

## ارزیابی قابلیت گیاه پالایی گیاه وتیور در جذب عناصر سنگین آرسنیک، جیوه و کروم موجود در پساب‌های صنعتی

علی دیندارلو<sup>۱</sup>، علی هاشمی<sup>۲</sup> و سید مصطفی عمادی<sup>۳</sup>

### چکیده

پساب‌های صنعتی، از نظر پیچیدگی و گوناگونی مواد سمی و آلاینده و دشواری پالایش، به مراتب چالش برانگیزتر از پساب‌های شهری‌اند که بسته به نوع صنایع، شامل فلزات سنگین مختلف و مواد شیمیایی آلی هستند و می‌توانند روی سلامتی اکوسیستم و انسان تأثیر بگذارند. هدف اصلی این مطالعه، استفاده از روش ساده و ارزان گیاه‌پالایی در جذب و حذف عناصر سنگین، سمی و خطرناک موجود در فاضلاب‌های صنعتی از جمله آرسنیک، جیوه و کروم، توسط گیاه علفی وتیور است. بدین منظور، تیمارها براساس طرح کاملاً تصادفی، در قالب هشت تیمار و چهار تکرار اجرا و آبیاری گیاه با درصدهای مختلف از پساب صنعتی و آب معمولی انجام شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بیشترین غلظت آرسنیک در خاک برابر  $401/75$ ، جیوه برابر  $0/019$  و کروم برابر  $0/6$  میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک خشک و کمترین غلظت آن برابر  $3/5$ ، جیوه  $0/001$  و کروم برابر  $0/017$  میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک خشک، همچنین بیشترین و کمترین غلظت تجمع یافته در ریشه برای آرسنیک، جیوه و کروم به ترتیب برابر  $85/68$  و  $0/62$ ،  $0/01$  و  $0/001$  و  $7/09$  و  $0/005$  میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک بودند. بیشترین و کمترین غلظت در اندام هوایی به ترتیب  $4/19$  و  $0$  میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک برای آرسنیک و  $0/15$  و  $0/0006$  میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک برای کروم مشاهده شد. تجمع جیوه در اندام هوایی بین تیمارها معنی‌دار نشدند.

**واژه‌های کلیدی:** آرسنیک، پساب صنعتی، جیوه، فلزات سنگین، کروم، گیاه‌پالایی، وتیور.

**ارجاع:** دیندارلو، ع. و هاشمی، ع. و عمادی، س. م. ۱۳۹۶. ارزیابی قابلیت گیاه‌پالایی گیاه وتیور در جذب عناصر سنگین آرسنیک، جیوه و کروم موجود در پساب‌های صنعتی. مجله پژوهش آب ایران. ۲۶: ۲۷-۳۵.

۱- استادیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه خلیج فارس.

۲- استادیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه خلیج فارس.

۳- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

\* نویسنده مسئول: [dindarlo@pgu.ac.ir](mailto:dindarlo@pgu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۲۵

## مقدمه

از عوارض جانبی صنعتی شدن جوامع امروزی، مصرف مواد شیمیایی مختلف است که پیامد آن مسمومیت‌های مختلفی است که بسیار خطرناک و کشنده‌اند (اکبرپور و همکاران، ۱۳۸۵). آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های صنعتی، بسته به نوع صنایع، دامنه بسیار گسترده‌ای دارند، ولی عموماً شامل فلزات سنگین و مواد شیمیایی آلی هستند. گوناگونی، سمی بوده و ماندگاری آن‌ها، می‌تواند روی سلامتی اکوسیستم و انسان تأثیر بگذارد؛ بنابراین در سال‌های اخیر با توجه به افزایش میزان این آلودگی‌ها، پیدا کردن راه‌حلی مناسب برای حذف این مواد پایدار از پساب‌ها، برای کمینه کردن خطرهای ناشی از آن‌ها و همچنین ایجاد امکان استفاده دوباره از منابع آب، به یکی از چالش‌های مهم پیش روی بشر تبدیل شده است.

