

# Cadmium, Lead and Arsenic Remediation in Urban Wastewater by Sorghum Bicolor L.

S. A. Shafiei Darabi <sup>1</sup>, A. Almodares <sup>2</sup>

1. PhD Student of Plant Physiology, Dept. of Biology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

2. Assoc. Prof. of Biology, Department of Biology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran (Corresponding Author) aalmodares@yahoo.com

(Received June 30, 2017 Accepted Jan. 13, 2018)

#### To cite this article :

Shafiei Darabi, S. A, Almodares, A., 2018, "Cadmium, lead and arsenic remediation in urban wastewater by sorghum bicolor L." Journal of Water and Wastewater, 30(1), 117-129.  
Doi: 10.22093/wwj.2018.90922.2443 (In Persian)

#### Abstract

The use of wastewater and gray water for agribusiness is recently growing, and it is essential to investigate the risks associated with its use. Heavy metals in wastewater, even in small quantities, are among problems limiting the use of wastewater in agriculture. This is due to the high agglomeration coefficient in the environment, degradability and long shelf-life which cause the severity of toxicity and contamination of the soil during irrigation. In this regard, the Phytoremediation technology can be advantageous due to its environmental compatibility and environmental refining power. In order to investigate the power of sweet sorghum, urban wastewater was used to irrigate the plant. First, wastewater was analyzed in terms of 38 factors. By adding cadmium, lead and arsenic to wastewater, three treatments of 0.1, 1 and 10 mg/l of these metals were created in urban wastewater and for 12 weeks the respective pots were irrigated with appropriate replication. Samples of root, stem, leaf, seed, soil and drainage of pots were collected separately for analysis of acid digestion and grafting to the atomic absorption system and the results were compared by statistical methods. The results showed that accumulation of cadmium and lead in sorghum is more than ten times higher than that of arsenic. On the other hand, the absorption coefficient or ability of the plant to absorb the elements has decreased rapidly for cadmium and lead with increasing concentration in the soil. In the case of arsenic, the absorption coefficient increased with increasing concentration in the soil. Regarding the amount of material accumulation, the ability of all tissues in the accumulation of cadmium and lead was the same and in the case of arsenic, the root accumulated more than aerial parts. This study showed that the heavy metals accumulation pattern in sorghum, the final amount of accumulation, the absorption coefficient and its changes relative to the environmental concentration are different for various elements. According to the final concentration of accumulation and absorption coefficient, the sorghum plant is suitable for the purification of cadmium and lead from low concentration effluents which are commonly found in urban wastewater. This can prevent the accumulation of these pollutants in soil.

**Keywords:** Sweet Sorghum, Heavy Metals, Wastewater, Phytoremediation.



## ضریب گیاه‌پالایی گیاه سورگوم شیرین در کاهش فلزات سنگین کادمیم، سرب و آرسنیک از پساب شهری

سید احمد شفیعی دارابی<sup>۱</sup>، عباس المدرس<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکترای رشته فیزیولوژی گیاهی، گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۲- دانشیار گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

aalmodares@yahoo.com (نویسنده مسئول)

(دریافت ۹۶۴/۹ پذیرش ۹۶۷۱۰/۲۳)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

شفیعی دارابی، س. ا.، المدرس، ع.، ۱۳۹۷، "ضریب گیاه‌پالایی گیاه سورگوم شیرین در کاهش فلزات سنگین کادمیم، سرب و آرسنیک از پساب شهری" مجله آب و فاضلاب، ۳۰(۱)، ۱۲۹-۱۱۷. Doi: 10.22093/wwj.2018.90922.2443

### چکیده

امروزه استفاده از پساب یا آب خاکستری برای کشاورزی به شدت در حال گسترش است در حالی که استفاده از آنها خطراتی نیز به همراه دارد. فلزات سنگین موجود در پساب حتی در مقادیر اندک به دلیل ضریب تجمع‌پذیری بالا در محیط، عدم تجزیه‌پذیری و ماندگاری زیاد، شدت سمیت و آلوده‌سازی خاک در زمان آبیاری از جمله معضلات استفاده از پساب در کشاورزی است که باید به نحوی مدیریت شود. در این خصوص روش گیاه‌پالایی به دلیل سازگاری با محیط زیست و قدرت پالایش محیط از مزیت مناسبی برخوردار است. به منظور بررسی قدرت گیاه‌پالایی سورگوم شیرین، این گیاه با پساب شهری آبیاری شد. ابتدا پساب آنالیز شد. با اضافه نمودن ترکیبات کادمیم، سرب و آرسنیک به پساب، سه تیمار ۱/۰، ۱ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر از فلزات مذکور در پساب شهری ایجاد شد و به مدت ۱۲ هفته گلدهی‌های مربوطه با تکرار مناسب آبیاری شد. نمونه‌های ریشه، ساقه، برگ، بذر، خاک و زهاب گلدهی‌ها به صورت جداگانه برای آنالیز هضم اسیدی و تزیق به دستگاه جذب اتمی برداشت شد و نتایج توسط روش‌های آماری مقایسه شد. نتایج نشان داد که میزان انباشت کادمیم و سرب در گیاه سورگوم نسبت به آرسنیک بسیار بیشتر است و به بیش از ده برابر می‌رسد. از طرف دیگر ضریب جذب یا توانایی گیاه در جذب عناصر در مورد کادمیم و سرب با افزایش غلظت در خاک، به سرعت کاهش یافته و در مورد آرسنیک، ضریب جذب گیاه با افزایش غلظت آن در خاک تا اندازه‌ای افزایش می‌یابد. در مورد میزان انباشت مواد، توانایی تمامی بافت‌ها در انباشت کادمیم و سرب یکسان بوده و در مورد آرسنیک، بیشترین تجمع این عنصر در ریشه است و در بخش‌های هوایی آن مقدار کمتری تجمع می‌یابد. این پژوهش نشان می‌دهد الگوی انباشت فلزات سنگین در گیاه سورگوم و همچنین میزان نهایی انباشت، ضریب جذب و تغییرات آن نسبت به غلظت محیط در عناصر مختلف متفاوت است و با توجه به غلظت نهایی انباشت و ضریب جذب، گیاه سورگوم شیرین گونه‌ای مناسب برای پالایش کادمیم و سرب در پساب‌های شهری در غلظت‌های پایین است و این امر می‌تواند از انباشت تدریجی آلاینده‌های مذکور در خاک جلوگیری نماید.

**واژه‌های کلیدی:** سورگوم شیرین، فلزات سنگین، پساب، گیاه‌پالایی

### ۱- مقدمه

طیفی از انواع آلودگی‌ها از جمله فلزات سنگین، ترکیبات سنتزی و انواع باکتری‌ها است. فلزات سنگین از جمله آلودگی‌های مهم در پساب به حساب می‌آید که علی‌رغم غلظت‌های کم در منابع آلاینده

پساب یکی از منابع جدید آب در کشاورزی است و اخیراً با توجه به محدودیت‌های شدید در منابع آبی و گسترش استحصال پساب در کلان‌شهرها مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. پساب حاوی



سنگین بسیار متنوع است به طوری که هر گیاه برای پالایش یک نوع از فلزات سنگین مناسب تر است (Pilon-Smits, 2005).

