

بررسی کارایی گیاه پالایی در اراضی کشاورزی آبیاری شده با پساب فاضلاب در جنوب تهران

حمید ملاحسینی<sup>۱\*</sup>

\*۱- مربی پژوهش بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، اصفهان، ایران،

\* ایمیل نویسنده مسئول : molahoseini\_h@yahoo.com

تاریخ دریافت : ۹۹/۰۳/۱۶ تاریخ پذیرش : ۹۹/۰۵/۲۷

#### چکیده

جهت بررسی کارایی گیاه پالایی با آفتابگردان، ذرت و شلغم، پژوهشی در سال ۱۳۹۶-۱۳۹۵ در اراضی کشاورزی جنوب تهران با استفاده از طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. کادمیوم در هر سه قسمت برگ، ساقه و دانه آفتابگردان موجود بود اما بیشترین غلظت در برگ (۰/۵۴ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) مشاهده شد. بیشترین مقادیر جذب آهن در هر سه گیاه آفتابگردان، ذرت و شلغم در بخش ریشه‌ها انجام شد و غلظت آن در ریشه به طور معنی دار بیشتر از سایر قسمت‌های گیاهان بود. تجمع زیستی کادمیوم در دو گیاه آفتابگردان و ذرت به ترتیب ۰/۵۹ و ۰/۱۲ بود. فاکتور انتقال منگنز در سه گیاه آفتابگردان، ذرت و شلغم به ترتیب برابر با ۱/۸۸، ۱/۳۰ و ۲/۳۰ بود. در بین سه گیاه مطالعه شده، انتقال عناصر روی، منگنز و مس در گیاه آفتابگردان به ترتیب برابر ۴/۹۹، ۱/۸۸ و ۲/۲۱ بود که نشانگر توان گیاه پالایی آن است. در غالب موارد غلظت عناصر در اندام‌های هوایی گیاهان مطالعه شده در حد کفایت بود اما استفاده گیاهان دارای توان بالای جذب عناصر سنگین (مشابه آفتابگردان) هم زمان با مصرف آب فاضلاب از تجمع این عناصر در خاک جلوگیری کرده و محصول تولیدی نیز قابلیت استفاده خواهد داشت.

#### کلمات کلیدی

زیست توده، فاکتور انتقال، فاکتور تجمع زیستی

## Investigating the efficiency of Phytoremediation method in agricultural lands irrigated with Wastewater in the south of Tehran

Hamid molahoseini<sup>1\*</sup>

\*1. Research trainer, Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran.

\*Email Address : molahoseini\_h@yahoo.com

#### Abstract

to investigate the efficiency of Phytoremediation with sunflower corn and turnip, a study was conducted in 2016-2017 in agricultural lands in the south of Tehran using a complete randomized block design. Cadmium was present in all three parts of the leaves stems and sunflower seeds. the highest concentrations were observed in the leaves (0.54 mg / kg dry matter). The highest levels of iron uptake were in all three sunflower corn and turnip plants in the root zone, and its concentration in the root was significantly higher than in other parts of the plant. Cadmium biomass in sunflower and corn was 0.59 and 0.12, respectively. The manganese transfer factor in sunflower, corn and turnip was 1.88, 1.30 and 2.30, respectively. Among the three studied plants, the transfer of zinc, manganese and copper elements in the sunflower plant was 4.99, 1.88 and 2.21 respectively, which indicates the strength of its Phytoremediation. In most cases, the concentration of elements in the aerial parts of the studied plants was sufficient, but the use of plants with high adsorption capacity at the same time with wastewater consumption prevents the accumulation of these elements in the soil and the product will be usable.

#### Keywords

Biomass, Transfer factor, Bioaccumulation factor

## ۱- مقدمه

این زمینه جلب شده است. آفتابگردان به عنوان یک گیاه انباشت گر (Accumulator) در زمینه فلزات مختلف کاملاً شناخته شده است (Marques et al, 2013). در فاصله زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ میلادی گزارش گیاه پالایی برای دو گیاه آفتابگردان و ذرت به ترتیب ۵۷ و ۳۹ مورد بوده است (Vamerli et al., 2010) اما در مورد گیاه شلغم اطلاعات کمتری وجود دارد. در پژوهشی در شهر کرد، تأثیر ۲۳ سال آبیاری با آب فاضلاب در مقایسه با آب چاه بر انباشت فلزات سنگین در خاک و جذب آن‌ها در دو گیاه ذرت و گندم مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش میانگین شاخص انباشت فلزات سنگین روی، مس، سرب، کادمیم، کروم و نیکل برابر با ۱/۳، ۱/۸، ۰/۴، ۱/۶ و ۱/۶ میلی گرم بر کیلوگرم بود (Harchegani and Banitalebi, 2013). اراضی جنوب شهر تهران به شکل گسترده از آب فاضلاب جهت تولید محصولات زراعی استفاده می‌نماید. پژوهش حاضر با هدف بررسی استفاده از سه گیاه آفتابگردان، ذرت و شلغم (سه گیاه مرسوم در تناوب‌های منطقه) جهت جذب برخی از عناصر سنگین و کاهش تجمع آن‌ها در خاک انجام شد.