انواع فاضلاب را می‌توان به فاضلاب‌های خانگی<sup>۱</sup>، شهری<sup>۲</sup>، کشاورزی و صنعتی<sup>۳</sup> تقسیم کرد (اسکندری، ۱۳۹۰). مواد شیمیایی موجود در فاضلاب‌های صنعتی از جمله فلزات سنگین، بسته به نوع کارخانه‌ها و محصول تولیدی، متفاوت است که از مهم‌ترین این ترکیبات می‌توان به آرسنیک، سرب، کادمیم، کروم و جیوه اشاره نمود (اسکندری، ۱۳۹۰).

غلظت‌های معمول آرسنیک در آب زیرزمینی بسیار پایین و اغلب موارد زیر ۱۰ میکروگرم بر لیتر است. این عنصر می‌تواند از طریق فعالیت‌های معدن‌کاری وارد آب‌های زیرزمینی شود (براتی، ۱۳۸۳). آرسنیک به مقدار زیادی در آب محلول و متحرک و در نتیجه امکان آلودگی آب زیرزمینی با آرسنیک بسیار زیاد است. مسمومیت مزمن، ضعف عمومی در عضلات، کاهش اشتها، تهوع، استفراغ و اسهال، عوارض سیستم‌های عروقی، گوارشی و کبد از مهم‌ترین بیماری‌های ناشی از آرسنیک در انسان است (اسماعیلی ساری، ۱۳۸۱).

شکل‌های موجود کروم در محیط به صورت سه و شش ظرفیتی است. پایداری شکل سه ظرفیتی آن نسبت به شش ظرفیتی بیشتر و حلالیت آن در آب کمتر است. شکل شش ظرفیتی آن بیشتر در آبکاری‌ها، نقاشی، معدنکاری، دباغی و چرم‌سازی یافت می‌شود (دمیرباس و

همکاران، ۲۰۰۴). آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان<sup>۴</sup> کروم شش ظرفیتی را در گروه یک مواد سرطان‌زا برای انسان قرار داده (آی اس آی آر آی<sup>۵</sup>، ۱۹۹۷) و حد مجاز آن توسط سازمان جهانی بهداشت و مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، در آب آشامیدنی ۰/۰۵ و برای آب‌های سطحی کمتر از ۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر تعیین شده است (آی‌اس‌آی‌آر‌آی، ۱۹۹۷ و دبلوچا، ۲۰۰۴).

آلودگی جیوه به دلیل سمی بودن بالا، تمایل به ماندگاری در محیط و بدن جانداران و انباشت در زنجیره غذایی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در کشورهای اروپایی، جلوگیری و قطع تدریجی این عنصر تا سال ۲۰۲۰ اجباری شده است. یکی از مشکلات پیش‌روی پژوهش‌های انجام شده در زمینه حذف جیوه از محیط آبی، دشواری حذف اندازه‌گیری غلظت اندک، ولی بسیار سمی این ماده در این محیط است (جیرجینوا و همکاران، ۲۰۱۰ و امسی براید، ۱۹۹۸). وجود جیوه در پساب شهری و صنعتی امری واضح و بدون انکار است، ولی تاکنون مطالعات زیادی در این زمینه و تأثیر آن بر آلودگی خاک و گیاهانی که در تماس با آن باشند، صورت نگرفته است (گراناتو و همکاران، ۱۹۹۵).

تاکنون روش‌های زیاد شیمیایی و بیولوژیکی برای کاهش آلودگی فلزات سنگین ارائه شده است. معمول‌ترین روش تصفیه و حذف فلزات سنگین، استفاده از اسمز معکوس<sup>۶</sup>، تبادل یون، ترسیب شیمیایی، جذب توسط کربن فعال و فرآیندهای الکترودیالیز<sup>۷</sup> خواهد بود، اما هزینه استفاده از این روش‌ها نسبتاً بالا است و از طرفی حذف کامل فلزات انجام نمی‌شود. بنابراین استفاده از روش‌های دیگر برای جذب و حذف فلزات سنگین امری اجتناب‌ناپذیر است. فلزات سنگین، برخلاف آلاینده‌های آلی، پتانسیل تجزیه و تبدیل شدن به اجزای بی‌خطر را ندارند (هیونداک و همکاران، ۲۰۰۹). امروزه روش‌های بیولوژیکی در زمینه حذف این عناصر رواج یافته است و گیاهانی که خاصیت جذب عناصر سنگین را دارند، پیشنهاد شده است؛ برای مثال در بررسی آزمایشگاهی حذف آرسنیک از آب آلوده توسط جلبک ماکروسکوپی «کارا»، مشخص شد که این جلبک به خوبی آرسنیک را از آب آلوده جذب می‌کند و