گیاهان مورد استفاده در گیاه پالایی ممکن است بیومس‌های سمی با سطح بالایی از سمیت ایجاد نمایند که از این لحاظ برای استفاده به عنوان منابع غذایی انسان و یا دام مناسب نخواهند بود. به این ترتیب انتخاب گیاهانی با توانایی بالا در پالایش و با ارزش اقتصادی مناسب، یک موضوع کلیدی در گیاه پالایی محسوب می‌شود (Gnansounou et al., 2005).

سورگوم شیرین گیاهی زراعی و پر کاربرد در مناطق گرمسیری است که به لحاظ سطح کشت، پنجمین غله جهان را به ویژه در کشورهای آفریقایی به خود اختصاص می‌دهد و برای تغذیه انسان، دام و یا تولید بیوانرژی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مطالعات مختلف نشان دهنده توانایی گونه‌های گیاهی در جذب فلزات سنگین یا تصفیه پساب با مقادیر مختلف می‌باشد. بر اساس پژوهشی در سرشاخه‌های کارون، درختچه‌های گز<sup>1</sup> در بستر رودخانه‌ها قادر به حذف فلزات سنگین پساب‌های وارد شده به رودخانه می‌باشند (Sasan et al., 2017).

مطالعات بر روی نوعی نی نشان می‌دهد که این گیاه قادر به جذب انواع فلزات سنگین از پساب است و منجر به تصفیه در شرایط آکواریوم می‌شود (Mojiri et al., 2015).

کشت انواع درختان چوبی از جمله بید، نارون، افرا و تبریزی در خاک‌های آلوده منطقه زنجان نشان‌دهنده توانایی جذب فلزات سنگین توسط گونه‌های مذکور بوده است (Saba et al., 2015).

سورگوم می‌تواند به خوبی در پساب رشد کند به طوری که رشد آن در پساب بسیار بیشتر از آب معمولی است. در این شرایط گیاه قادر به پالایش و یا جذب انواع آلاینده‌های پساب و کاهش اثرات آن بر خاک و محیط خواهد بود (Galavi et al., 2010).

رویش گیاه در شرایط آزمایشگاهی در حضور فلزات سنگین نیکل، روی و سرب نشان داده است که گیاه سورگوم شیرین توانایی مناسبی در جذب فلزات سنگین دارد (Chami et al., 2015).

هدف از این پژوهش بررسی توانایی عملی گیاه سورگوم شیرین در کاهش آلودگی فلزات سنگین پساب به منظور توسعه و ایجاد یک روش عملی در استفاده از پساب‌ها در کشاورزی است.

اولیه به دلیل عدم تجزیه پذیری حتی در طی بازه‌های زمانی طولانی و ضریب تجمع پذیری در خاک و گونه‌های زیستی می‌تواند با غلظت‌های بسیار زیادی نسبت به آلودگی اولیه در زنجیره غذایی اکوسیستم تجمع یابد (Mashi and Alhassan, 2007). این عناصر عوارض متعددی بر موجودات زیستی از جمله انسان دارند و در غلظت‌های میکرومول در لیتر موجب نابودی گلبول‌های سفید و تضعیف سیستم ایمنی شده و با اتصال به هموگلوبین خون، گلبول‌های سرخ را متأثر می‌سازد؛ به جای کلسیم در استخوان‌ها و یا بافت‌های نرم بدن رسوب می‌کند و موجب آسیب به کبد و یا ایجاد تومورهای بدخیم می‌شود (Keil et al., 2011).

بر اساس تعاریف سازمان حفاظت محیط زیست ایران، حداکثر حد استاندارد تخلیه پساب در چاه‌های جذبی، آب‌های سطحی و کشاورزی برای کادمیم برابر ۰/۰۵ تا ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر، برای سرب ۱ میلی‌گرم در لیتر و برای آرسنیک ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر در پساب می‌باشد.

توانایی خاک در جذب و تجمع فلزات سنگین از اهمیت بالایی در آلودگی آن برخوردار است. تخلیه خاک از فلزات سنگین ممکن است به واسطه فاکتورهای متنوعی از جمله pH و یا حضور برخی از یون‌ها از جمله فسفات با ترسیب فلزات سنگین و آبشویی آنها از خاک صورت پذیرد. این فرایند موجب کاهش غلظت فلزات سنگین در محدوده ریزوسفر شده و مواجه گیاه را با آن تغییر می‌دهد (Barakat, 2011).

فعالیت‌های انسانی از جمله فعالیت‌های صنعتی و شهرنشینی موجب انتشار و وارد شدن طیفی از انواع فلزات سنگین به محیط اطراف می‌شود. کادمیم یکی از شایع‌ترین فلزات سنگین است که سمیت بالایی دارد (Pinot et al., 2000). سرب از دیگر فلزات سنگین است که معمولاً به دلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی و سایر فعالیت‌های شهرنشینی در پساب‌های شهری دیده می‌شود (Davis et al., 2001). آرسنیک فلز سنگین دیگری است که به دلیل بار منفی، نسبت به کاتیون‌ها رفتار متفاوتی در خاک و ریشه گیاه نشان می‌دهد و شدت سمیت مطلق بالاتری نسبت به سایر فلزات سنگین دارد (Davis et al., 2001).

گیاهان بیش‌انباشتگر، قادر به جذب و تجمع فلزات سنگین در سطوح بالا در بافت‌های خود بوده و به این طریق قادر به پاکسازی محیط و پالایش آن می‌باشند. توانایی این گیاهان در تجمع فلزات

<sup>1</sup> Tamarix hispida



## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- شرایط رشد

برای کشت گیاه سورگوم شیرین در گلخانه، ابتدا مقداری خاک مزرعه (بافت رس با مقدار کمی ماسه و مواد آلی) تهیه و پس از یکسان سازی در گلدان‌های به حجم ۱۰ لیتری تقسیم شد. به‌طور میانگین ۳ تا ۵ بذر از گیاه مذکور در یک گلدان به ارتفاع حدود ۳۰ سانتی‌متر (۱۵ کیلوگرم خاک) در دوره نوری ۱۶ ساعت نور و ۸ ساعت تاریکی در محدوده دمایی ۱۸ تا ۲۸ درجه سلسیوس رشد داده شد (Pacovsky et al., 1985). گلدان‌ها سه بار در هفته و به مدت ۱۲ هفته در دوره رشد توسط پساب آبیاری شدند.

## ۲-۲- آنالیز خاک

نمونه‌های خاک در دو مرحله برداشت شد. در مرحله اول قبل از کشت نمونه‌های مربوطه ۱۰۰ گرم خاک به‌طور کلی برداشت شد و پس از همگن سازی برای آنالیز بر اساس استانداردهای مربوطه به آزمایشگاه خاک ارجاع شد (جدول ۱). در مرحله دوم پس از پایان کشت از ۵ سانتی‌متری سطح هر یک از گلدان‌ها در تیمارها و تکرارهای مختلف مقدار یک گرم خاک برداشت شد و همراه با نمونه‌های بافتی به‌منظور مقایسه میزان فلزات سنگین آن به آزمایشگاه انتقال یافت.

