¹ -----			%		dS.m ⁻¹	g.cm ⁻³		-----%		
207.12	45.11	0.042	0.22	7.8	4.17	1.43	Sandy Loam	59.7	26.1	14.2

اتمی (Perkin-Elmer AAnalyst 700) در آزمایشگاه آلودگی‌های دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه بیرجند اندازه‌گیری شد. برای تعیین غلظت از کادمیوم و سرب از منحنی‌های استاندارد استفاده شد.

در نهایت فاکتور غلظت زیستی، ضریب تجمع زیستی، فاکتور انتقال، راندمان انتقال و شاخص تحمل به ترتیب به‌وسیله روابط زیر تعیین شدند (Hammami et al. 2016; Hammami et al. 2018; Saghi et al., 2016; Ghosh and Singh, 2005).

فاکتور غلظت زیستی =

$$[۱] \quad \frac{\text{غلظت عنصر مورد نظر در ریشه و اندام هوایی (میلی گرم بر کیلو گرم)}}{\text{غلظت در خاک (میلی گرم بر کیلو گرم)}}$$

ضریب تجمع زیستی ریشه =

$$[۲] \quad \frac{\text{غلظت عنصر مورد نظر در ریشه (میلی گرم بر کیلو گرم)}}{\text{غلظت در خاک (میلی گرم بر کیلو گرم)}}$$

ضریب تجمع زیستی اندام هوایی =

$$[۳] \quad \frac{\text{غلظت عنصر مورد نظر در اندام هوایی (میلی گرم بر کیلو گرم)}}{\text{غلظت در خاک (میلی گرم بر کیلو گرم)}}$$

فاکتور انتقال =

$$[۴] \quad \frac{\text{غلظت عنصر مورد نظر در اندام هوایی (میلی گرم بر کیلو گرم)}}{100 \times \text{غلظت عنصر مورد نظر در ریشه (میلی گرم بر کیلو گرم)}}$$

راندمان انتقال =

$$[۵] \quad \frac{\text{غلظت عنصر مورد نظر در اندام هوایی (میلی گرم بر کیلو گرم)}}{\text{غلظت عنصر مورد نظر در ریشه و اندام هوایی (میلی گرم بر کیلو گرم)}}$$

$$[۶] \quad \frac{\text{وزن خشک گیاه در خاک آلوده (گرم)}}{\text{وزن خشک گیاه در خاک شاهد (گرم)}} = \text{شاخص تحمل}$$

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که صفات‌های ارتفاع، وزن خشک ریشه، وزن تر اندام هوایی و وزن خشک اندام هوایی سورگوم تحت تأثیر معنی‌دار نوع فلز سنگین در سطح یک درصد قرار گرفت (جدول ۲). درحالی‌که نوع عنصر اثر معنی‌داری بر وزن تر ریشه نشان نداد. غلظت فلزات سنگین

سورگوم رقم پیام از مؤسسه اصلاح نهال و بذر کرج تهیه شده و برای آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. بذرهای سورگوم با محلول هیپوکلریت سدیم ۵ درصد به مدت ۳ دقیقه ضدعفونی و با آب شستشو شدند. سپس، بذرهای در عمق یک سانتی‌متری از سطح هر گلدان و به تعداد ۱۰ عدد در هر گلدان ۲ لیتری کشت شدند. گلدان‌ها به گلخانه با دوره نوری و تاریکی ۱۶ و ۸ ساعت، و رطوبت نسبی ۳۵ و ۵۵ درصد منتقل شدند. آبیاری گلدان‌ها هر سه روز یکبار و تا رساندن به ظرفیت زراعی تا قبل از برداشت گیاهان انجام شد. در مرحله دوبرگی کامل گیاهان هر گلدان به چهار عدد تنک شدند. دو ماه پس از سبز شدن گیاهان، ارتفاع گیاهان اندازه‌گیری شده و شاخص سبزی‌نگی با استفاده از دستگاه اسپد (Minolta SPAD-502) اندازه‌گیری شد. سپس گیاهان از سطح خاک جدا شده و ریشه‌ها نیز به‌وسیله شستشو و بادقت از خاک جدا و توزین شدند. به‌منظور تعیین وزن خشک، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند و سپس توزین انجام شد.

نمونه‌ها به‌وسیله دستگاه آسیاب برقی کاملاً پودر شده و سپس ۰/۵ گرم از هر نمونه به کمک ۱۰ میلی‌لیتر از مخلوط اسید نیتریک و پرکلریدریک با نسبت ۹ به ۴ کاملاً هضم شدند (Hammami et al. 2016; Hammami et al. 2018; Saghi et al., 2016). نمونه‌ها روی حمام شن با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. حرارت دادن تا زمانی که رنگ نمونه‌ها زلال و شفاف شدند ادامه یافت. به‌وسیله آب دیونیزه حجم نمونه‌ها به ۲۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس نمونه‌ها به‌وسیله کاغذ صافی واتمن شماره ۱ فیلتر شدند. غلظت کادمیوم و سرب نمونه‌ها به کمک دستگاه جذب وضعیت نورمال بودن داده‌ها قبل از آنالیز با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک مورد بررسی قرار گرفت. پس از تأیید نورمال بودن داده‌ها، از نرم‌افزار SAS 9.4 برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار محافظت‌شده (FLSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

وزن خشک ریشه و وزن خشک اندام هوایی مشاهده شد (جدول ۳). در صفت‌های شاخص سبزی‌نگی، وزن خشک ریشه و وزن خشک اندام هوایی در مقایسه با شاهد کاهش به ترتیب ۵۱/۰، ۴۱/۴ و ۳۸/۹ درصد در بالاترین غلظت فلزات سنگین (۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم) مشاهده گردید (جدول ۴). علاوه بر این نتایج مقایسه میانگین داده‌های اثر نوع فلزات سنگین بر خصوصیات رشدی سورگوم نشان داد که فلز کادمیوم به ترتیب با ۳۰/۸ درصد نسبت به فلز سرب اثر بیشتری بر وزن خشک ریشه سورگوم داشت درحالی که فلز سرب ۵/۴ و ۲۶/۲ درصد اثر بیشتری در مقایسه با کادمیوم بر وزن تر و خشک اندام هوایی نشان داد (جدول ۴).