4- International Agency for Research on Cancer

۵- مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران

6- Reverse osmosis

7- Electrodialytic

1- Domestic wastewater

2- Urban wastewater

3- Industrial Wastewater

توسط گیاه وتیور کشت شده در حالت هیدروپونیک، نشان داد تقریباً تمام تتراسایکلین در چهل روز اول توسط گیاه وتیور جذب و تجمع آن در ریشه و برگ‌های گیاه خواهد بود (داتا و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین در پژوهش دیگری در نیجریه، برای دفع سموم حاصل از پساب بیمارستانی به کمک گیاه وتیوریا نیگریطانا<sup>۵</sup> که در آن پساب بیمارستانی با آب معمولی به نسبت‌های ۳:۱، ۱:۳، ۱:۱ و ۴:۰ مخلوط شدند، نشان داد که نسبت اختلاط ۳:۱ بهترین پیشنهاد برای اوایل دوره رشد گیاه خواهد بود. (تیلان و همکاران، ۲۰۱۱ و ملم و همکاران، ۲۰۱۲). با کشت گیاه وتیور در شرایط هیدروپونیک، میزان تجمع بالای عنصر جیوه در قسمت هوایی گیاه گزارش شد (لوموته و همکاران، ۲۰۱۴). در هنگ کنگ چند گیاه وحشی از جمله خردل، سنبل، آفتابگردان، پالم و ذرت، به عنوان جاذب خوب در این زمینه گیاه‌پالایی معرفی شد (ایندلیکاتو، ۲۰۱۴). بنابراین استفاده از روش گیاه‌پالایی، به عنوان روشی کم هزینه و ساده در جهت جذب و حذف عناصر سنگین روز به روز در حال گسترش است. بدین منظور در این مطالعه استفاده از این روش، جذب و حذف عناصر سنگین، سمی و خطرناک موجود در فاضلاب‌های صنعتی از جمله آرسنیک، جیوه و کروم، توسط گیاه علفی وتیور مورد توجه قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش امکان حذف عناصر سنگین آرسنیک، جیوه و کروم از پساب فاضلاب شهرک صنعتی شهر برازجان به کمک روش گیاه‌پالایی در سال ۱۳۹۲، مورد توجه قرار گرفت. گیاه مورد استفاده در این پژوهش، علف وتیور (شکل ۱) و مکان انجام آزمایش در دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه خلیج فارس بوشهر بود. گیاه در گلدان‌هایی در فضای آزاد و زیر سایبان (به دلیل گرمای زیاد و آفتاب شدید) با سایه ۵۰ درصد کشت داده شد. سپس تیمارها، براساس طرح کاملاً تصادفی، در قالب هشت تیمار و چهار تکرار اجرا شد (جدول ۱). تیمارها به صورت A (تیمار ۱۰۰ درصد آب معمولی)، B (۱۰۰ درصد پساب صنعتی)، C (۵۰ درصد آب معمولی و ۵۰ درصد پساب صنعتی)، D (۳۰ درصد پساب صنعتی و ۷۰ درصد آب معمولی)، E (۷۰ درصد پساب صنعتی و ۳۰ درصد آب