## ۲-۳- تیمار پساب

به‌منظور استفاده از پساب برای آبیاری ابتدا ۱۵۰۰ لیتر پساب از تصفیه‌خانه مرکزی شهر قم، شامل ۲ ماژول تصفیه با قدرت تقریبی ۲۰۰ لیتر بر ثانیه، برداشت شد و در تانکری ذخیره شد. این تصفیه‌خانه علاوه بر فاضلاب منازل مسکونی از برخی از کارگاه‌های حاشیه شهری هم فاضلاب دریافت می‌نماید. به‌منظور

توقف فعالیت‌های بیولوژیک و کاهش تغییرات کیفیت ضد عفونی با ترکیبات اکسیژنه به نسبت ۱/۵ در هزار انجام شد و برای آبیاری در دوره رشد در مکان خنک ذخیره شد. پارامترهای مختلف پساب از جمله pH، انواع یون‌ها، فلزات سنگین و ترکیبات آلی با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد (جدول ۲).

به‌منظور ایجاد محلول‌های استاندارد تیمارهای فلزات سنگین در پساب، ۱ گرم از کلرید کادمیم، نیترات سرب و یا آرسنیک سدیم به یک لیتر آب مقطر اضافه می‌شد. یک میلی‌لیتر از محلول مربوطه به ۱۰۰ میلی‌لیتر از پساب اضافه شد به‌طوری که تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم از فلزات سنگین حاصل شد. ۱۰ میلی‌لیتر از این محلول به ۱۰۰ میلی‌لیتر پساب اضافه شد و اصطلاحاً تیمار ۱ میلی‌گرم از فلزات سنگین ایجاد شد. ۱۰ میلی‌لیتر از محلول آخر به ۱۰۰ میلی‌لیتر از پساب اضافه شد و تیمار ۰/۱ میلی‌لیتر را ایجاد نمود.

کلیه تیمارها پس از هر بار تولید به سرعت برای آبیاری مورد استفاده قرار می‌گرفتند. آبیاری سه بار در هفته انجام می‌شد و در هر بار یک لیتر پساب به ازای هر گلدان (حاوی ۱۰ کیلوگرم خاک) مورد استفاده قرار می‌گرفت که در عمل قادر به اشباع کل گلدان بود. نتایج آنالیزها در جدول ۲ نشان می‌دهد که میزان pH و غلظت یونی پساب مورد آزمایش در سطح بالایی بوده است.

## ۲-۴- هضم اسیدی

در پایان دوره رشد، گیاهان رویش یافته در تیمارهای مختلف و شاهد، برداشت شد و به بخش‌های مختلف ریشه، ساقه، برگ و دانه تقسیم‌بندی شدند. در مورد تیمارهای کادمیم و سرب، نمونه‌ها در دمای ۸۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت خشک و سپس در دمای ۵۵۰ درجه به مدت ۵ ساعت به خاکستر تبدیل شدند. ۱۰۰ میلی‌گرم

جدول ۱- پارامترهای خاک

Table 1. Soil parameters

No	Parameter	Value	Dimension
1	Texture		Loam
2	Clay	19	%
3	Silt	30	%
4	Sand	51	%
5	Moisture (SP)	45	%
6	Electrical exchange (EC)	13.6	ds/m
7	pH		7.9
8	Total neutralizing value	21.5	%
9	Organic Carbon (O.C.)	1.3	%



جدول ۲- پارامترهای پساب

Table 2. Wastewater parameters

No	Parameter	Dimension	Value
1	pH		8.3
2	Total hardness (CaCO <sub>3</sub> )	mg/L	832
3	Ca hardness	ppm	128
4	CL	ppm	700
5	Total alkanity (CaCO <sub>3</sub> )	ppm	323
6	Mg hardness	ppm	122
7	SO <sub>4</sub>	ppm	670
8	NO <sub>3</sub>	ppm	5.7
9	NO <sub>2</sub>	ppm	0.06
10	NH <sub>4</sub>	ppm	28
11	PO <sub>4</sub>	ppm	2.2
12	EC	s/cmμ	3930
13	Salt	%	2
14	Na	ppm	520
15	K	ppm	18
16	COD	ppm	55
17	BOD <sub>5</sub>	ppm	21.3
18	Turbidity	NTU	4
19	TDS	mg/lit	2080
20	Temperature	°C	20
21	AL	mg/L	0.010
22	Fe	mg/L	0.439
23	Cu	mg/L	0.017
24	Ni	mg/L	0.045
25	Zn	mg/L	0.056
26	Cr	mg/L	0.015
27	Mn	mg/L	0.085
28	CN	mg/L	0.012
29	Pb	mg/L	0.007
30	Cd	mg/L	0.001<
31	As	mg/L	0.007
32	Hg	mg/L	0.001<
33	Sn	mg/L	1.53
34	Br	mg/L	1.9
35	Mo	mg/L	0.009
36	Sb	mg/L	0.008
37	Se	mg/L	0.006
38	V	mg/L	0.004

غلیظ برای استخراج فلزات سنگین مورد استفاده قرار گرفت (Sposito et al., 1982).

تمامی نمونه‌ها توسط کاغذ واتمن فیلتر شدند و به منظور اندازه‌گیری غلظت عناصر مربوطه به دستگاه جذب اتمی مدل AA240 FLAME تزریق شدند.

#### ۲-۵- ضریب جذب

ضریب جذب، میزان توانایی گیاه یا خاک در تجمع فلزات سنگین یا

از خاکستر مربوطه برای استخراج کادمیم و سرب با استفاده از HCl مورد استفاده قرار گرفت (Boline and Schrenk, 1976).

در مورد تیمار آرسنیک، ۱۰۰ میلی‌گرم از خاکستر با استفاده از H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و HNO<sub>3</sub> به منظور استخراج عنصر مربوطه مورد استفاده قرار گرفت (Abedin et al., 2002).

نمونه‌های خاک نیز از هر تیمار برداشت شد و پس از خشک شدن و پودر شدن، به مدت ۵ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس حرارت داده شد. یک گرم از خاک نیز با استفاده از HCL و HNO<sub>3</sub>



جدول ۳- میزان تجمع فلزات سنگین در خاک و گیاه سورگوم آبیاری شده با پساب

Table 3. Soil and plant heavy metal accumulation in sorghum irrigated with municipal wastewater

Wastewater treatment (ppm)	Soil(mg/Kg Dried weight)			Plant (mg/Kg Ash weight)		
	Cadmium*	Lead*	Arsenic	Cadmium*	Lead	Arsenic*
10	123 ± 5	12.5 ± 0.5	6.6 ± 1.5	238 ± 33	183 ± 43	18 ± 7
1	37 ± 2	10.5 ± 0.5	6.3 ± 1.5	123 ± 28	180 ± 39	17 ± 5
0.1	5 ± 1	8.5 ± 0.5	4.8 ± 2.2	75 ± 5	117 ± 29	1.6 ± 1.3
Control	0	0.63±0.15	0.47±0.09	0	19 ± 2.6	0.86±0.05
Sum	55 ± 52	10.5 ± 1.7	5.9 ± 1.7	145 ± 75	160 ± 46	12.5 ± 9

\* The difference of means between groups (10, 1, 0.1 and control) of this column is significant at the 0.05 level

گرفت. آنالیز ANOVA نشان داد که اختلاف در بین تمامی گروه‌ها در سطح ۵ درصد معنی‌دار است (جدول ۳).