## ۲- روش انجام تحقیق

طرح بلوک‌های کامل تصادفی با پنج تکرار در اراضی جنوب تهران (جاده ورامین) با خاکی با سری شهری و رده بندی تیپیک هاپلوگیپسید (Typic Haplogypsid) اجرا شد. پس از شخم، دیسک و تسطیح زمین سه گیاه آفتابگردان روغنی (رقم مستر)، شلغم علوفه ای (رقم سر ارغوانی) و ذرت علوفه ای (رقم ۷۰۴) در کرت هایی به مساحت ۳۰ متر مربع (۵×۶) در اراضی که قبلاً به کشت گندم اختصاص داشت و با فاضلاب شهری و آلوده به برخی از عناصر پرمصرف و کم مصرف کشت شدند. قبل از کشت، نمونه مرکب خاک تهیه و مواردی مثل کربن آلی، هدایت الکتریکی، اسیدیته، آهن، منگنز، روی، مس و کادمیم در آن اندازه گیری شد. خاک قطعه زمینی که با آب چاه آبیاری شده و سابقه آبیاری با آب فاضلاب را نداشت به عنوان خاک غیر آلوده در نظر گرفته شد (جدول ۱). حد کفایت عناصر مورد مطالعه در جدول ۲ اشاره شده است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های خاک/آب محل آزمایش (آلوده) و مقایسه آن با شرایط معمول

ویژگی‌های خاک/آب	هدایت الکتریکی (dSm <sup>-1</sup> )	اسیدیته	کربن آلی (درصد)		عناصر مختلف (mg kg <sup>-1</sup> )			
			Cd	Zn	Fe	Mn	Cu	
خاک محل آزمایش (آلوده)	2.2	7.5	1.3	0.5	10	21.6	9.1	0.5
خاک محل آزمایش (غیر آلوده)	1-2	7-7.5	1-2	0.06	0.7	5	5	0.06
آب مصرفی فاضلاب	1.4	7.5	-	0.08	0.005	-	-	0.05
آب مصرفی چاه	2.9	7.5	-	0.05	-	-	-	0.05
استاندارد ایران				0.1	2	-	-	2
استاندارد فائو				0.01	2	-	-	0.2

• ترکیبات آب فاضلاب به صورت فصلی تغییر یافته و در زمان اندازه گیری آهن و منگنز در نمونه نبوده است.

جدول ۲- حد کفایت برخی از عناصر در اندام‌های هوایی سه گیاه ذرت، آفتابگردان و شلغم

ذرت * (mg kg <sup>-1</sup> ) Corn				
Cd کادمیوم	Zn روی	Fe آهن	Mn منگنز	Cu مس
0.2-3	30-70	50-250	40-100	7-15
آفتابگردان ** (mg kg <sup>-1</sup> ) Sunflower				
0.2-3	30-80	50-250	25-100	10-20
شلغم *** (mg kg <sup>-1</sup> ) Turnip				
0.2-3	20-250	40-300	40-250	6-15

\* و \*\* بر اساس منبع (Bergmann, 1993)  
\*\*\* بر اساس منبع (Silva and Uchida, 2000)

که در آن  $C_{shoot}$  بیانگر غلظت فلز سنگین در اندام‌های هوایی گیاه،  $C_{soil}$  بیانگر غلظت فلز سنگین در خاک و  $C_{root}$  بیانگر غلظت فلز سنگین در ریشه است. بنابراین فاکتور تجمع زیستی (TF) و فاکتور انتقال (BF) به ترتیب نشان دهنده‌ی بخشی از فلزات سنگین است که توسط گیاه از خاک جذب شده و به اندام‌های هوایی انتقال یافته است (Angelova et al., 2016). تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS انجام و میانگین‌ها با روش دانکن (پنج درصد) مقایسه شدند.

### ۳- نتایج

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، سه گیاه مورد مطالعه در این پژوهش از نظر تولید ماده خشک و غلظت عناصر کادمیوم (در سطح احتمال ۱ درصد) و روی، آهن، منگنز و مس (در سطح احتمال ۵ درصد) تفاوت معنی داری داشتند (جدول ۳).

در زمان برداشت پس از حذف حاشیه کرت‌ها و تفکیک نمونه‌ها به قسمت‌های ریشه، ساقه و برگ، عملکرد ماده خشک و همچنین نمونه لازم جهت اندازه‌گیری عناصر در ریشه و اندام‌های هوایی گیاهان تهیه شد. برای تهیه نمونه‌های خشک لازم جهت تعیین زیست توده، نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در آن قرار گرفت. کادمیوم و عناصر سنگین (آهن، منگنز، مس، روی) به روش DTPA عصاره‌گیری و با دستگاه جذب اتمی مدل GBC923plus اندازه‌گیری شدند (Sparks et al., 1996). فاکتور انتقال (Transfer Factor) و فاکتور تجمع زیستی (Bioaccumulation Factor) جهت عناصر مختلف از فرمول‌های زیر محاسبه شد:

$$TF = C_{shoot} / C_{root}$$

$$BF = C_{shoot} / C_{soil}$$

جدول ۳- تجزیه واریانس ماده خشک و غلظت برخی از عناصر در سه گیاه ذرت، آفتابگردان و شلغم