قابلیت استفاده در عملیات گیاه‌پالایی به منظور رفع آلودگی آرسنیک از آب را دارد (بابایی و همکاران، ۱۳۸۶). در بررسی اثر لجن فاضلاب بر غلظت جیوه خاک و گیاه ذرت، بیشترین تجمع جیوه در ریشه و کمترین آن در دانه مشاهده شد (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۹). همچنین در بررسی قابلیت حذف جیوه از محلول‌های آبی توسط دو نوع پوست بادام، مشاهده شد که کارایی بالایی در حذف جیوه از محلول‌های آبی دارند، همچنین ظرفیت جذب جیوه توسط پوست سخت بیشتر از پوست نرم بود (شکوه‌السادات و همکاران، ۱۳۹۲). از پودر طبیعی گل گیاه تلخه به‌عنوان جاذب بیولوژیکی طبیعی در حذف کروم شش ظرفیتی از فاضلاب سنتتیک استفاده و به‌عنوان جاذبی ارزان قیمت و بسیار مؤثر در جذب کروم معرفی شد (فانعیان و همکاران، ۱۳۹۱). در مطالعه دیگر، خاک اره به عنوان روشی ارزان قیمت و فراوان برای حذف کروم شش ظرفیتی معرفی شد (سمرقندی، ۱۳۸۸). از جمله روش‌های دیگر می‌توان به استفاده از گیاهان سبز که این قابلیت را دارند، اشاره کرد که در اصطلاح به این روش گیاه‌پالایی<sup>۱</sup> می‌گویند (جادیا و فولیکار، ۲۰۰۹). به طور طبیعی گیاهانی وجود دارند که به طور غیرمعمول و حیرت‌آوری عناصر خاص را در خود متمرکز و در شرایط آلوده می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند (کالدروف و همکاران، ۱۹۹۹). تعداد این گیاهان محدود است که از آن جمله می‌توان به گیاه وتیور<sup>۲</sup> اشاره کرد. طرح‌های توسعه و پژوهش در سال‌های گذشته به روشنی ثابت کرده است که سیستم وتیور<sup>۳</sup> به دلیل دارا بودن ویژگی‌های فوق‌العاده، به عنوان یک تکنیک مهندسی زیستی برای تثبیت دامنه‌های شیب‌دار، دفن فاضلاب، گیاه‌پالایی زمین‌ها، آب‌های آلوده و سایر اهداف حفاظتی محیط‌زیست مورد استفاده قرار گرفته است. در شرایط آزمایشگاهی، گیاه وتیور، توانایی جذب ۹۸ درصد سرب از کل سرب موجود در خاک، ۵۴ درصد مس، ۴۱ درصد روی و ۸۸ درصد کادمیم را دارد و بهترین گزینه برای گیاه‌پالایی است (چن و همکاران، ۲۰۰۴). در شرایط مزرعه‌ای دیده شد که ریشه این گیاه محل تجمع مقدار زیادی از عناصر سنگین است (یانگ و همکاران، ۲۰۰۳). نتایج بررسی میزان جذب تتراسایکلین<sup>۴</sup>

1- Phytoremediation method  
2- Vetiveria zizanioides (L.) Nash  
3- Vetiver system  
4- Tetracycline (TC)

**جدول ۲- خواص فیزیکی خاک به کار رفته**

سری خاک	حاشیه رودخانه دالکی
بافت	لوم رسی
شن (%)	۳۵
سیلت (%)	۳۵
رس (%)	۳۰
چگالی حقیقی (g/cm <sup>3</sup> )	۲/۴
چگالی ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )	۱/۲
رطوبت حجمی اولیه (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	۰/۰۴
رطوبت حجمی اشباع (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	۰/۵۱
ظرفیت زراعی (درصد حجمی)	۲۶/۵
حد پژمردگی دائم (درصد حجمی)	۱۳/۵

معمولی)، F (پساب صنعتی و آب معمولی به صورت یک در میان)، G (۲ نوبت آبیاری با آب پساب صنعتی و یک نوبت آبیاری با آب معمولی) و H (دو نوبت آبیاری با آب معمولی و یک نوبت آبیاری با پساب صنعتی) بودند.



شکل ۱- گیاه وتیور و گلدان‌های استفاده شده در پژوهش

**جدول ۳- نتایج حاصل از تجزیه آزمایشگاهی آب معمولی و فاضلاب مورد استفاده در آبیاری گیاه (میکروگرم بر لیتر)**

کروم (Cr)	جیوه (Hg)	آرسنیک (As)	
۱۶	۰/۰۱۵	۰/۱۵	در خاک
۲	۰/۰۰۱	۰/۰۱	در آب معمولی
۱۵۰۰	۲	۲۵۰	در پساب صنعتی

**جدول ۱- چیدمان تیمارها در قالب چهار تکرار**

تکرار ۱	A	E	C	G	D	F	B	H
تکرار ۲	D	F	H	B	E	G	A	C
تکرار ۳	G	C	A	E	B	D	F	H
تکرار ۴	E	H	G	B	F	C	A	D