در مورد سرب، تیمارهای ۱، ۰.۱ و ۰/۱ ppm از نیترات سرب با سه تکرار مورد آزمون قرار گرفت (جدول ۳). نتایج نشان داد که اختلاف بین گروه‌ها معنی‌دار نیست. به عبارت دیگر زمانی که غلظت سرب در پساب تحت شرایط آزمایش تا ۱۰۰ برابر تغییر کرد، میزان تجمع سرب در گیاه افزایش معنی‌داری نداشت (جدول ۳).

در مورد آرسنیک، تیمارهای ۱، ۰.۱ و ۰/۱ ppm از آرسنیک سدیم با سه تکرار مورد آزمون قرار گرفت. آنالیز LSD نشان داد تیمارهای ۱ و ۰.۱ ppm تفاوت معنی‌داری در انباشت فلز مذکور نسبت به تیمار ۰/۱ در سطح معنی‌داری ۵ درصد از خود نشان می‌دهند. به عبارت دیگر زمانی که غلظت آرسنیک در پساب افزایش می‌یابد، میزان جذب آن در گیاه تنها در محدوده خاصی افزایش داشته است (جدول ۳).

شکل ۱ نمودار انباشت کادمیم در خاک را نشان می‌دهد. نمودار

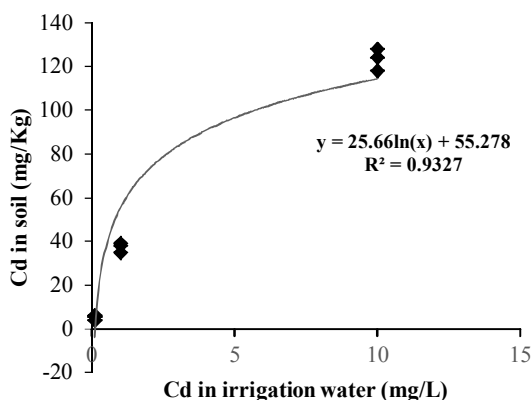


Fig. 1. Heavy metals curves accumulation in soil

شکل ۱- نمودار انباشت کادمیم در خاک

یون‌ها است. این ضریب می‌تواند از تقسیم غلظت یک عنصر در دو نمونه برای مثال خاک و گیاه به دست آید. برای مثال ضریب جذب گیاه به خاک با معادله ۱ قابل محاسبه است

$$\text{ضریب جذب} = \frac{\text{غلظت فلز سنگین در گیاه}}{\text{غلظت فلز سنگین در خاک}} \quad (1)$$

ضریب جذب خاک به آبیاری، گیاه به آبیاری و گیاه به خاک به واسطه معادله بالا مورد محاسبه قرار گرفت. ضریب جذب در بخش‌های مختلف گیاه نیز با معادله ۲ مورد مقایسه قرار گرفت

$$\text{ضریب جذب} = \frac{\text{ضریب جذب در بافت اول}}{\text{ضریب جذب در بافت دوم}} \quad (2)$$

## ۲-۶- آنالیز آماری

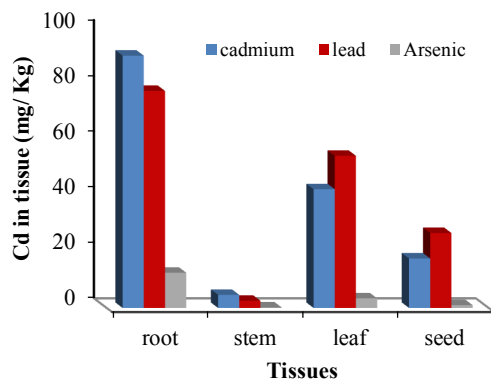
نرم‌افزار SPSS ورژن ۲۰ (SAS Corp., Chicago, USA) به منظور آنالیزهای آماری مورد استفاده قرار گرفت. توزیع نرمال داده، غیر وابسته بودن و مستقل بودن و اتفافی بودن داده‌ها با آزمون میانگین تیمارها با آزمون ANOVA یک طرفه و LSD با آپشن hoc مورد آزمون قرار گرفت. آنالیز چند متغیره نیز توسط ANOVA انجام شد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- تجمع فلزات سنگین در گیاه

گیاه سورگوم با سه تیمار فلزات سنگین در پساب شامل مقادیر ۱۰، ۰.۱ و ۰/۱ ppm از کلرید کادمیم با سه تکرار مورد آزمون قرار

گرفت. میزان کادمیم و سرب بافت‌های مختلف سورگوم بر اساس وزن خاکستر برابر بوده و اختلاف بین بافت‌ها معنی‌دار نیست. در مورد آرسنیک اختلاف غلظت بین بافت‌ها معنی‌دار بوده است. به‌طور کلی ریشه‌ها آرسنیک بیشتری را نسبت به بخش‌های هوایی انباشت می‌نمایند ( $P < 0.05$ ). بر اساس مقیاس اندازه‌گیری میزان فلزات سنگین در بافت‌ها بر اساس وزن خشک، اختلاف بین بافت‌ها معنی‌دار بود به‌طوری‌که ریشه، بالاترین میزان تجمع پذیری فلزات سنگین و ساقه، کمترین میزان فلزات سنگین را داشتند که به‌صورت الگوی زیر می‌توان ارائه کرد: ریشه < یا برگ < یا برابر ساقه = بذر. هر سه یون کادمیم، سرب و آرسنیک از الگوی تقریبی مشابهی برخوردار بودند (جدول ۴)



**Fig. 2.** The cadmium accumulation in various tissue of sorghum based on mg/kg dried weight in 10 treatments of wastewater

شکل ۲- میزان کادمیم در بافت‌های مختلف گیاه سورگوم بر اساس میلی‌گرم بر کیلوگرم از وزن خشک گیاه در تیمار پساب ۱۰ میلی‌گرم در لیتر از کادمیم در پساب.

افقی میزان کادمیم در پساب آبیاری و نمودار عمودی میزان تجمع آن در خاک بر اساس میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است. نتایج نشان می‌دهد در غلظت‌های بالای فلزات سنگین در پساب، الگوی ترتیبی انباشت فلزات سنگین در گیاه سورگوم به شرح زیر است: کادمیم < سرب < آرسنیک. در حالی‌که در غلظت‌های پایین فلزات سنگین در پساب، الگوی ترتیبی انباشت در گیاه به صورت زیر است: سرب < کادمیم < آرسنیک.

### ۲-۳- تجمع فلزات سنگین در خاک

با توجه به ورود فلزات سنگین از پساب آبیاری به خاک و تجمع احتمالی آن در خاک در شرایط مزرعه و تأثیر آن بر انباشت در گیاهان، شناخت میزان تجمع آن در خاک در این آزمایش از اهمیت زیادی برخوردار است. جدول ۳ میزان تجمع فلزات سنگین در خاک و تغییرات آن را در تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج اگر چه میزان غلظت فلزات سنگین در آب آبیاری تا ۱۰۰ برابر تغییر می‌نماید، میزان آرسنیک خاک، تغییراتی نداشته و تغییرات سرب خاک نیز علی‌رغم معنی‌دار بودن قابل توجه نیست. در مورد کادمیم با افزایش میزان فلزات سنگین پساب آبیاری، میزان تجمع آن در خاک نیز با یک نمودار متناظر افزایش می‌یابد (شکل ۲).