بر صفت‌های ارتفاع، وزن خشک ریشه، و وزن خشک اندام هوایی سورگوم اثر معنی‌داری در سطح یک درصد نشان داد. درحالی که غلظت فلزات سنگین بر وزن تر ریشه و اندام هوایی اثر معنی‌داری نشان نداد (جدول ۲). نتایج اثر متقابل فلز سنگین در غلظت بر ارتفاع گیاه در سطح معنی‌داری یک درصد و شاخص سبزی‌نگی در سطح معنی‌داری پنج درصد، معنی‌دار بود و وزن تر ریشه، وزن تر اندام هوایی، وزن خشک ریشه و وزن خشک اندام هوایی سورگوم تحت تأثیر اثر متقابل فلز سنگین در غلظت قرار نگرفتند (جدول ۲).

نتایج مقایسه میانگین اثر غلظت فلزات سنگین بر خصوصیات رشدی سورگوم نشان داد که در پایین‌ترین غلظت فلزات سنگین اثر معنی‌دار در صفت‌های شاخص سبزی‌نگی،

جدول ۲. آنالیز واریانس (میانگین مربعات) صفات رشدی گیاه سورگوم تحت تأثیر تیمارهای کادمیوم و سرب

Table 2. ANOVA (means square) of the growth traits of sorghum plants under cadmium and lead treatments

S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی df	ارتفاع Height	شاخص	وزن تر ریشه	وزن خشک ریشه	وزن تر اندام	وزن خشک اندام
				سبزی‌نگی Greenness index	Root fresh weight	Root dry weight	Shoot fresh weight	Shoot dry weight
فلز سنگین		1	19.51 **	2.250 NS	0.6587 NS	0.0662 **	0.5013 **	0.0216 **
Heavy metal (HM)								
غلظت		5	8.601 **	252.298 **	0.5051 NS	0.0182 **	0.0501 NS	0.0050 **
Concentration (C)								
فلز سنگین × غلظت		5	4.411 **	15.004 NS	0.6045 *	0.0042 NS	0.0840 NS	0.0024 NS
HM × C								
خطای آزمایشی		24	0.886	16.71	0.1955	0.0038	0.0324	0.0010
Error								
ضریب تغییرات		-	12.42	18.32	8.00	19.04	3.98	19.05
CV (%)								

*, **, و NS به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم معنی‌دار

*, **, and ns are significant at the 5 and 1% probability levels and not significant, respectively

در مولکول‌هایی که تیول نامیده می‌شوند یافت می‌شوند) باعث غیرفعال کردن پروتئین‌های گیاهی و کاهش ارتفاع گیاه می‌شوند. علاوه بر این اختلال در فعالیت هورمون اکسین در تیمار فلزات سنگین باعث کاهش رشد گیاه می‌شود (Khudsar et al., 2000). کاهش ارتفاع گیاه باقلا (Vicia faba L. در نتیجه تأثیر سولفات کادمیوم گزارش شده است (Kasim, 2005). نتیجه اثر غلظت‌های (۰، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم) کادمیوم بر روی گیاه تاج‌ریزی سیاه (Salanum nigrum) نشان داد که غلظت ۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیوم باعث کاهش ارتفاع گیاه گردید (Sun et al., 2008). نتایج بررسی اثر کادمیوم و سرب بر روی خصوصیات کمی گیاه نعناع فلفلی (Mentha piperita)

به‌طور کلی از بین رفتن اتساع سلولی و کاهش فعالیت میتوزی و یا عدم طویل شدن سلول‌ها دلیل نهایی کاهش رشد و ارتفاع گیاه در مجاورت کادمیوم و سرب است. به عبارت دیگر کادمیوم بر روی دیواره سلولی و تیغه میانی تأثیر می‌گذارد و با افزایش ترکیبات دیواره سلولی باعث مهار گسترش سلولی می‌گردد (Mahmood et al., 2006).

سرب باعث کاهش رشد اندام هوایی و ارتفاع گیاه در اثر کاهش فتوسنتز، اختلال در تعادل آب و مواد معدنی، تغییر وضعیت هورمونی و تأثیر بر نفوذپذیری و ساختار غشا است (Sharma and Dubey, 2005). برهم‌کنش بین فلزات سنگین و گروه‌های سولفیدریل (حاوی یک اتم گوگرد است که به صورت کولان به یک اتم هیدروژن متصل شده است و