منابع تغییرات	میانگین مربعات						
	درجه آزادی (df)	عملکرد ماده خشک (dry matter yield)	کادمیوم (Cd)	روی (Zn)	آهن (Fe)	منگنز (Mn)	مس (Cu)
تکرار	4	153.29 *	1.68 <sup>ns</sup>	2.20*	10.52 <sup>ns</sup>	1.18*	28.73 *
گیاه زراعی	2	5100.32 **	2.01 *	14.26 **	679.13 **	88.22 **	1207.2 **
خطا	8	57.82	6.64	0.40	11.53	0.971	13.67
ضریب تغییرات CV%	-	16.71	10.74	12.45	9.32	9.70	13.11

<sup>ns</sup>: غیر معنی دار، \*: معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد، \*\*: معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد

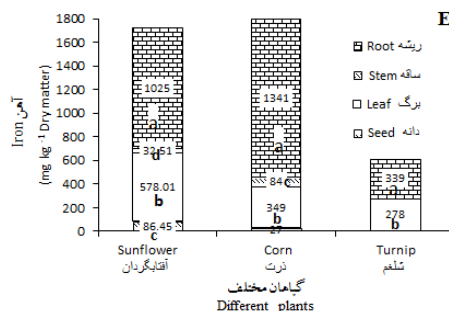
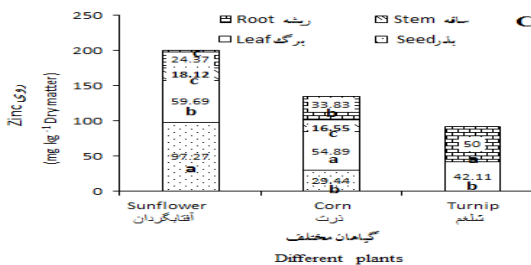
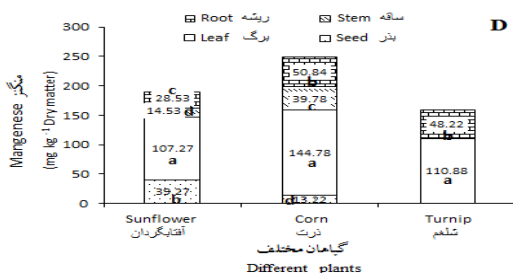
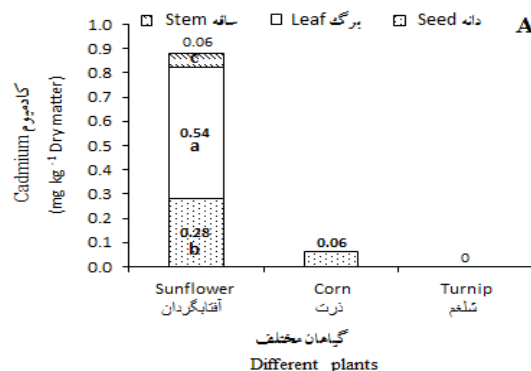
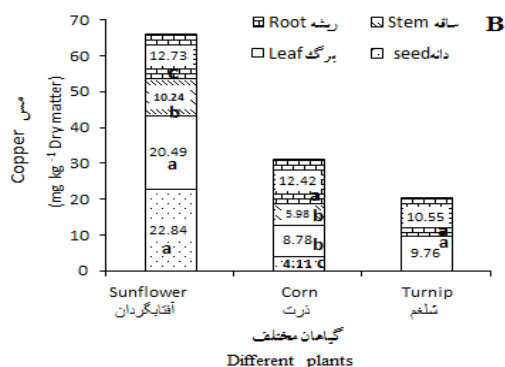
### مقایسه غلظت عناصر مطالعه شده در اندام‌های مختلف گیاه

(۱۲۹ میلی گرم بر کیلوگرم) و ذرت (۲۰/۲ میلی گرم بر کیلوگرم) تشخیص داده شد در حالی که این مقادیر در ریشه این دو گیاه (آفتابگردان و ذرت) به ترتیب ۷۲/۴ و ۱۵۲ میلی گرم بر کیلوگرم بود (Oh et al., 2013). علت تفاوت نتایج بدست آمده در پژوهش حاضر با برخی پژوهش‌های دیگر در زمینه تجمع کادمیوم در بخش‌های گیاهی، مربوط به غلظت اولیه کادمیوم در خاک است. خاکی که مطالعه

در رابطه با فلز سنگین کادمیوم (شکل ۱- A) گیاه آفتابگردان در هر سه قسمت دانه، ساقه و برگ دارای تجمع کادمیوم بود و حد بیشینه آن در برگ (۰/۵ میلی گرم در کیلوگرم) مشاهده شد. ذرت علفه ای فقط دارای مقادیر اندکی کادمیوم در بذر بود و گیاه شلغم در هیچ یک از اندام‌های خود کادمیوم نداشت. در پژوهشی مشابه در زمینه دو گیاه ذرت و آفتابگردان، مقادیر جذب کادمیوم در اندام‌های هوایی گیاه آفتابگردان

داشت که برخی پژوهشگران معتقدند کادمیوم تمایل بیشتری در تجمع در برگ‌ها داشته و به همین دلیل مصرف سبزیجات برگی در این زمینه خطر بالاتری دارند (Alloway and Jackson, 1991). البته تفاوت ارقام مختلف در این زمینه نیز نباید از نظر دور داشته شود (Bergmann, 1993). در این پژوهش اندام‌های هوایی گیاه ذرت هیچ جذب کادمیومی نداشتند، اصولاً اندام‌های هوایی گیاه ذرت دفع کننده کادمیوم (Shoot excluder) بوده و از تجمع این عنصر جلوگیری می‌نماید (Marschner, 1995).