### ۳-۳- تیمار بافت

ریشه، ساقه، برگ و بذر گیاه سورگوم در تیمارهای مختلف فلزات سنگین و بر اساس وزن خشک و وزن خاکستر مورد آنالیز قرار

جدول ۴- مقدار فلزات سنگین در بافت‌ها بر اساس وزن میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک و میلی‌گرم بر کیلوگرم خاکستر

**Table 4.** Content of heavy metals in tissue based on dried and ash weight in Sorghum Bicolor

Tissue	Cadmium		Lead		Arsenic	
	Ash	Dried weight*	Ash	Dried weight*	Ash*	Dried weight*
Root	241 ± 67	90 ± 34	195 ± 73	78 ± 29	31 ± 10	12 ± 4
Stem	225 ± 65	4.7 ± 1	143 ± 49	2.5 ± 0.9	10 ± 2	0.16 ± .05
Leaf	240 ± 51	42 ± 2	274 ± 70	54 ± 14	17 ± 2	3.4 ± 0.4
Seed	250 ± 56	17 ± 3.4	170 ± 139	26 ± 20	14 ± 2.5	1 ± 0.2
Average	239 ± 52	38 ± 37	195 ± 92	40 ± 33	18 ± 9	4 ± 5

\*Significant at 95%



### ۳-۴- زهاب

بلکه به دلیل بالا بودن ضریب تجمع پذیری خاک نسبت به آرسنیک در غلظت‌های پایین است. این نتایج نشان می‌دهند که ضریب جذب فلزات سنگین سرب، کادمیم و آرسنیک در گیاه سورگوم شیرین به شدت به نوع فلز سنگین و غلظت آن وابسته است. پساب منبع جدیدی از آب در آبیاری است که حاوی انواعی از آلاینده‌ها به ویژه فلزات سنگین در غلظت‌های مختلف است که در طبیعت تجزیه نمی‌شوند. گیاه پالایی یکی از روش‌های بیولوژیک در حذف فلزات سنگین از خاک و سایت‌های آلوده محسوب می‌شود؛ به طوری که برخی از گیاهان قادر به تجمع بیش از ۰/۱ درصد از وزن خشک خود از فلزات سنگین نادر یا سمی مانند کادمیم می‌باشند (Baker and Brooks, 1989).

گیاهان بسیاری به عنوان بیش انباشتگر شناسایی شده اند اما بسیاری از آنها کاربردهای بسیار محدودی در کشاورزی و یا صنعت دارند و علاوه بر آن پس از کاربرد به عنوان پالاینده محیط، قابلیت استفاده در تغذیه را ندارند (Guerinot and Salt, 2001, Salt et al., 1998). از آنجا که فرایند گیاه پالایی فرایندی هزینه‌بر بوده و پسماندهای آلاینده را نیز تولید می‌نماید، انتخاب نوع گیاه اهمیت بسیار بالایی دارد. در این پژوهش سورگوم شیرین به دلیل امکان جذب انواع فلزات سنگین و کاربردهای متنوع آن در تغذیه و همچنین تولید بیواتانول صنعتی انتخاب شد (Wang et al., 2014). گیاه آلوده شده پس از فرایند گیاه پالایی می‌تواند به منظور تولید بیوانژژی مورد استفاده قرار گیرد و فرایند گیاه پالایی پساب‌های شهری در مزارع را اقتصادی نماید. توانایی خاک در تجمع فلزات سنگین به ویژگی‌های خاک و ترکیبات آن بستگی دارد (Hartley et al., 2004).

در این پژوهش میزان فلزات سنگین خاک متنوع بود که این امر می‌تواند بر میزان تجمع آن در گیاه و سمیت آن مؤثر باشد (جدول ۳).

با افزایش میزان کادمیم از ۰/۱ به ۱۰ ppm در پساب، نمودار تجمع پذیری آن در خاک و گیاه نیز به صورت لگاریتمی افزایش می‌یابد (Behbahaninia et al., 2010).

میزان سرب خاک و گیاه همبستگی اندکی را با میزان آن در آب آبیاری در پساب نشان داد. میزان این غلظت در تیمار ۰/۱ با کادمیم قابل مقایسه بود ولی با افزایش حدود ۱۰۰ برابری غلظت

برای بررسی یا شبیه‌سازی عمق خاک‌ها و یا احتمال آلودگی آب‌های زیرزمینی به واسطه آبیاری با پساب، گلدان‌هایی که با تیمار ۱۰ ppm از فلزات سنگین طی دوره رشد تیمار شده بودند، انتخاب شدند. گلدان‌های مربوطه توسط پساب فاقد تیمار، آبیاری شدند به طوری که خروجی زهاب آن برای آنالیز با تکرار سه گلدان به ازای هر تیمار فلز سنگین جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد اگر چه میزان غلظت کادمیم در خاک نسبت به سایر تیمارها در بالاترین سطح بوده است ولی میزان غلظت آن در زهاب در پایین‌ترین سطح نسبت به سرب و آرسنیک قرار داشته است (جدول ۵).

### جدول ۵- زهاب جمع‌آوری شده پس از دوره رویشی در تیمار ۱۰

میلی‌گرم در لیتر از پساب فلزات سنگین

Table 5. Drainage collected after cultivation at 10 mg/L heavy metal in wastewater

Treatment	Soil (mg/kg based on dried weight)	Run off (mg/L)
Cadmium	123 ± 5	0.00*
Lead	8.5 ± 0.5	5.8 ± 0.76
Arsenic	4.8 ± 2	4 ± 2.6

\* not detectable (<0/1 mg/L)

### ۳-۵- ضریب جذب

با توجه به متفاوت بودن مقدار جذب و انباشت در تیمارهای مختلف و در بین فلزات سنگین و در جهت کاهش اثر قدرمطلق عددی داده‌ها بر نتایج آزمایش، ضریب جذب به جای مقدار مطلق عناصر به منظور مقایسه قدرت پالاینده گیاه نسبت به عناصر مختلف مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که خاک می‌تواند موجب جذب یا پالایش فلزات سنگین از پساب در غلظت‌های پایین شود. در مورد عناصر کادمیم و سرب، ضریب جذب گیاه نسبت به پساب بسیار بالا و به ترتیب ۱۱۳۶ و ۷۵۰ برابر بود ولی نسبت به خاک تنها ۲ تا ۱۸ برابر بود که این امر نشان از ضریب جذب بالای خاک نسبت به این عناصر دارد.

ضریب جذب خاک در انباشت کادمیم و سرب در غلظت‌های پایین در پساب تقریباً برابر بود و با افزایش غلظت در پساب، این ضریب به سرعت کاهش یافت. توانایی گیاه در پالایش آرسنیک از پساب در غلظت‌های پایین آرسنیک، بیشتر از غلظت‌های بالا به نظر می‌رسد که این امر نه به دلیل توانایی مطلق گیاه در این مورد





مؤید این نظر باشد. بنابراین رسوب یون‌ها موجب کاهش غلظت و دسترسی یا فعالیت آنها در خاک و خروج آنها به صورت آبشویی از طریق زهاب می‌شود.