نتایج یک مطالعه نشان داد که جلوگیری از جذب عناصر غذایی توسط کادمیوم منجر به کاهش رشد و ارتفاع گیاه جو (*Hordeum vulgare*) گردید (Vassilev, 2003). کاهش فتوسنتز و تنفس، کاهش متابولیسم هیدرات‌های کربن و ایجاد کلروز از دلایل اصلی کاهش رشد گیاه در نتیجه حضور کادمیوم است (Sanita and Gabbrielli, 1999). کاهش رشد ریشه در اثر کادمیوم باعث می‌شود جذب آب و سایر عناصر موردنیاز گیاه کاهش یافته و در نتیجه کاهش رشد گیاه را به دنبال دارد (Chen et al., 2003). در واقع کاهش وزن اندام‌های گیاهی در حضور فلزات سنگین ناشی از ایجاد اختلال در متابولیسم کلی سلول‌ها است (Jeliazkova et al., 2003). ریشه‌های گیاه به سرعت از طریق کاهش رشد ایجاد تغییر در الگوی انشعابات به فلز سنگین جذب شده واکنش نشان می‌دهند. همچنین لیگنینه شدن دیواره سلولی تحت تنش فلز سنگین و اثر مستقیم فلز سنگین بر هسته سلولی ممکن است باعث کاهش رشد ریشه شود (Almeida et al., 2007). کاهش رشد ریشه ممکن است در اثر کاهش کلسیم در نوک ریشه باشد. هنگامی که کلسیم در ریشه کم شود تقسیم سلولی و طولی شدن سلول‌ها کاهش می‌یابد (Eun et al., 2000). غلظت‌های بالای کادمیوم در گیاه از طریق کاهش فعالیت‌های آنزیمی، اختلال در فرایند فتوسنتز، بسته شدن روزنه‌ها و جلوگیری از جذب عناصر غذایی و انتقال به بخش هوایی گیاه در رشد گیاه اختلال ایجاد می‌کند (Sanita and Gabbrielli, 1999).

نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل غلظت فلز سنگین در نوع فلز سنگین بر صفات‌های رشدی در شکل ۱ نشان داده شده است. ارتفاع گیاه و وزن تر اندام هوایی در حضور کادمیوم در مقایسه با شاهد در بالاترین غلظت منجر به کاهش به ترتیب ۶۰/۳ و ۱۷/۲ درصدی شد. درحالی‌که عنصر سرب در شرایط مشابه کاهش به ترتیب ۱۵/۱ و ۸/۴ درصدی در ارتفاع گیاه و وزن تر اندام هوایی سورگوم را نشان داد؛ بنابراین به نظر می‌رسد در غلظت‌های مشابه کادمیوم کاهش بیشتری در شاخص‌های مدنظر نسبت به سرب ایجاد نمود.

نتایج تجزیه واریانس اثر نوع فلزهای سنگین و غلظت آن‌ها بر غلظت فلزات سنگین در ریشه و غلظت فلزات سنگین در اندام هوایی در جدول ۵ نشان داده شده است. اثر نوع فلز سنگین، غلظت فلزات سنگین و همچنین اثر متقابل نوع فلزهای سنگین در غلظت فلزهای سنگین در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۵).

نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم و سرب ارتفاع گیاه و میزان زیست‌توده ریشه و ساقه آن کاهش می‌یابد (Amirmoradi et al., 2017). کلرید کادمیوم باعث کاهش رشد و ارتفاع گیاه گوجه‌فرنگی (*Lycopersicum sculentum*) در غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومول در مقایسه با عدم حضور کادمیوم شد (Rahmatizadeh et al., 2019). فلز سنگین سرب با اثر منفی بر روی خاصیت ارتجاعی و انعطاف‌پذیری دیواره سلولی، باعث کاهش ارتفاع اندام هوایی گیاه ذرت (*Zea mays*) می‌شود (Heydari et al., 2020).

جدول ۳. مقایسه میانگین صفات رشدی گیاه سورگوم تحت تأثیر غلظت فلزات سنگین

Table 3. Means comparisons test of the growth traits of sorghum plants under heavy metals concentration

غلظت فلز	شاخص	وزن خشک	وزن خشک
سنگین	سبزی‌نگی	ریشه	اندام هوایی
HM Concentration	Greenness index	Root dry weight	Shoot dry weight
mg kg ⁻¹	SPAD	g	g
Control (0)	35.05 ^a	0.413 ^a	0.216 ^a
25	22.50 ^b	0.333 ^b	0.171 ^b
50	20.43 ^{bc}	0.323 ^b	0.168 ^{bc}
100	19.73 ^{bc}	0.321 ^b	0.166 ^{bc}
200	18.95 ^{bc}	0.298 ^{bc}	0.143 ^{bc}
400	17.17 ^c	0.242 ^c	0.132 ^c

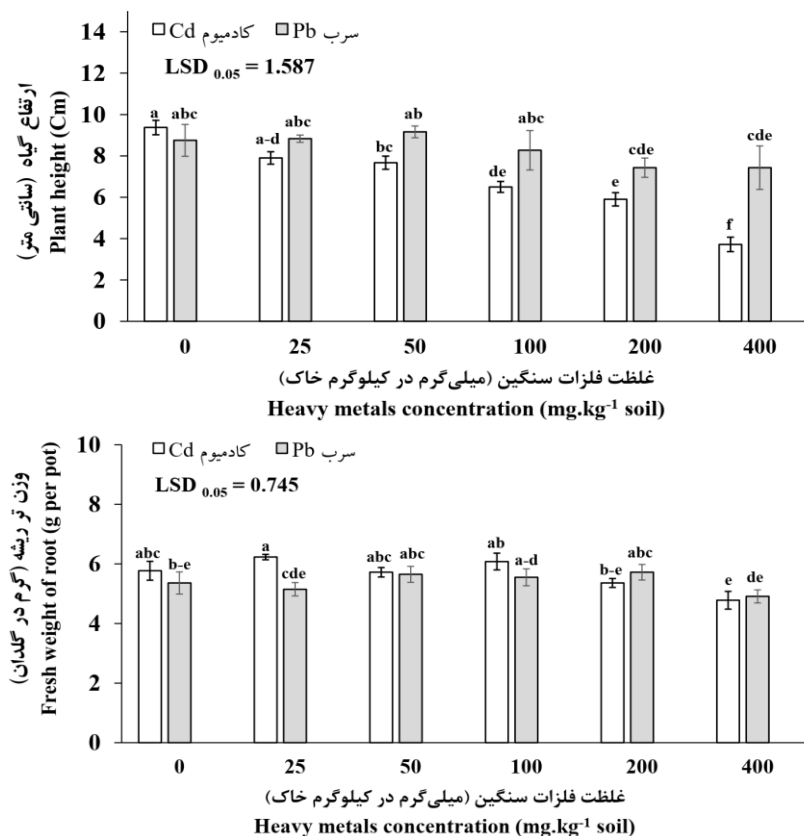
میانگین‌های هر ستون که حداقل در یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار محافظت‌شده اختلاف معنی‌داری ندارند. Means in each column, followed by similar letter are not significant based on FLSD (Fisher less significant difference) test.