در آن انجام شد غلظت کادمیومی معادل ۰/۵ میلی گرم بر کیلوگرم داشت (جدول ۱) در حالی که این آلودگی در مقایسه با سایر پژوهش‌ها (غالباً بیش از ۱ میلی گرم در کیلوگرم خاک و یا ۰/۱ مول در لیتر برای سامانه های آبکشت) آلودگی کمی است. استانداردهای موجود مقادیر متفاوتی را برای حد طبیعی عنصر کادمیوم در گیاه ارائه می‌کنند که در برخی مواقع موجب سردرگمی می‌شود. به عنوان مثال مقدار کادمیوم قابل قبول در گیاهان معادل ۰/۱ (۱۱)، ۰/۰۲-۲ (۹) و یا ۰/۳-۳ (۶) میلی گرم در کیلوگرم بافت‌های هوایی گیاه ذکر شده است. بنابراین با توجه به غلظت‌های کادمیوم در گیاه آفتابگردان در این مطالعه، مقدار کادمیوم به نظر بیش از حد کفایت گیاه است. به این نکته نیز باید توجه



شکل ۱- مقایسه غلظت عناصر کادمیوم (A)، مس (B)، روی (C)، منگنز (D) و آهن (E) در اندام‌های مختلف گیاهی اعداد با حروف مشابه در هر ستون از نظر آماری تفاوتی ندارند (دانکن ۵٪)

گیاهان انباشت گر منگنز است یعنی برگ‌ها بیشترین غلظت‌های منگنز را به خود اختصاص دادند. به هر صورت منگنز جزو عناصری است که در شرایط اسیدی و همچنین شرایط غرقاب، بیشترین مقادیر جذب را داراست (Valizadehfard et al., 2012). بیشترین مقادیر جذب آهن در هر سه گیاه آفتابگردان، ذرت و شلغم در بخش ریشه‌ها انجام شد و غلظت آهن در ریشه به طور معنی دار بیشتر از سایر قسمت‌های گیاهان بود (شکل ۱- E). غلظت بالای آهن در ریشه‌ها و همچنین مقادیر بالای آن در برگ‌های هر سه گیاه (بیش از حد کفایت) بیانگر آن است که خاک محل آزمایش دارای مقادیر بالای آهن بوده است. اما نکته ای که باید به آن توجه کرد این است که هم ذرت و هم آفتابگردان دارای ریشه های نسبتاً عمیق (عمق نفوذ ۱/۵ متر) بوده و عملاً برداشت ریشه‌ها صورت نگرفته و فقط اندام‌های هوایی گیاه است که می‌تواند آهن را از زمین خارج نماید. به طور کلی در رابطه با غلظت عناصر اندازه گیری شده در گیاهان مورد مطالعه تقریباً در تمام موارد این غلظت در حد کفایت گیاه قرار داشته و لزوماً آبیاری با آب فاضلاب نمی‌تواند موجب افزایش این عناصر در حد مسمومیت گردد. در این رابطه در پژوهش‌های مشابه نیز کاربرد آب فاضلاب و پساب موجب کاهش (Munir et al., 2007) و یا عدم تغییر (Safarisanjabi, 1996) غلظت فلزات سنگین در خاک شده است. به نظر می‌رسد که هر گونه تغییر در غلظت کل فلز خاک تابعی از غلظت آن فلز در فاضلاب، میزان کاربرد فاضلاب، برداشت گیاهی و گاهی آب شویی باشد.

#### مقایسه زیست توده گیاهی و مقدار عناصر فلزی خارج شده از خاک مزرعه

همان طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود وزن خشک دانه گیاه آفتابگردان به طور معنی دار بیش از گیاه ذرت بود (حدود ۱۱ درصد بیشتر). در رابطه با برگ نیز هر دو گیاه آفتابگردان و شلغم نسبت به ذرت به طور معنی دار وزن خشک بیشتری داشتند. در رابطه با وزن خشک ساقه و ریشه دو گیاه ذرت و شلغم به ترتیب با ۵۸۰۰ و ۳۰۰۰ کیلوگرم ماده خشک در هکتار بالاترین مقادیر وزن خشک را داشتند. این نتایج طبیعی است یعنی گیاه ریشه ای (شلغم) بیشترین وزن خشک ریشه، گیاه علوفه ای (ساقه) بیشترین وزن خشک ساقه و گیاه دانه ای (آفتابگردان) بیشترین وزن خشک دانه را داشتند. مقدار خروج فلزات سنگین به دو عامل اصلی بستگی دارد. نخست غلظت فلز سنگین مورد نظر در بافت گیاهی که بیشتر با فیزیولوژی گیاه در ارتباط است و دوم مقدار زیست توده تولید شده که وابسته به نوع استفاده از محصول است. همان طور که در جدول ۴ مشخص است برگ‌ها و دانه‌ها در ارتباط با غلظت فلزات سنگین در اولویت بوده و بعد از آن نوبت به ساقه و ریشه‌ها می‌رسد (به استثناء مقادیر آهن در ریشه‌ها). در مرحله اول فلزات سنگین پس از عبور از آوندهای چوبی وارد برگ‌های گیاه می‌شوند و در آنجا در غلظت‌های کم با ایجاد ترکیبات پیچیده شبیه متالوتیونین، فایتوکلاتین و اسیدهای آلی تا حدی سمیت زدایی شده (Cobbet and Goldsborough, 2002) و در غلظت‌های بالاتر در واکوئل های سلولی ذخیره می‌شوند (Kupper et al., 1999) و درست به همین