این نتایج ثابت می‌کند که پساب بر اساس ویژگی‌های شیمیایی خود، ظرفیت مشخصی از فلزات سنگین دارد و در صورت استفاده برای کشاورزی، حاوی مقادیر پایین فلزات سنگین خواهد بود.

آنالیز بافت سورگوم بر اساس وزن خاکستر نشان داد که میزان کادمیم یا سرب در تمامی بخش‌های گیاه برابر بوده و این یون‌ها به صورت یکسان در کلیه بافت‌ها و اندام‌ها تجمع یافته‌اند. بهر حال این نتیجه در شرایط مقیاس وزن خشک گیاه مشاهده نشد.

از آنجا که ساقه و بذر در گیاه سورگوم شیرین محل ذخیره هیدرات‌های کربن است (Almodares et al., 2013)، ذخیره فلزات سنگین در سورگوم به وزن خاکستر یا محتوای ماکروالمان‌ها در گیاه وابسته بوده و ارتباط خاصی به میزان ذخائر هیدرات‌های کربن و نوع بافت ندارد. گزارش پژوهشگران گذشته در مورد ارتباط نوع بافت با میزان تجمع فلزات سنگین ممکن است به عدم محاسبه و یا در نظر گرفتن بافت‌های ذخیره‌ای وابسته باشد. این نظرات در مورد کاهش انتقال فلزات سنگین از ریشه به بخش‌های هوایی در گیاهان را نیز به نوعی نقض می‌نماید زیرا غالب این

سرب در پساب، میزان آن در خاک کمتر از  $0/3$  افزایش یافت ( $y = 0.868\ln(x) + 10.5$ ,  $R^2 = 0.941$ ). به همین طریق نیز غلظت آن در گیاه، به دلیل کم بودن تغییرات سرب خاک در تیمارهای مختلف، معنی‌دار نبود ( $P > 0.05$ ). از آنجا که سرب در زهاب قابل اندازه‌گیری است (جدول ۶)، به نظر می‌رسد که یون مذکور در زمان آبیاری از گلدان‌ها خارج شده و در نتیجه نتایج مذکور با برخی از منابع که عنوان کرده‌اند که سرب موجود در آبیاری در لایه‌های اولیه خاک جذب می‌شود، تطابق ندارد (Behbahaninia et al., 2010).

میزان آرسنیک خاک نیز در تیمارهای مختلف در زهاب قابل مشاهده بود که با برخی پژوهش‌ها در مورد جذب آرسنیک در لایه‌های سطحی خاک مطابقت ندارد (Azad et al., 2006). این امر ممکن است به متفاوت بودن ویژگی‌های حلالیت کادمیم، سرب و آرسنیک در پساب و خاک از جمله واکنش به pH و یا سولفات وابسته باشد (Sudhakar and Rao, 2010).

این موضوع می‌تواند منجر به کاهش حلالیت و یا رسوب عناصر مذکور در زمان اضافه نمودن به پساب برای تولید تیمار شود. در مورد سرب مواردی از تغییر در شفافیت حلال در زمان اضافه نمودن تیمار سرب به آن مشاهده شد که تا اندازه‌ای می‌تواند

جدول ۶- ضرب جذب فلزات سنگین در خاک و گیاه بر اساس میزان آن در پساب و ضرب جذب فلزات سنگین در گیاه بر اساس میزان آن در پساب و ضرب جذب در گیاه بر اساس میزان آن در خاک و مقایسه ضرایب جذب گیاه به خاک در فلزات مختلف

Table 6. Absorption coefficient of soil and plant based on its amount in soil and comparison of the absorption coefficient of plant to soil in different metals

Wastewater treatment (ppm)	Soil/ Wastewater			Plant/ Wastewater			Plant/Soil			Plant/Soil Plant/Soil			
	Cd	Pb	As	Cd	Pb	As	Cd	Pb	As	Pb/Cd	Pb/As	Cd/As	
0.0	Mean	0	126	90	.00	5739	147	.00	44	1.4	.00	32	.00
	Std. Deviation	0	4	4	.0	947	14	.00	5.6	.37	.00	6.8	.0
0.1	Mean	51	85	48	750	1136	33	14.8	13.3	0.7	0.9	30.8	37
	Std.Dev.	10.4	5.0	22.5	50.0	251.1	35.9	2.3	2.2	0.7	0.2	18.9	25.3
1.0	Mean	37.3	10.5	6.3	123.7	180	15.2	3.3	17.2	2.5	5.5	7.1	1.5
	Std.Dev.	2.1	0.5	1.5	28.3	39.9	3.6	0.7	4.1	0.9	2.1	1.2	0.7
10.0	Mean	12.3	1.3	0.7	23.8	18.3	2.0	1.9	14.6	3.1	7.8	5.0	0.7
	Std.Dev.	0.5	0.1	0.2	3.3	4.4	0.2	0.3	3.3	0.7	2.3	1.8	0.1
Mean	Mean	33	32	18.4	299	445	16.9	6.7	15.1	2.1	4.7	14.3	13.1
	Std.Dev.	18.0	39.8	25.2	342.1	538.6	22.7	6.2	3.3	1.3	3.4	15.6	22.0



است. به‌رحال این اختلاف ممکن است به جذب مستقیم آرسنیک از پساب به‌صورت پلاک‌ها در سطح و بخش آپوپلاستی ریشه که توسط برخی از پژوهشگران گزارش شده است، قبل از خروج از خاک به‌صورت زهاب و یا مبادله با ریزوسفر باشد (Gomati Swain et al., 2014).

### ۳-۶- ضریب تجمع پذیری فلزات سنگین

نتایج نشان می‌دهد که ضریب تجمع‌پذیری فلزات سنگین در سورگوم به واسطه برخی از فاکتورها از جمله نوع یون و غلظت آن تغییر می‌یابد. بنابراین در غلظت پایین فلزات سنگین در آبیاری، ضریب جذب به صورت زیر است

کادمیم = سرب < آرسنیک (جدول ۶).

بر اساس تیمار آبیاری، ضریب جذب گیاه و خاک در مورد کادمیم، سرب و آرسنیک نزولی است (شکل ۳). این معادلات نشان می‌دهد که آهنگ ضریب جذب یا توانایی گیاه در جذب فلزات رابطه معکوسی با غلظت آنها دارد. به‌عبارت دیگر، بالاترین میزان گیاه‌پالایی در غلظت‌های پایین اتفاق افتاده، بنابراین به‌دلیل بالا بودن این ضریب جذب در خاک و گیاه، عدم آلاینده‌گی منابع آبی در استفاده از پساب‌های با غلظت‌های پایین، بیشتر قابل انتظار است.