جدول ۴. مقایسه میانگین صفات رشدی گیاه سورگوم تحت تأثیر نوع فلزات سنگین

Table 4. Means comparisons test of the growth traits of sorghum plants under heavy metals type

نوع فلز	وزن خشک	وزن تر اندام	وزن خشک
سنگین	ریشه	هوایی	اندام هوایی
HM type	Root dry weight	Shoot fresh weight	Shoot dry weight
	g	g	g
Cd	0.279 ^b	4.411 ^b	0.141 ^b
Pb	0.365 ^a	4.647 ^a	0.191 ^a

میانگین‌های هر ستون که حداقل در یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار محافظت‌شده اختلاف معنی‌داری ندارند. Means in each column, followed by similar letter are not significant based on FLSD (Fisher less significant difference) test.



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر متقابل فلز سنگین در غلظت بر صفات رشدی سورگوم
Fig. 1. Means comparisons of interaction effect of heavy metals and concentration on the growth traits of sorghum.

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل غلظت فلز سنگین در نوع فلز سنگین بر غلظت فلز سنگین در ریشه و اندام هوایی در شکل ۲ نشان داده شده است. غلظت کادمیوم و سرب در ریشه و اندام هوایی در تیمار شاهد شناسایی نشد. با افزایش غلظت از ۲۵ به ۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم به ترتیب افزایش ۷۶/۸ و ۶۰/۵ درصدی در غلظت کادمیوم در ریشه و در اندام هوایی مشاهده شد. در حالی که افزایش غلظت سرب از ۲۵ به ۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم به ترتیب افزایش ۷۲/۰ و ۴۶/۵ درصدی در غلظت سرب در ریشه و در اندام هوایی را نشان داد (شکل ۲).

از نظر درصدی سهم غلظت کادمیوم در ریشه و اندام هوایی در مقایسه پایین ترین غلظت (۲۵ میلی گرم بر کیلوگرم) و بالاترین غلظت (۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم) نسبت به سرب بیشتر است. این در حلی است که از نظر عددی غلظت سرب در ریشه و اندام هوایی بیشتر از کادمیوم است (شکل ۲، جدول های ۶ و ۷).

روند تغییرات غلظت کادمیوم و سرب در ریشه و اندام هوایی سورگوم در شکل سه نشان داده شده است. به طور کلی

جدول ۵. آنالیز واریانس (میانگین مربعات) غلظت فلزات سنگین در ریشه و اندام هوایی گیاه سورگوم تحت تأثیر تیمارهای کادمیوم و سرب

Table 5. ANOVA (means square) of the root and shoot heavy metals concentration sorghum plants under cadmium and lead treatments

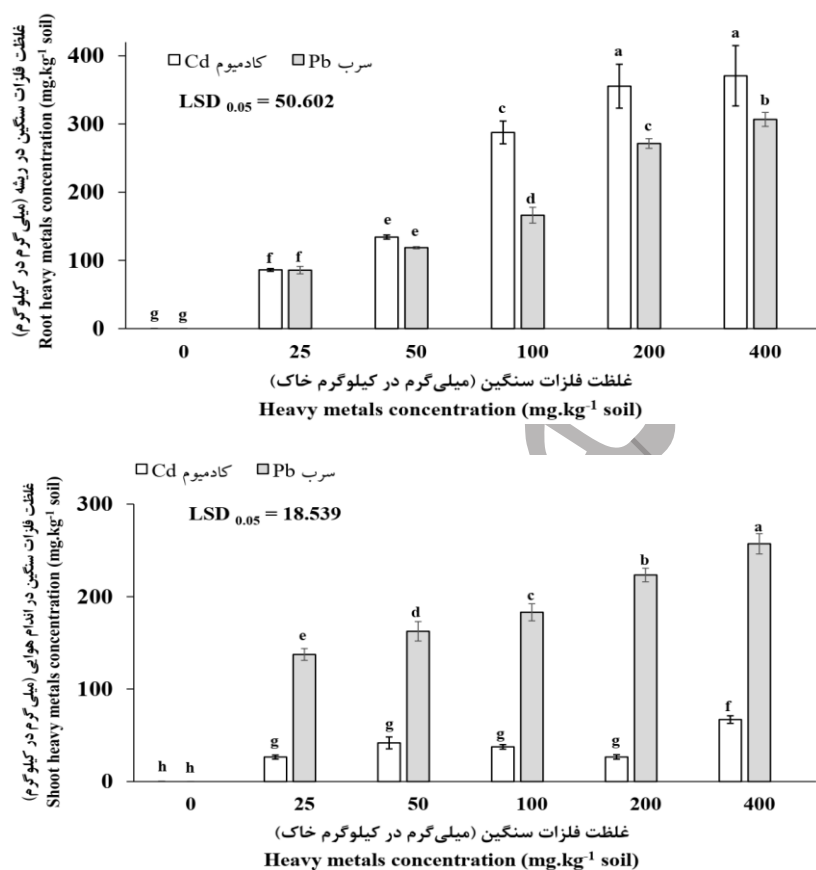
S.O.V	منابع تغییر آزادی df	غلظت فلزات سنگین در ریشه Root heavy metals concentration	غلظت فلزات سنگین در اندام هوایی Shoot heavy metals concentration
		درجه	درجه
فلز سنگین Heavy metal (HM)	1	20350.21 **	145902.35 **
غلظت Concentration (C)	5	107173.04 **	17821.33 **
فلز سنگین × غلظت HM × C	5	3772.34 **	7682.45 **
خطای آزمایشی Error	24	901.681	121.03
ضریب تغییرات CV (%)	-	16.51	11.35