چهار قسمت ریشه، برگ، ساقه و دانه در دو گیاه آفتابگردان و ذرت جذب عنصر مس داشته‌اند در حالی که در گیاه شلغم جذب مس فقط در برگ و ریشه وجود داشت (که البته دانه و ساقه در شرایط زراعی برای این گیاه مد نظر نیست) (شکل ۱- B). دانه، برگ و ساقه آفتابگردان به ترتیب با ۲۲/۸۴، ۲۰/۴۹ و ۱۰/۲۴ میلی گرم در هر کیلوگرم بافت خشک، بیشترین مقادیر جذب مس را به خود اختصاص دادند. این مقادیر با توجه به حد کفایت این عنصر برای اندام‌های هوایی که معادل ۱۰-۲۰ میلی گرم در هر کیلوگرم بافت خشک است (جدول ۲) مقادیر قابل قبولی محسوب می‌شوند. آفتابگردان معمولاً گیاهی شاخص برای اندازه گیری تأثیرات فنوتیپیک و فیزیولوژیک ناشی از مس در نظر گرفته می‌شود (Kolbas, 2014). وضعیت مشابهی برای گیاه ذرت مشاهده شد. در رابطه با گیاه شلغم نیز مقادیر جذب مس توسط برگ‌ها (۹/۷۶ میلی گرم در هر کیلوگرم) در حد کفایت گیاه بوده است (جدول ۲). برای این که مس به عنوان یک منبع آلاینده در خاک‌ها مطرح باشد مقادیری بسیار زیادتر از حد مشاهده شده در این آزمایش باید مد نظر قرار گیرد. به عنوان مثال مقادیری معادل ۵۴۰ میلی گرم در هر کیلوگرم خاک (Fassler et al., 2010). در پژوهشی که به منظور مقایسه جذب فلزات سنگین توسط اندام‌های هوایی و ریشه آفتابگردان و ذرت انجام شد، غلظت مس در اندام‌های هوایی آفتابگردان و ذرت به ترتیب برابر ۲۰/۷ و ۶/۰۶ و برای ریشه‌ها به ترتیب ۸/۸۷ و ۱۵/۷ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک بود (Oh et al., 2013). در رابطه با عنصر روی مقدار جذب در گیاه آفتابگردان بیش از دو گیاه ذرت و شلغم بود (شکل ۱- C). از مجموع روی جذب شده در گیاه آفتابگردان ۴۸/۶ درصد در دانه‌ها، ۲۹/۸ درصد مربوط به برگ‌ها و ۲۱/۵ درصد مربوط به ریشه و ساقه بود. بر خلاف گیاه آفتابگردان بیشترین مقدار جذب روی در گیاه ذرت مربوط به برگ‌ها بود (۴۰/۷ درصد از کل جذب). میزان جذب روی در گیاه شلغم در دو بخش برگ و ریشه انجام شد. متوسط غلظت عنصر روی در سه گیاه آفتابگردان، ذرت و شلغم به ترتیب برابر با ۵۸، ۴۲ و ۴۲ میلی گرم در هر کیلوگرم ماده خشک اندام‌های هوایی بود. این مقادیر در محدوده حد کفایت گیاه (جدول ۲) قرار دارد. در حقیقت در غلظت‌های در حد غلظت روی در خاک پژوهش حاضر (۱۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک) عنصر روی نقش محرک رشد داشته و این مسئله با تاکید بر نقش روی به عنوان عنصر کم مصرف مورد نیاز گیاهان، در پژوهش‌های دیگر نیز مورد توجه قرار گرفته است (Sridhar et al., 2007). در گیاه یونجه مقدار روی در محدوده ۵ تا ۲۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک نقش تحریک کننده رشد ریشه، ساقه و زیست توده گیاهی را داشته است (Jadia And Fulekar, 2008). بر خلاف سه عنصر کادمیوم، مس و روی غلظت منگنز در گیاه ذرت بیشتر از گیاه آفتابگردان بود (شکل ۱- D). متوسط غلظت عنصر منگنز در سه گیاه آفتابگردان، ذرت و شلغم به ترتیب برابر با ۵۳/۷، ۶۶ و ۱۱۱ میلی گرم در هر کیلوگرم ماده خشک اندام‌های هوایی بود. در هر سه گیاه مورد مطالعه بیشترین غلظت‌های منگنز در برگ‌ها مشاهده شد. با وجود مطابقت اعداد ذکر شده با حد کفایت منگنز در گیاهان (جدول ۲) الگوی جذب آن مشابه

دلیل است که برگ‌ها محل تجمع فلزات سنگین هستند. در رابطه با گیاهان دانه ای مثل آفتابگردان (و تا حدی ذرت) که دارای تجمع نسبتاً

بالایی از فلزات سنگین در دانه‌ها هستند روابط مخزن (Source) و مقصد (Sink) مطرح است.