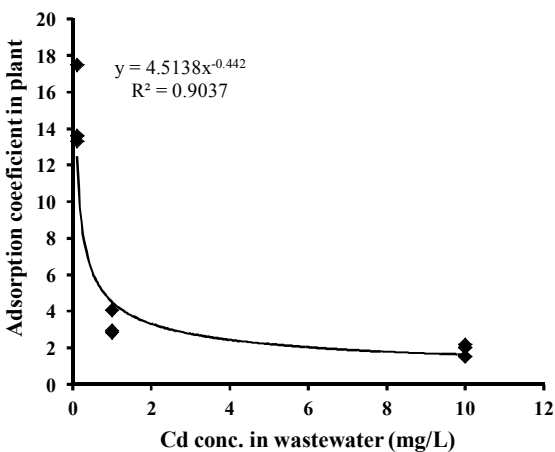


Fig. 3. Absorption coefficient of heavy metals in sorghum based on irrigation treatments

شکل ۳- ضریب جذب کادمیم در گیاه سورگوم نسبت به تغییرات غلظت آن در خاک

پژوهش‌ها بر اساس وزن خشک گیاه طراحی شده و ممکن است به همین دلیل نتایج متفاوتی به‌دست آورده باشند (Cakmak et al., 2000, Erika Fediuca, 2002, M-Kalantari and Oloumi, 2005).

پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که توزیع آرسنیک در گیاهان زراعی از قبیل پیاز، آفتاب گردان، برنج و سیب زمینی به‌صورت الگوی زیر است ریشه < ساقه < برگ < بذر یا بخش خوراکی گیاه (Dahal et al., 2008). اما این ساختار یا ترتیب بر اساس وزن خشک در گیاه سورگوم به شرح زیر است ریشه < برگ = بذر = ساقه. همانطور که در بالا در مورد سرب و کادمیم ذکر شد، ساقه سورگوم محل ذخیره هیدروکربن‌ها بوده و از این نظر این مطالعات نشان می‌دهد که تجمع کربوهیدرات‌ها در گیاه مذکور هیچ‌گونه ارتباط منطقی با تجمع فلزات سنگین ندارد و یا حداقل نسبت فلزات سنگین به ماکروالمان‌های سلولی (خاکستر) متأثر از میزان کربوهیدرات‌های سلولی نیست.

آرسنیک در ریشه گیاه سورگوم نسبت به بافت‌های دیگر بر اساس مقیاس وزن خاکستر بیشترین تجمع را دارد. این نتیجه توسط سایر پژوهشگران نیز در سایر گونه‌های زراعی گزارش شده است (Dahal et al., 2008). این امر نشان دهنده متفاوت بودن ذخیره آرسنیک در ریشه در مقایسه با دیگر بافت‌ها و دیگر یون‌ها مانند کادمیم و سرب است. این نتایج نشان می‌دهد که الگوی توزیع آرسنیک در ریشه نسبت به بخش‌های هوایی با شرایط مشابه سرب و کادمیم در گیاه سورگوم متفاوت است.

پژوهشگران گزارش نموده‌اند که در برخی از گونه‌ها از قبیل برنج، آرسنیک پلاک‌های نازکی را در سطح ریزودرم ریشه با هیدروکسید آهن ایجاد می‌کند که سطح ریشه را می‌پوشاند (Neidhardt et al., 2015). این پوشش میزان جذب آرسنیک را کاهش داده و میزان آرسنیک ناحیه‌ای بافت (آرسنیک آپوپلاستی) را نیز افزایش می‌دهد. به‌همین طریق کم بودن توانایی مطلق سورگوم در انباشت بافتی آرسنیک و بالا بودن میزان آرسنیک ریشه در مقایسه با دیگر بافت‌ها در مقیاس وزن خاکستر را می‌توان به این مورد ارتباط داد.

علی‌رغم ثابت ماندن میزان آرسنیک خاک، با افزایش آن در تیمارهای آبیاری، ضریب جذب آرسنیک گیاه نسبت به خاک افزایش می‌یابد که این امر در مورد کادمیم و سرب مشاهده نشده

به ویژه در پساب‌های شهری محسوب می‌شود؛ به طوری که در صورت عدم کشت گیاه مذکور، یون‌های مورد نظر می‌توانند تا سطح سمی و خطرناکی در محیط تجمع یابند، یا به لایه‌های پایین تر خاک و یا سفره‌های آبی نفوذ نمایند. گیاه برداشت شده حاوی مقادیری از فلزات سنگین است و باید در اهداف غیر غذایی مانند تولید بیوانرژی به کار رود.

در مورد آلودگی آرسنیک، به دلیل قدر مطلق پایین جذب و انباشتگی، گیاه سورگوم برای گیاه پالایی مناسب نیست ولی در غلظت‌های بالاتر و یا حتی در پساب‌های صنعتی کارایی بهتری دارد. بهرحال گیاه برداشت شده حاوی مقادیری از فلزات سنگین است و باید در اهداف غیر غذایی مانند تولید بیوانرژی به کار رود. این پژوهش نشان می‌دهد ضرب جذب، تغییرات ضرب جذب، میزان کل انباشتگی و الگوی تجمع پذیری بافتی سرب و کادمیم به عنوان آنیون با آرسنیک به عنوان کاتیون کاملاً متفاوت است به طوری که هر گروه از فلزات سنگین رفتار مختص خود را در گیاه سورگوم دارند. لذا برای انتخاب گیاه به منظور گیاه پالایی به ازای هر یک از فلزات سنگین و محدوده غلظتی باید آزمایش مستقلی صورت پذیرد.

#### ۵- قدردانی

این پژوهش مورد حمایت مسئولان محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان بوده است، لذا از آنان قدردانی می‌شود. همچنین از سازمان فضای سبز شهرداری قم و اداره کل حفاظت از محیط زیست قم به دلیل حمایت‌های ایشان قدردانی می‌شود.

#### References

- Abedin, M. J., Cotter-Howells, J. & Meharg, A. A. 2002. Arsenic uptake and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) irrigated with contaminated water. *Plant and Soil*, 240 (9), 311-319.
- Almodares, A., Hotjatabady, R. H. & Mirniam, E. 2013. Effects of drought stress on biomass and carbohydrate contents of two sweet sorghum cultivars. *Journal of Environmental Biology*, 34, 585-589.
- Azad, M. A. K., Monda, A. H. M. F. K., Hossain, I. & Moniruzzaman, M. 2006. Experiment for arsenic accumulation into rice cultivated with arsenic enriched irrigation water in bangladesh. *American Journal of Environmental Protection*, 1 (5), 54-58.
- Baker, A. J. M. & Brooks, R. R. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1 (145), 81-121.
- Barakat, M. A. 2011. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 4, 361-377.