*, ** و ns به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم معنی دار

*, ** and ns are significant at the 5 and 1% probability levels and not significant, respectively

در اندام هوایی بین تیمارهای ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم تفاوت معنی داری از نظر میزان کادمیوم موجود در اندام هوایی مشاهده نشد (شکل ۳).

با افزایش غلظت فلزهای سنگین در خاک غلظت آن‌ها در ریشه افزایش می‌یابد. البته غلظت کادمیوم در اندام هوایی از این روند در برخی غلظت‌ها پیروی نمی‌کند که باتوجه به نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل غلظت کادمیوم در خاک و غلظت

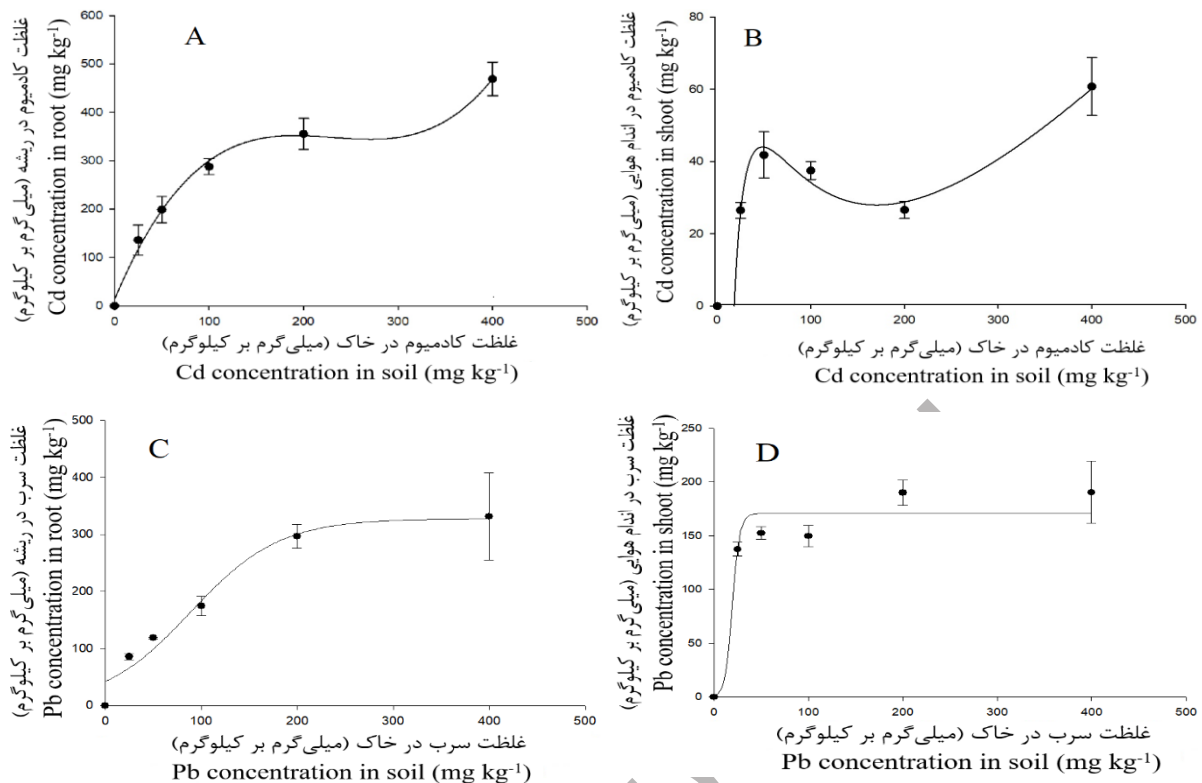


شکل ۲. مقایسه میانگین اثرات متقابل نوع فلز سنگین و غلظت در خاک بر غلظت فلزات سنگین در ریشه و اندام هوایی سورگوم

Fig. 2. Mean comparisons for the interaction effect of heavy metal type and concentration in soil on root and shoot metal concentrations in sorghum

افزایش غلظت از ۲۵ به ۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم برای عنصر سرب (جدول ۷) نشان داد. درحالی که ضریب تجمع زیستی در اندام هوایی با افزایش غلظت از ۲۰۰ به ۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم افزایش ۲۳/۵ درصدی را نشان داد (جدول ۶). فاکتور انتقال و راندمان انتقال در مورد کادمیوم روند مشخصی را نشان نداد. به طوری که با افزایش غلظت ابتدا افزایش جزئی (۱/۳ درصد) و سپس کاهش و در نهایت در غلظت ۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم نسبت به ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم افزایش یافت (جدول ۶). درحالی که فاکتور انتقال و راندمان انتقال برای سرب روند کاهشی را نشان داد. افزایش