### نتایج و بحث

داده‌های حاصل از مقدار اندازه‌گیری شده برای آرسنیک، جیوه و کروم در جدول ۴ برای سه قسمت خاک، ریشه و اندام هوایی گیاه وتیور ارائه شده است. طبق داده‌های این جدول، عنصر جیوه به اندام هوایی انتقال پیدا نکرده است. برای تحلیل آماری داده‌های اندازه‌گیری شده به وسیله جذب اتمی، از نرم‌افزار SAS با روش طرح‌های کاملاً تصادفی استفاده شد. خلاصه نتایج حاصل از تجزیه آماری این طرح در سطح معنی‌داری ۵ درصد ( $\alpha=0/05$ ) در جدول ۵ و ۶ ارائه شده که در بررسی آماری الف تا ج به آن‌ها اشاره شده است.

### بررسی آماری مربوط به غلظت عناصر اندازه‌گیری شده عناصر در خاک

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، بیشترین کمترین غلظت عناصر آرسنیک، جیوه و کروم به ترتیب در تیمارهای B و A اتفاق افتاده است. بنابراین بیشترین غلظت آرسنیک برابر ۴۰۱/۷۵، جیوه برابر ۰/۰۱۹ و کروم برابر ۰/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک خشک و کمترین غلظت آرسنیک برابر ۳/۵، جیوه ۰/۰۰۱ و کروم برابر ۰/۰۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک خشک شد. تیمارهای E و C نسبت به غلظت بالای این سه عنصر، در رتبه‌های

از خاک قسمت آبرفتی حاشیه رودخانه دالکی واقع در شهرستان دشتستان با بافت لوم‌رسی (جدول ۲)، همراه با ۵ درصد کود حیوانی پوسیده شده، در کشت گیاه استفاده شد. پس از کاشت ابتدا به مدت سی روز با آب معمولی تا حد ظرفیت مزرعه آبیاری شدند تا با شرایط گلدان و خاک جدید سازگاری لازم را پیدا کنند. بعد از این مدت و قبل از اعمال تیمار، قسمت تاج گیاه برش داده شد و ارتفاع گیاه به ۷۰ سانتی‌متری رسید تا شرایط ارتفاعی گیاه برای همه تیمارها یکسان شود. پس از اعمال تیمارها، آبیاری به طور میانگین در هر هفته سه نوبت و به مدت ۷۵ روز انجام شد. نتایج مربوط به آزمایش نمونه آب معمولی و فاضلاب صنعتی مورد استفاده در آبیاری گیاه وتیور در جدول ۳ ارائه شده است.

پس از انجام آزمایش، نمونه‌های گیاهی (ریشه و اندام هوایی) و خاک مربوط به هر تکرار در تیمارهای مختلف برداشت شد. مقدار عناصر آرسنیک، جیوه و کروم در نمونه‌ها به روش جذب اتمی اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری آرسنیک و کروم از روش هضم اسیدی برای اندازه‌گیری عناصر در نمونه‌های گیاهی (مهرآگ و جاردین، ۲۰۰۳) و برای اندازه‌گیری جیوه از جذب اتمی به روش بخار سرد استفاده شد.

میلی گرم بر کیلوگرم ماده خشک، برای جیوه به ترتیب برابر ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ میلی گرم بر کیلوگرم ماده خشک و برای کروم به ترتیب برابر ۷/۰۹ و ۰/۰۰۵ میلی گرم بر کیلوگرم ماده خشک شد. اختلاف غلظت عناصر مذکور در تیمارهای E و C معنی دار نبود و از نظر بالا بودن غلظت، در رتبه های بعدی قرار دارند. اختلاف غلظت این عناصر در مابقی تیمارها معنی دار شد.

بعدی قرار دارند. غلظت این عناصر در تمامی تیمارها نسبت به یکدیگر معنی دار شد.