جدول ۴ - مقایسه زیست توده گیاهی سه گیاه آفتابگردان، ذرت و شلغم و خروج عناصر مختلف از خاک به تفکیک اندام‌های مختلف هر گیاه

نام گیاه	مقایسه زیست توده سه گیاه استفاده شده در پژوهش به تفکیک اندام‌های مختلف (کیلوگرم در هکتار)																			
	دانه Seed					برگ Leaf					ساقه Stem					ریشه Root				
آفتابگردان	4100a					2300a					4400b					1100b				
ذرت	3700b					1500b					5800a					800b				
شلغم	0c					2200a					0c					3000a				
نام گیاه	خروج عناصر مختلف از خاک به تفکیک اندام‌های مختلف (گرم در هکتار)																			
	دانه Seed					برگ Leaf					ساقه Stem					ریشه Root				
	Cd	Cu	Zn	Mn	Fe	Cd	Cu	Zn	Mn	Fe	Cd	Cu	Zn	Mn	Fe	Cd	Cu	Zn	Mn	Fe
آفتابگردان	1.15a	93.6a	399a	161a	354a	1.2a	47.1a	137a	247a	1329a	0.26a	45.1a	80b	64b	143b	0a	14b	27b	31c	1127a
ذرت	0.23b	15.2b	109b	49b	100b	0b	13.2c	82.3c	217b	523c	0b	34.7b	96a	231a	487a	0a	10c	27b	41b	1073b
شلغم	0c	0c	0c	0c	0c	0b	21.5b	92.6b	244a	612b	0b	0c	0c	0c	0c	0a	32a	150a	145a	1017b

اعداد با حروف مشابه در هر ستون از نظر آماری تفاوتی ندارند (دانکن ۵٪)

#### مقایسه فاکتور انتقال (TF) و فاکتور تجمع زیستی (BF) در آفتابگردان، ذرت علوفه ای و شلغم

برای قضاوت این که توانایی گیاهان مطالعه شده در جذب عناصر در چه حد است و برای به کمیت درآوردن این توانایی از دو شاخص فاکتور تجمع زیستی (غلظت عنصر در گیاه به غلظت آن در خاک) و فاکتور انتقال (غلظت عنصر در اندام‌های هوایی گیاه به غلظت آن در ریشه) استفاده می‌شود. در رابطه با عنصر کادمیوم مقادیر فاکتور تجمع زیستی در دو گیاه آفتابگردان و ذرت کمتر از ۱ و فاکتور انتقال در هر دو حالت صفر بود (جدول ۵). در این پژوهش مقادیر کادمیوم جذب شده از طریق گیاهان مقادیر اندکی بود. اما دلیل این که چرا با وجود فاکتور انتقال نزدیک به صفر، کادمیوم به بخش‌های هوایی گیاه راه یافته است، آن است که به احتمال زیاد منبع جذب کادمیوم در دو گیاه ذرت و آفتابگردان آب فاضلاب آلوده به کادمیوم بوده است و نه خاک. در این حالت حرکت آب به درون آوندهای چوبی گیاه به دلیل حرکت توده ای و اختلاف فشار ناشی از تعرق در گیاه انجام می‌شود (Kvesitadze et al., 2006). در نقطه مقابل کادمیوم، عنصر آهن با وجود مقادیر بالای فاکتور تجمع زیستی در هر سه گیاه که بیانگر جذب این عنصر از خاک است، دارای فاکتور انتقال پایینی بود (کمتر از ۱). دلیل این امر همان طور که در (شکل ۱-E) عنوان شد، توقف این عنصر در ناحیه ریشه هر سه گیاه بوده است. معمولاً فلزات سنگین پس از جذب از خاک در لایه سوپرین ریشه متوقف شده و به اندام‌های هوایی راه نمی‌یابند و این

انتقال و توزیع مجدد فلزات سنگین از مبدأ که همان برگ‌های گیاه است به مقصد های اصلی مثل دانه و میوه در اواخر دوره رشد گیاه منجر به افزایش چشم گیر فلزات سنگین در دانه‌ها و میوه می‌گردد. این رابطه مخزن و مقصد تا حد زیادی وابسته به ترکیبات کلات کننده موجود در آوند آبکش بوده که برای هر عنصر متفاوت بوده و برای فلزات سنگین کادمیم، جیوه و آرسنیک دو ماده کلات کننده GSH (Glutathione) و PCS (phytochelatin) بیشترین نقش را ایفا می‌نمایند در حالی که برای آهن، مس، روی و منگنز ماده (Nicotianamine) این وظیفه را بر عهده دارد-Mendoza (Cozatl et al., 2011). شاید در نگاه اول مقادیر خروج فلزات سنگین از خاک توسط ساز و کار استفاده از گیاهان، خیلی کم جلوه کند. به عنوان مثال مقدار خروج کادمیوم از طریق دانه، برگ و ساقه آفتابگردان به ترتیب ۱/۱۵، ۱/۲ و ۰/۲۶ گرم در هکتار و یا مجموع منگنز خروجی از طریق کشت آفتابگردان فقط ۵۰۳ گرم در هکتار است (جدول ۴) اما بهتر است هم زمان با استفاده از آب‌های نامتعارف مثل آب فاضلاب از گیاهان با پتانسیل جذب بالای فلزات سنگین (با توجه به نوع فاضلاب و ترکیبات آن) استفاده گردد تا اولاً از تجمع این عناصر به دلیل تداوم استفاده از فاضلاب جلوگیری شود و ثانیاً محصولات تولید شده قابل استفاده برای انسان و دام باشد که در این حالت نیازی به پیش بینی تجهیزات سوزاندن (تولید انرژی) از محصولات تولیدی نیز مرتفع می‌گردد.