پارامترهای جذب و انتقال کادمیوم و سرب به ترتیب در جدول‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. فاکتور غلظت زیستی برای کادمیوم از غلظت ۲۵ تا ۲۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم کاهش را نشان داد. با افزایش غلظت از ۲۰۰ به ۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم، فاکتور غلظت زیستی روند کاهشی داشت (جدول ۶). درحالی که با افزایش غلظت سرب از ۲۵ به ۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم فاکتور زیستی برای کاهش مداوم را نشان داد (جدول ۷). ضریب تجمع زیستی در ریشه نیز کاهش مداوم را با افزایش غلظت از ۲۵ به ۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم برای هر دو عنصر کادمیوم (جدول ۶) و سرب (جدول ۷) نشان داد. ضریب تجمع زیستی در اندام هوایی نیز کاهش مداوم را با



شکل ۳. رابطه بین غلظت کادمیوم و سرب در خاک با غلظت این عناصر در ریشه و اندام هوایی گیاه سورگوم؛ کادمیوم در ریشه (A)، کادمیوم در اندام هوایی (B)، سرب در ریشه (C) و سرب در اندام هوایی (D). خطوط عمودی نشان‌دهنده خطای استاندارد ($\pm$ SE) می‌باشند.

Fig. 3. Relationship between soil cadmium (Cd) and lead (Pb) concentrations and their accumulation in sorghum root and shoot tissues; root Cd (A), shoot Cd (B), root Pb (C), and shoot Pb (D). Vertical bars represent standard errors ($\pm$ SE).

راه آپوپلاستیک و سیمپلاستی وارد ریشه شده و باعث کاهش انتقال به بخش هوایی گیاه می‌شود به بیانی دیگر جابه‌جایی سیمپلاستی کادمیوم به آوند چوبی می‌تواند از طریق تولید کلات‌های گیاهی و ذخیره کادمیوم در واکوئل محدود شود. همچنین، جابه‌جایی آپوپلاستیک کادمیوم می‌تواند به دلیل توسعه بافت اندودرم، اغزودرم و بعضی از موانع خارج سلولی محدود گردد (Lux et al., 2011).

سمیت سرب به این دلیل است که بسیاری از جنبه‌های رفتار متابولیسمی کلسیم را تقلید می‌کند و از فعالیت بسیاری از آنزیم‌ها جلوگیری می‌کند یکی از دلایل تجمع بیشتر سرب در ریشه نسبت به اندام هوایی غیرمتحرک بودن این عنصر و رسوب به شکل سولفات سرب در ریشه است همچنین به دلیل اینکه در ریشه گیاه فرایند فتوسنتز رخ نمی‌دهد انباشت بیشتر فلز در ریشه گیاه باعث تحمل گیاه در مقابل فلزات سنگین می‌شود (Hu et al., 2010). سرب هنگامی که وارد سلول‌های پارانشیم ریشه و فضای بین سلولی می‌شود با مقادیر زیادی کربنات، بی‌کربنات، فسفات و

جزئی در غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در مقایسه با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در فاکتور انتقال (۱/۸) درصد) و راندمان انتقال (۱ درصد) مشاهده شد (جدول ۷). به‌طور کلی شاخص تحمل روند کاهشی برای فلز سنگین کادمیوم داشت. در غلظت ۱۰۰ نسبت به غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم شاخص تحمل افزایشی معادل ۱/۴ درصدی را نشان داد. بیش‌ترین و کم‌ترین شاخص تحمل به کادمیوم به ترتیب در غلظت‌های ۲۵ و ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اختصاص یافت. به‌طوری که کاهش ۴۳/۵ درصدی در غلظت ۴۰۰ نسبت به ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در شاخص تحمل مشاهده شد (جدول ۶). در مورد شاخص تحمل در مورد سرب روند کاملاً نوسانی مشاهده شد. به‌طوری که کم‌ترین مقدار به ترتیب در غلظت‌های ۴۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب مشاهده شد و بیش‌ترین به ترتیب در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد (جدول ۷).

کادمیوم از طریق محلول خاک وارد گیاه شده و پیش از اینکه از طریق آوند چوبی به قسمت هوایی گیاه وارد شود از

اسیدیته بالا مواجه می‌شود و به شکل یک ترکیب فسفات‌دار رسوب می‌کند و باعث کاهش جابه‌جایی به اندام هوایی می‌شود. بعد دیگری که در مورد نحوه جذب سرب به ریشه قابل‌بررسی است اختلاف شیب غلظت فلز درون و بیرون ریشه است، سرب با پدیده جذب غیرفعال و در جهت شیب غلظت وارد ریشه‌ها می‌شود؛ ولی با افزایش غلظت سرب داخل ریشه،

جذب عمدتاً به شکل فعال ادامه می‌یابد. باتوجه‌به اینکه جذب فعال با مصرف انرژی همراه است و وابسته به فعالیت‌های متابولیکی گیاه است، با افزایش غلظت سرب و مسمومیت سلول‌های گیاهی و کاهش فعالیت‌های متابولیکی گیاه، جذب سرب از محلول خاک به ریشه کاهش می‌یابد (Amanifar et al., 2012).