### بررسی آماری مربوط به غلظت عناصر اندازه گیری

#### شده عناصر در ریشه

بیشترین و کمترین غلظت عناصر آرسنیک، جیوه و کروم به ترتیب در تیمارهای B و A مشاهده شد (جدول ۴). این مقدار برای آرسنیک به ترتیب برابر ۸۵/۶۸ و ۰/۶۲

جدول ۴- غلظت عناصر اندازه گیری شده در قسمت های مختلف گیاه و تیور (میلی گرم بر کیلوگرم)

تیمار	تکرار	ریشه			اندام هوایی			خاک		
		آرسنیک (As)	جیوه (Hg)	کروم (Cr)	آرسنیک (As)	جیوه (Hg)	کروم (Cr)	آرسنیک (As)	جیوه (Hg)	کروم (Cr)
A	۱	۰/۵	۰/۰۰۱	۰	۰	۰	۵	۰/۰۰۲	۰/۰۲	۰
	۲	۱	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱	۰	۰	۳	۰/۰۰۲۱	۰/۰۲۳	۰/۰۰۱۵
	۳	۰/۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۹	۰	۰	۵	۰/۰۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۰۱۵
	۴	۰/۷	۰/۰۰۱۲	۰	۰	۰	۱	۰/۰۰۰۹	۰/۰۱۲	۰/۰۰۱۲
B	۱	۸۷/۲۵	۰/۰۱	۷/۱۲	۴/۳	۰	۴۰۳	۰/۱۵	۰/۱۶۱	۰/۶۱
	۲	۷۹/۱۲	۰/۰۱۲	۷/۲۵	۴/۲	۰	۳۹۷	۰/۱۸۷	۰/۱۶۲	۰/۶۲
	۳	۹۲/۲۵	۰/۰۱۱	۶/۹۷	۴/۲۳	۰	۴۰۷	۰/۱۹۵	۰/۱۵۸	۰/۵۸
	۴	۸۴/۱۳	۰/۰۱	۷/۰۳	۴/۰۵	۰	۴۰۰	۰/۰۲	۰/۱۵۹	۰/۵۹
C	۱	۳۳/۳۴	۰/۰۰۳۲	۳/۲	۲/۷۵	۰/۰۰۵۲	۳۰۵	۰/۱۱۱	۰/۳۵	۰/۳۵
	۲	۳۸/۱۲	۰/۰۰۳۵	۳/۰۷	۲/۲۳	۰	۲۹۷	۰/۱۰۵	۰/۳۷	۰/۳۷
	۳	۴۱/۷۴	۰/۰۰۴	۳/۹۸	۲/۴۵	۰	۲۸۹	۰/۱۰۷	۰/۳۳	۰/۳۳