اعداد فاکتور انتقال (بزرگتر از ۱) در مورد عنصر منگنز، هر دو گیاه ذرت و آفتابگردان پتانسیل انباشتگری این عنصر را دارا هستند ولی در مورد عنصر مس این مسئله فقط در گیاه آفتابگردان مصداق داشت (جدول ۵). دامنه تغییرات فاکتور انتقال برای عنصر مس با توجه به شرایط مختلف مثل اسیدیته، مقدار کربن خاک و فیزیولوژی گیاه از ۰/۱ تا ۱ متغیر بوده است (Allen et al., 1995) که البته در پژوهش‌های مرتبط با این موضوع در ایران مقدار بیشینه آن در برخی از مواقع بیشتر بوده است (Harchegani and Banitalebi, 2013).

یک سازوکار دفاعی برای گیاهان محسوب می‌شود (Benavides et al., 2005). در رابطه با عنصر روی فقط گیاه آفتابگردان یک گیاه انباشت گر محسوب شده و مقدار مقدا روی جذب شده از خاک (فاکتور تجمع زیستی ۲/۳۹) را به طور فعال به اندام‌های هوایی منتقل نموده است (فاکتور انتقال ۴/۹۹). دو گیاه ذرت و شلغم علی‌رغم داشتن فاکتور تجمع زیستی بالاتر از آفتابگردان، فاکتور انتقال کمتر از ۱ داشتند. به طور مشابه در پژوهشی که تأثیر کاربرد ۲۳ سال پساب بر روی زمین‌های زراعی را بررسی نمود، شاخص انتقال عنصر روی در گیاه ذرت ۰/۸ بود (Harchegani and Banitalebi, 2013). با توجه به

جدول ۵- مقایسه فاکتور انتقال (TF) و فاکتور تجمع زیستی (BF) برای عناصر مختلف در سه گیاه آفتابگردان، ذرت و شلغم

نام گیاه	عناصر مختلف									
	Cd		Zn		Fe		Mn		Cu	
	TF	BF	TF	BF	TF	BF	TF	BF	TF	BF
آفتابگردان	ناچیز	0.59a	4.99a	2.39c	0.23b	19.93a	1.88b	5.21c	2.21a	1.40a
ذرت	ناچیز	0.12b	0.99b	3.37b	0.11b	20.86a	1.30c	6.83b	0.51c	1.04b
شلغم	ناچیز	ناچیز	0.84b	4.6a	0.82a	14.3b	2.30a	8.74a	0.92b	1.35a

واحد مقدار عناصر برای محاسبه فاکتور های انتقال و تجمع زیستی در خاک و گیاه به ترتیب میلی گرم بر کیلوگرم خاک یا گیاه بوده است.

وجود گیاهان با توان جذب فلزات سنگین در تناوب‌های زراعی این امکان را فراهم می‌کند که حد مجاز این عناصر در خاک منطقه را همواره در سطحی پایین‌تر از سطح بحرانی نگاه داشت و علاوه بر استفاده از آب فاضلاب (به ویژه در شرایط بحران آب کنونی) محصول تولید شده نیز قابلیت استفاده برای مصارف انسانی و دامی را خواهد داشت. پژوهش‌هایی از این دست به افکار عمومی جامعه کمک می‌کند تا قضاوتی صحیح در مورد استفاده از فاضلاب‌ها جهت مصارف کشاورزی داشته باشند.

#### ۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش علی‌رغم افزایش قابل توجه غلظت عناصر سنگین در خاک آبیاری شده با آب فاضلاب نسبت به خاک معمول (آبیاری شده با آب چاه)، غلظت‌های مشاهده شده در اندام‌های گیاهی غالباً در حد کفایت قرار داشت. با این وجود فاکتور انتقال محاسبه شده برای آفتابگردان (در مورد عناصر روی، منگنز و مس)، ذرت (روی و منگنز) و شلغم (منگنز) بیش از ۱ بود که بیان توان بالای این گیاهان برای انباشتگری این فلزات است. به عبارت ساده تر

#### منابع

- Ali, H., Khan, E., Sajad, M.A. 2013. Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications. Chemosphere 91:869-881.
- Allen H.E., Huang C.P., Bailey G.W., and Bowers A.R. 1995. Metal Speciation and Contamination of Soil. Lewis Publishers, USA.289pp.
- Alloway, B.J., and Jackson, A.P. 1991. The behavior of heavy metals in sewage sludge-amended soils. Science of the Total Environment 100: 151-176
- Angelova, V. R., Perifanova-Nemska, M.N., Uzunova, G.P., Kolentsova, E.N. 2016. Accumulation of heavy metals in safflower. International Journal of Biological, Bimolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering 10:394-399.
- Benavides, M.P., Gallego, S.M., and Tomaro, M.L. 2005. Cadmium toxicity in plants. Braz. J. Plant Physiol 17:21-34.
- Bergmann, W. 1993. Nutritional Disorders of Plants: Development, Visual and Analytical Diagnosis. Gustav Fischer Verlag, Jena, Germany.336pp.