جدول ۶. پارامترهای جذب و انتقال کادمیوم در گیاه سورگوم

Table 6. The parameters of absorption and transfer of cadmium in sorghum plants

شاخص	راندمان	فاکتور	ضریب تجمع زیستی	ضریب تجمع	فاکتور غلظت	غلظت کادمیوم
تحمل	انتقال	انتقال	در اندام هوایی	زیستی در ریشه	زیستی	Cd Concentration (mg kg ⁻¹)
TI	TE %	TF	BACS	BACR	BCF	
0.848 ^a	23.59 ^a	0.307 ^a	1.06 ^a	3.44 ^a	4.50 ^a	25
0.752 ^{ab}	23.46 ^a	0.312 ^a	0.84 ^b	2.68 ^b	3.52 ^b	50
0.784 ^{ab}	11.53 ^{bc}	0.130 ^{bc}	0.38 ^c	2.87 ^b	3.25 ^b	100
0.638 ^{bc}	7.01 ^c	0.075 ^c	0.17 ^d	1.77 ^c	1.91 ^c	200
0.479 ^c	15.48 ^b	0.181 ^b	0.17 ^{cd}	0.93 ^d	2.19 ^d	400

میانگین‌های هر ستون که حداقل در یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار محافظت‌شده اختلاف معنی‌داری ندارند. Means in each column, followed by similar letter are not significant based on FLSD (Fisher less significant difference) test. BCF: Bio concentration factor; BACS: Bio accumulation coefficient shoot; BACR; Bio accumulation coefficient shoot; TF: Translocation factor; TE: Translocation efficiency; TI: tolerance index

جدول ۷. پارامترهای جذب و انتقال سرب در گیاه سورگوم

Table 7. The parameters of absorption and transfer of lead in sorghum plants

شاخص	راندمان	فاکتور	ضریب تجمع زیستی	ضریب تجمع	فاکتور غلظت	غلظت سرب
تحمل	انتقال	انتقال	در اندام هوایی	زیستی در ریشه	زیستی	Pb Concentration (mg kg ⁻¹)
TI	TE%	TF	BACS	BACR	BCF	
0.664 ^{ab}	61.60 ^a	1.612 ^a	5.50 ^a	3.43 ^a	8.93 ^a	25
0.826 ^{bc}	57.68 ^{ab}	1.372 ^{ab}	3.25 ^b	2.37 ^b	5.62 ^b	50
0.773 ^{ab}	52.40 ^b	1.119 ^{bc}	1.83 ^c	1.66 ^c	3.49 ^c	100
0.562 ^{bc}	45.14 ^c	0.824 ^d	1.12 ^d	1.36 ^c	2.47 ^d	200
0.421 ^c	45.59 ^c	0.841 ^{cd}	0.64 ^d	0.77 ^d	1.41 ^e	400

میانگین‌های هر ستون که حداقل در یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار محافظت‌شده اختلاف معنی‌داری ندارند. Means in each column, followed by similar letter are not significant based on FLSD (Fisher less significant difference) test. BCF: Bio concentration factor; BACS: Bio accumulation coefficient shoot; BACR; Bio accumulation coefficient shoot; TF: Translocation factor; TE: Translocation efficiency; TI: tolerance index

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج این مطالعه نشان داد که حضور فلزهای سنگین کادمیوم و سرب در خاک به‌ویژه در غلظت‌های بالا منجر به کاهش رشد و تولید زیست‌توده سورگوم می‌شود. البته شدت اثر کادمیوم بر خصوصیات رشدی سورگوم نسبت به سرب بیشتر بود. علاوه بر این با افزایش غلظت کادمیوم و سرب در خاک، غلظت این عناصر در ریشه و اندام هوایی سورگوم افزایش را نشان داد. فاکتورهای غلظت زیستی، ضریب تجمع زیستی در

ریشه، ضریب تجمع زیستی در اندام هوایی با افزایش غلظت برای هر دو عنصر کادمیوم و سرب کاهش یافتند. فاکتور انتقال و راندمان انتقال نیز برای سرب در مقایسه با کادمیوم بیشتر بود. اگرچه میزان انتقال سرب از ریشه به اندام هوایی در مقایسه با کادمیوم بیشتر بود؛ ولی باتوجه‌به کاهش انتقال کادمیوم و سرب از ریشه به اندام هوایی با افزایش غلظت در خاک به نظر می‌رسد گیاه سورگوم به‌عنوان یک گیاه تثبیت‌کننده این عناصر در بحث پالایش زیستی عمل می‌کند.