	۴	۳۵/۱۲	۰/۰۰۳۸	۳/۴۳	۲/۵۶	۰/۰۰۴۸	۲۹۵	۰/۱۰۸	۰/۳	۰/۳
D	۱	۱۲/۶۲۵	۰/۰۰۲۵	۲/۴۵	۲/۶۲۵	۰	۲۶۲	۰/۰۵۲	۰/۱۵	۰/۱۵
	۲	۱۴/۱۲	۰/۰۰۲۸	۲/۲۶	۲/۰۵	۰/۰۰۲۸	۲۵۰	۰/۰۰۴۵	۰/۱۹	۰/۱۹
	۳	۱۰/۲۵	۰/۰۰۲۴	۲/۵۴	۱/۹۷۵	۰	۲۴۳	۰/۰۰۶۷	۰/۱۴	۰/۱۴
	۴	۸/۷۵	۰/۰۰۲۹	۲/۳۴	۲/۰۵	۰	۲۵۹	۰/۰۰۵۶	۰/۱۶	۰/۱۶
E	۱	۴۱/۲۵	۰/۰۰۵۴	۴/۱۷	۲/۷۸	۰/۰۰۷	۳۳۲	۰/۱۳۴	۰/۴۲	۰/۴۲
	۲	۳۸/۶۵	۰/۰۰۶۱	۴/۳۵	۲/۴۵	۰	۳۲۳	۰/۱۴۵	۰/۴۳	۰/۴۳
	۳	۴۰/۰۵	۰/۰۰۵۸	۴/۲۳	۲/۸۷	۰	۳۰۴	۰/۱۲۳	۰/۴۲	۰/۴۲
	۴	۴۳/۱	۰/۰۰۵۵	۴/۱۹	۲/۹۸	۰	۳۱۹	۰/۱۲۷	۰/۴۵	۰/۴۵
F	۱	۲۵/۱۲	۰/۰۰۲۸	۲/۸۲	۱/۱۲	۰	۱۷۷	۰/۰۸۵	۰/۲۵	۰/۲۵
	۲	۲۳/۲۵	۰/۰۰۳	۲/۹۱	۱/۴۵	۰	۱۷۸	۰/۰۹۵	۰/۲۶	۰/۲۶
	۳	۱۹/۴۵	۰/۰۰۳۲	۲/۷۵	۱/۰۵	۰	۱۸۳	۰/۰۹۷	۰/۲۵	۰/۲۵
	۴	۲۲/۲۵	۰/۰۰۳۵	۲/۸۷	۱/۵۵	۰	۱۹۱	۰/۰۷۹	۰/۲۴	۰/۲۴
G	۱	۳۸/۲۳	۰/۰۰۳۵	۴/۱۲	۲/۲۵	۰/۰۰۵۵	۲۷۶	۰/۱۱۲	۰/۳	۰/۳
	۲	۳۲/۴۵	۰/۰۰۴۱	۴/۹۹	۲/۱۲	۰	۲۵۳	۰/۱۲۳	۰/۳۱	۰/۳۱
	۳	۳۰/۲۵	۰/۰۰۳۸	۵/۱۸	۲/۵۶	۰/۰۰۶۱	۲۶۷	۰/۱۰۹	۰/۲۹	۰/۲۹
	۴	۳۵/۶۷	۰/۰۰۳۷	۵/۰۵	۲/۷۸	۰	۲۵۵	۰/۱۲	۰/۳۳	۰/۳۳
H	۱	۸/۷۵	۰/۰۰۱	۱/۷۳	۰/۵۵	۰	۷۵	۰/۰۰۴۵	۰/۱۲	۰/۱۲
	۲	۱۰/۱۲	۰/۰۰۱۳	۱/۵۸	۰/۶۷	۰	۷۷	۰/۰۰۵۴	۰/۱۳	۰/۱۳
	۳	۹/۳۳	۰/۰۰۱۱	۱/۶۵	۰/۷۵	۰	۶۳	۰/۰۰۵۳	۰/۱۱	۰/۱۱
	۴	۸/۵۶	۰/۰۰۱۲	۱/۷۳	۰/۶۵	۰	۶۹	۰/۰۰۴۵	۰/۱۴	۰/۱۴