- Chehregani, A., Noori, M., Yazdi, H.L. 2009. Phytoremediation of heavy metal polluted soils: Screening for new accumulator plants in Angouran mine (IRAN) and evaluation of removal ability. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 72:1349-1353.
- Cobbet, C., and Goldsborough, P. 2002. Phytochelatin and metallothioneins: Roles in heavy metal detoxification and homeostasis. *Annual Review Plant Biology* 53:159-182.
- Codex Alimentarius Commission (WHO/ FAO). 2001. Food additives and contaminants: Joint (WHO/ FAO) Food standards programme.
- Fassler, E., Robinson, B.H., Gupta, S.K., and Schulin R. 2010. Uptake and allocation of plant nutrients and Cd in maize, sunflower and tobacco growing on contaminated soil and the effect of soil conditioners under field conditions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 87:339-352.
- Harchegani, H.B., and Banitalebi, C. 2013. The effect of twenty-three years of surface irrigation with treated municipality wastewater on soil loadings, transfer to wheat and corn grains, and related health risks of some heavy metals. *Journal of Water and Soil* 27:570-580. (In Persian with English abstract).
- Jadia. C.D., Fulekar, M.H. 2008. Phytotoxicity and Remediation of heavy metals by Alfalfa (*Medicago sativa*) in soil-vermicompost media. *Advances in Natural and Applied Sciences* 2:141-151.
- Kolbas, A., Marchand, L., Herzig, R., Nehnevajva, E., and Mench, M. 2014. Phenotypic seedling responses of a metal-tolerant mutant line of sunflower growing on a Cu-contaminated soil series: potential uses for biomonitoring of Cu exposure and Phytoremediation *Plant and Soil* 376:377-397.
- Kunhikrishnan, A., Bolan, N.S., Muller K., Laurenson, S., Naidu, R., and Kim, W. 2012. The influence of wastewater irrigation on the transformation and bioavailability of heavy metals in soil. *Advances in Agronomy* 115: 216-273.
- Kupper, H., Zhao, F., and McGrath, S. 1999. Cellular compartmentation of zinc in leaves of the hyper accumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant Physiology* 119:305-311.
- Kvesitadze, G., Khatisashvili, G., Sadunishvili, T., Ramsden, J. 2006. Biochemical mechanisms of detoxification in higher plants: Basis of Phytoremediation. First ed., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p. 262.
- Marques, A.P.G., Moreira, H., Franco, A.R., Rangel, O.S.S., Castro, P.M.L. 2013. Inoculation sunflower grown in zinc and cadmium contaminated soils with plant growth promoting bacteria- Effects on Phytoremediation strategies. *Chemosphere* 92:74-83.
- Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Second edition. London: Academic Press 889pp.
- Mendoza-Cozatl, D.G., Jobe, T.O., Hauser, F., and Schroeder, J.I. 2011. Long distance transport, vacuolar sequestration and transcriptional responses induced by cadmium and arsenic. *Current Opinion in Plant Biology* 14:554-562.
- Munir, J., Rusan M., Hinnawi S., and Rousan L. 2007. Long-term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Soil Science Society of American Journal*, 215:143-152.
- Oh, K., Li, T., Cheng, H., He, X., and Yonemochi, S. 2013. Study on tolerance and accumulation potential of biofuel crops for Phytoremediation of heavy metals. *International Journal of Environmental Science and Development* 4:152-156.
- Safarisanjabi, A., 1996. The outcome of treated wastewater irrigation on soil chemical properties of the Bokhar, Isfahan and accumulation of some elements in alfalfa. MSc Thesis College of Agriculture, Isfahan University of Technology. 231 pp. (In Persian).
- Shaygan, J., and Afshari, A. 2003. The Treatment Situation of Municipal and Industrial Wastewater in Iran. *Journal of Water and Wastewater* 49:58-69. (In Persian with English abstract).
- Silva, J.R., and Uchida, R. 2000. Plant nutrition management in Hawaii's soils, approaches for tropical and subtropical Agriculture. College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii at Manoa. Pp: 57-65.
- Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.A., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Jhonston, C.T., and Sumner M.E. 1996. *Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods*, 3rd Edition. ASA, Madison, WI, ISBN-089118-072-9, 1390 p.



- Sridhar, B.B.M., Han, F.X., Diehl, S.V., Monts, D.L., Su, Y .2007. Effect of Zn and Cd accumulation on structural and physiological characteristics of barley plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 19:15-22.
- Valizadehfard, F., Reihanitabar, A., Najafi, N., and Ustan, S.2012. Combined effect of Cd and Zn in a calcareous soil on uptake of phosphorus, copper, iron and manganese, by two rice varieties in anaerobic and non-waterlogged conditions. *Journal of Soil and Water Research* 43:207-219. (In Persian).
- Vamerali, T., Bandiera, and Moscs, G. 2010. Field crops for Phytoremediation of metal contaminated land. *Environmental Chemistry Letters*. 8: 1-17.