با توجه به برابر بودن ضرب جذب سرب و کادمیم، مشاهده سرب در زهاب گلدان‌ها، عدم مشاهده کادمیم در زهاب، بالا بودن میزان غلظت کادمیم در خاک، و کاهش سرب در خاک، تفاوت میزان تجمع پذیری کادمیم و سرب در بافت گیاه را می‌توان تفاوت در غلظت تجمع آن در خاک دانست. با توجه به عدم وابستگی میزان سرب و کادمیم به نوع بافت در گیاه سورگوم بر اساس مقیاس وزن خاکستر، (جدول ۴)، می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که یون‌های مذکور به واسطه ناقلین کاتیونی غیر اختصاصی و یا ناقلین عمومی در گیاه جذب می‌شوند. این نتایج شباهت احتمالی ناقلین کادمیم و سرب که توسط برخی دیگر از پژوهشگران گزارش شده است را نشان می‌دهد. همچنین نشان می‌دهد که ممکن است این یون‌ها به واسطه کانال‌های کاتیونی غیر انتخابی مرتبط با پتانسیل بالای غشایی (Wang et al., 2007) و ناقلین پروتئینی با میل ترکیبی پایین که قادر به انتقال پتاسیم، سدیم، کلسیم، سرب و کادمیم هستند، نقش میانجی‌گری داشته باشد. علاوه بر آن نمودار نزولی اشباع شونده ضرب جذب کادمیم با نمودار ساده انتشار که نوعی انتقال بدون انرژی و کاتوره‌ای است، متفاوت است (Wojas et al., 2007). بنابراین کادمیم نیازمند یک ناقل یا جایگاه فعال پروتئین برای انتقال از عرض غشا و تجمع در گیاه با ضرب بالا تمایل در غلظت‌های پایین است که نتایج سایر پژوهشگران در این زمینه را تأیید می‌کند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به ضرب جذب بالا در غلظت‌های پایین از فلزات سنگین، سورگوم گیاه مناسبی برای گیاه پالایی سرب و کادمیم از پساب



- Behbahaninia, A. & Mirbagheri, S. A. 2010. Effects of sludge from wastewater treatment plants on heavy metals transport to soils and groundwater. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 7 (5), 401-406.
- Boline, D. R. & Schrenk, W. G. 1976. A method for the determination of cadmium in plant material by atomic absorption spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 30 (4), 607-610.
- Cakmak, I., Welch, R. M., Erenoglu, B., Römheld, V., Norvell, W. A. & Kochian, L. V. 2000. Influence of varied zinc supply on re-translocation of cadmium (109Cd) and rubidium (86Rb) applied on mature leaf of durum wheat seedlings. *Plant and Soil*, 219 (5), 279-284.
- Chami, Z. A., Amer, N., Bitar, L. A. & 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 (13), 3957-3970.
- Dahal, B. M., Fuerhacker, M., Mentler, A., Karki, K. B., Shrestha, R. R. & Blum, W. E. 2008. Arsenic contamination of soils and agricultural plants through irrigation water in Nepal. *Environmental Pollution*, 155, 157-163.
- Davis, A. P., Shokouhian, M. & NI, S. 2001. Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources. *Chemosphere*, 44, 997-1009.
- Erika Fediuca, L. E. 2002. Physiological and biochemical aspects of cadmium toxicity and protective mechanisms induced in Phragmites australis and Ttypha latifolia. *Journal of Plant Physiology*, 7 (159), 265-271.
- 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.
- Gnansounou, E., Dauriat, A. & Wyman, C.E. 2005. Refining sweet sorghum to ethanol and sugar: Economic trade-offs in the context of North China. *Bioresour Technol*, 96, 985-1002.
- Gomati Swain, Adhikari, S. & Mohanty, P. 2014. Phytoremediation of copper and cadmium from water using water Hyacinth, Eichhornia Crassipes. *International Journal of Agricultural Science and Technology*, 2 (7), 1-7.
- Guerinot, M. L. & Salt, D. E. 2001. Fortified foods and phytoremediation. Two sides of the same coin. *Plant Physiol*, 125, 164-167.
- Neidhardt, H. B., Kramarb, U., Tangb, X., Guoc H. & Norrab, S. 2015. Arsenic accumulation in the roots of Helianthus annuus and Zea mays by irrigation with arsenic-rich groundwater: Insights from synchrotron X-ray fluorescence imaging. *Chemie der Erde - Geochemistry*, 75 (9), 261-270.
- Hartley, W., Edwards, R. & Lepp, N. W. 2004. Arsenic and heavy metal mobility in iron oxide-amended contaminated soils as evaluated by short- and long-term leaching tests. *Environmental Pollution*, 131, 495-504.
- Keil, D. E., Berger-ritchie, J. & Mcmillin, G. A. 2011. Testing for toxic elements: A focus on arsenic, cadmium, lead, and mercury. *Laboratory Medicine*, 42 (8), 735-742.
- Kalantari, M. K. & Oloumi, H. 2005. Study the effects of CdCl<sub>2</sub> on lipid peroxidation and antioxidant compounds content in Brassica napus. *Iranian Journal of Science & Technology*, 29 (9), 201-208.
- Mashi, S. A. & Alhassan, M. M. 2007. Effects of wastewater discharge on heavy metals pollution in Fadama soils in Kano City, Nigeria. *Biomedical and Environmental Sciences*, 20, 70-77.



- Mojiri, A., Aziz, H. A., Tajuddin, R. B. M., Gavanji, S. & Gholami, A. A. 2015. Heavy metals phytoremediation from urban waste leachate by the common reed (*Phragmites australis*). *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants*, 2 (6), 75-81.
- Pacovsky, R. S., Paul, E. A. & Bethlenfalvay, G. J. 1985. Nutrition of sorghum plants fertilized with nitrogen or inoculated with *Azospirillum brasilense*. *Plant and Soil*, 85 (1), 145-148.
- Pilon-smits, E. 2005. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 56, 15-39.
- Pinot, F., Kreps, S. E., Bachelet, M., Hainaut, P., Bakonyi, M. & Polla, B. S. 2000. Cadmium in the environment: Sources, mechanisms of biotoxicity, and biomarkers. *Review of Environmental Health*, 15, 323-299.
- Saba, G., Parizanganeh, A. H., Zamani, A. & Saba, J. 2015. Phytoremediation of heavy metals contaminated environments: Screening for native accumulator plants in Zanjan-Iran. *International Journal of Environmental Research*, 9 (7), 309-316.
- Salt, D. E., Smith, R. D. & Raskin, I. 1998. Phytoremediation. *Annual Review of plant physiology plant Molecular Biology*, 49, 643-668.
- Sasan, Z., Mohammadi, M. J., Yari, A. R. & Neisi, A. 2017. Phytoremediation of heavy metals (Pb, Cd) by *Tamarix* along the Temby (Karon) River, Iran. *Archives of Hygiene Sciences*, 6 (7), 182-188.
- Sposito, G., Lund, L. J. & Chang, A. C. 1982. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases I. *Soil Science Society of America Journal*, 46, 260-264.
- Sudhakar, M. & Rao, G. C. R. 2010. Comparison of alkaline treatment of lead contaminated wastewater using lime and sodium hydroxide. *Journal of Water Resource and Protection*, 2 (9), 282-290.
- Wang, H., Shan, X., Liu, T., Xie, Y., Wen, B., Zhang, S., et al. 2007. Organic acids enhance the uptake of lead by wheat roots. *Planta*, 225, 1483-1494.
- Wang, M., Chen, Y., Xia, X., Li, J. & Liu, J. 2014. Energy efficiency and environmental performance of bioethanol production from sweet sorghum stem based on life cycle analysis. *Bioresource Technology*, 163, 74-81.
- Wojas, S., Ruszczynska, A., Bulska, E., Wojciechowski, M. & Antosiewicz, D. M. 2007.  $\text{Ca}^{2+}$ -dependent plant response to  $\text{Pb}^{2+}$  is regulated by LCT1. *Environmental Pollution*, 147, 584-592.