- Akpor, O.B., Ohiobor, G.O., Olaolu, D.T., 2014. Heavy metal pollutants in wastewater effluents: sources, effects and remediation. *Advances in Bioscience and Bioengineering*. 2, 37-43. <https://doi.org/10.11648/j.abb.20140204.11>
- Ali, H., Khan, E., Sajad, M.A., 2013. Phytoremediation of heavy metals concepts and applications. *Chemosphere*. 91, 869-881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Almeida, A.A.F.D., Valle, R.R., Mielke, M.S., Gomes, F.P., 2007. Tolerance and prospection of phytoremediator woody species of Cd, Pb, Cu and Cr. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. 19, 83-98
- 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 (Agricultural Science)*, 22, 155-170. [In Persian with English Summary].
- Amirmoradi, S., Rezvani Moghaddam, P., Koocheki, A., Danesh, S., Fotovat, A., 2017. Effect of cadmium and lead on quantitative and essential oil traits of peppermint (*Mentha piperita* L.). *Journal of Agroecology*. 9, 142-157. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22067/jag.v9i1.51330>
- Chen, Y.X., He, Y.F., Luo, Y.M., Yu, Y.L., Lin, Q., Wong, M.H., 2003. Physiological mechanism of plant roots exposed to cadmium. *Chemosphere*. 50, 789-793. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(02)00220-5)
- Eun, S.O., Shik Youn, H., Lee, Y., 2000. Lead disturbs microtubule organization in the root meristem of *Zea mays*. *Physiologia Plantarum*. 110(3), 357-365. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2000.1100310.x>
- Ghosh, M., Singh, S.P., 2005. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of it's by products. *Applied Ecology and Environmental Research*. 3, 18. http://doi.org/10.15666/aeer/0301_001018
- Hammami, H., Parsa, M., Mohassel, M.H.R., Rahimi, S., Mijani, S., 2016. Weeds ability to phytoremediate cadmium-contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*. 18, 48-53. <https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1058336>
- Hammami, H., Alaie, E., Dastgheib, S.M.M., 2018. The ability of *Silybum marianum* to phytoremediate cadmium and/or diesel oil from the soil. *International Journal of Phytoremediation*. 20, 756-763. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1425664>
- Han, Y.L., Huang, S.Z., Gu, J.G., Qiu, S., Chen, J.M., 2008. Tolerance and accumulation of lead by species of *Iris* L. *Ecotoxicology*. 17, 853-859. <https://doi.org/10.1007/s10646-008-0248-3>
- Heydari, R., Khiami, M., Farboudnia, T., 2020. Physiological and biochemical effects of Pb on *Zea mays* L. Seedlings. *Iranian Journal of Biology*. 18, 228-236. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.295921.668474>
- Hu, J., Zheng, A., Pei, D., Shi, G., 2010. Bioaccumulation and chemical forms of cadmium, copper and lead in aquatic plants. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 53(1), 235-240. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132010000100029>
- Huang, P.M., Li, Y., Sumner, M.E., 2011. *Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes*. CRC Press, Boca Raton, FL, 1442p
- Järup, L., 2003. Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*. 68, 167-182. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg032>
- Jeliazkova, E., Craker, L.E., Xing, B., 2003. Seed germination of anise, caraway, and fennel in heavy metal contaminated solutions. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 10, 83-93. https://doi.org/10.1300/J044v10n03_09
- Kasim, W.A., 2005. The correlation between physiological and structural alterations induced by copper and cadmium stress in broad beans (*Vicia faba* L.). *Egyptian Journal of Biology*. 7, 20-32.
- Khudsar, T., Soh, W.Y., Iqbal, M. 2000. Morphological and anatomical variations of *Cajanus cajan* (Linn.) huth raised in cadmium-rich soil. *Journal of Plant Biology*. 43, 149-157. <https://doi.org/10.1007/BF03030492>
- Lux, A., Martinka, M., Vaculík, M., White, P.J., 2011. Root responses to cadmium in the rhizosphere: A review. *Journal of Experimental*

- Botany. 62, 21-37.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erq281>
- Mahmood, Q., Hassan, M. J., Zhu, Z., Ahmad, B., 2006. Influence of cadmium toxicity on rice genotypes as affected by zinc, sulfur and nitrogen fertilizers. *Caspian Journal of Environmental Sciences*. 4, 1-8.
- Mohammed, A.S., Kapri, A., Goel, R., 2011. Heavy metal pollution: Source, impact, and remedies. In: Khan, M., Zaidi, A., Goel, R., Musarrat, J. (eds.), *Biomanagement of Metal-Contaminated Soils*. Environmental Pollution, vol 20. Springer, Dordrecht.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-1914-9_1
- Pilon-Smits, E., 2005. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*. 56, 15-39.
<http://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214>
- Rahmatizadeh, R., Arvin, S.M.J., Jamei, R., Mozaffari, H., Reza Nejhad, F., 2019. Response of tomato plants to interaction effects of magnetic (Fe₃O₄) nanoparticles and cadmium stress, *Journal of Plant Interactions*, 14(1), 474-481.
<http://doi.org/10.1080/17429145.2019.1626922>
- Rasin, P., Ashwathi, A.V., Basheer, S.M., Haribabu, J., Santibanez, J.F., Garrote, C.A., Arulraj, A., Mangalaraja, R.V., 2025. Exposure to cadmium and its impacts on human health: A short review. *Journal of Hazardous Materials Advances*. 100608.
<https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100608>
- Saghi, A., Rashed-Mohassel, M.H., Parsa, M., Hammami, H., 2016. Phytoremediation of lead-contaminated soil by *Sinapis arvensis* and *Rapistrum rugosum*. *International Journal of Phytoremediation*. 18, 387-392.
<https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1109607>
- Saifullah, M.E., Qadir, M., de Caritat, P., Tack, F.M.G., Du Laing, G., Zia, M.H., 2009. EDTA-assisted Pb phytoextraction. *Chemosphere*. 74, 1279-1291.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.007>
- Salt, D.E., Smith, R.D., Raskin, I., 1998. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*. 49, 643-668.
<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.49.1.643>
- Sanita, L.S., Gabbrielli, R., 1999. Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany*. 41, 105-130.
[https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(98\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(98)00058-6)
- Satarug, S., Baker, J.R., Urbenjapol, S., Haswell-Elkins, M., Reilly, P.E., Williams, D.J., Moore, M.R., 2003. A global perspective on cadmium pollution and toxicity in non-occupationally exposed population. *Toxicology Letters*. 137, 65-83.
[https://doi.org/10.1016/S0378-4274\(02\)00381-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4274(02)00381-8)
- Sharma, P., Dubey, R.S., 2005. Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. 17, 35-52.
<https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100004>
- Sigel, A., Sigel, H., Sigel, R.K., 2013. Cadmium: From Toxicity to Essentiality. Vol. 11, Springer, Dordrecht, Netherlands, 588p.
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-5179-8>
- Sun, Y., Zhou, Q., Diao, C., 2008. Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. *Bioresource Technology*. 99, 1103-1110.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.02.035>
- Vassilev, A., 2003. Physiological and agroecological aspects of cadmium interactions with barley plants: an overview. *Journal of Central European Agriculture*, 4
- Zaier, H., Ghnaya, T., Lakhdar, A., Baioui, R., Ghabriche, R., Mnasri, M., Sghair, S., Lutts, S., Abdelly, C., 2010. Comparative study of Pb-phytoextraction potential in *Sesuvium portulacastrum* and *Brassica juncea*: Tolerance and accumulation. *Journal of Hazardous Materials*. 183, 609-615.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.068>