جدول ۵ - خلاصه جدول ANOVA مربوط به میزان عناصر جذب شده در قسمت‌های مختلف گیاه و تیور

فلز سنگین	ریشه		اندام هوایی		خاک	
	R-Square	Pr > F	R-Square	Pr > F	R-Square	Pr > F
کروم	۰/۹۸۹۸۲	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۱۳۵۴	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۲۳۴	<۰/۰۰۰۱
جیوه	۰/۹۸۴۴۳	<۰/۰۰۰۱	۰/۲۹۲۸۱۳	۰/۲۴۳۳	۰/۹۸۷۰۳۹	<۰/۰۰۰۱
آرسنیک	۰/۹۸۹۳۱۴	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۷۸۴۵۴	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۷۰۹۷	<۰/۰۰۰۱

جدول ۶ - جدول توزیع آماری (در  $\alpha=0/05$ ) مربوط به میزان عناصر اندازه‌گیری شده در قسمت‌های مختلف گیاه و تیور (میلی‌گرم بر کیلوگرم)

تیمار	آرسنیک (As)			جیوه (Hg)			کروم (Cr)		
	خاک	ریشه	اندام هوایی	خاک	ریشه	اندام هوایی	خاک	ریشه	اندام هوایی
A	۳/۵ <sup>g</sup>	۰/۶۲۵ <sup>f</sup>	۰ <sup>g</sup>	۰/۰۱۶۲۵ <sup>f</sup>	۰/۰۱۱۷۵ <sup>f</sup>	۰ <sup>a</sup>	۰/۰۱۷۵ <sup>h</sup>	۰/۰۰۰۵ <sup>h</sup>	۰/۰۰۰۶ <sup>g</sup>
B	۴۰/۱۷۵ <sup>a</sup>	۸۵/۶۸۸ <sup>a</sup>	۴/۱۹۵ <sup>a</sup>	۰/۰۱۹۴۲۵ <sup>a</sup>	۰/۰۱۰۷۵ <sup>a</sup>	۰ <sup>a</sup>	۰/۶ <sup>a</sup>	۷/۰۹۲۵ <sup>a</sup>	۰/۱۵۱۲۵ <sup>a</sup>
C	۲۹۶/۵ <sup>c</sup>	۳۷/۰۸ <sup>bc</sup>	۲/۴۹۷۵ <sup>bc</sup>	۰/۰۱۰۷۷۵ <sup>c</sup>	۰/۰۰۳۶۲۵ <sup>dc</sup>	۰/۰۰۲۵ <sup>a</sup>	۰/۳۳۷۵ <sup>c</sup>	۳/۴۲ <sup>d</sup>	۰/۰۸۱ <sup>c</sup>
D	۲۵۳/۵ <sup>d</sup>	۱۱/۴۳۶ <sup>e</sup>	۲/۱۷۵ <sup>d</sup>	۰/۰۰۵۵۲۵ <sup>e</sup>	۰/۰۰۲۶۵ <sup>e</sup>	۰/۰۰۰۷ <sup>a</sup>	۰/۱۶ <sup>f</sup>	۲۳۹۷۵ <sup>f</sup>	۰/۰۴۵۵ <sup>e</sup>
E	۳۱۹/۵ <sup>b</sup>	۴۰/۷۶۳ <sup>b</sup>	۲/۷۷ <sup>b</sup>	۰/۰۱۳۲۲۵ <sup>b</sup>	۰/۰۰۵۷ <sup>b</sup>	۰/۰۰۱۷۵ <sup>a</sup>	۰/۴۳ <sup>b</sup>	۴/۲۳۵ <sup>c</sup>	۰/۱۲۰۵ <sup>b</sup>
F	۱۸۲/۲۵ <sup>e</sup>	۲۲/۵۱۸ <sup>d</sup>	۱/۲۹۲۵ <sup>e</sup>	۰/۰۰۸۹ <sup>d</sup>	۰/۰۰۳۱۲۵ <sup>de</sup>	۰ <sup>a</sup>	۰/۲۵ <sup>e</sup>	۲/۸۳۷۵ <sup>e</sup>	۰/۰۶۱۵ <sup>d</sup>
G	۲۶۲/۷۵ <sup>d</sup>	۳۴/۱۵ <sup>c</sup>	۲/۴۲۷۵ <sup>dc</sup>	۰/۰۱۱۶ <sup>c</sup>	۰/۰۰۳۷۷۵ <sup>c</sup>	۰/۰۰۲۹ <sup>a</sup>	۰/۳۰۷۵ <sup>d</sup>	۴/۸۳۵ <sup>b</sup>	۰/۰۸۱ <sup>c</sup>
H	۷۱ <sup>f</sup>	۹/۱۹ <sup>e</sup>	۰/۶۵۵ <sup>f</sup>	۰/۰۰۴۹۲۵ <sup>e</sup>	۰/۰۰۱۱۵ <sup>f</sup>	۰ <sup>a</sup>	۰/۱۲۵ <sup>g</sup>	۱/۶۷۲۵ <sup>g</sup>	۰/۰۳۲۲۵ <sup>f</sup>

### بررسی آماری مربوط به غلظت عناصر اندازه‌گیری شده عناصر در اندام هوایی

سطح معنی‌داری جذب جیوه توسط اندام هوایی بیش از  $\alpha=0/05$  بود و این نشان از معنی‌دار نشدن جذب این عنصر توسط اندام هوایی گیاه و تیور دارد. به عبارتی عنصر جیوه را به اندام هوایی انتقال پیدا نکرده است. بیشترین و کمترین غلظت عناصر آرسنیک و کروم به ترتیب در تیمارهای A و B مشاهده شد؛ بنابراین، این مقدار به ترتیب ۴/۱۹ و ۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک برای آرسنیک و ۰/۱۵ و ۰/۰۰۰۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک برای کروم شده است. اختلاف غلظت عنصر آرسنیک در تیمارهای E و C، بین تیمارهای C و G و همچنین بین تیمارهای D و G معنی‌دار نشد. اختلاف غلظت عنصر کروم بین تیمارها معنی‌دار شد.

طبق اطلاعات موجود در جدول ۶ در تمامی موارد بیشترین تجمع در تیمار B و کمترین، در تیمار A برای هر سه عنصر به دست آمد. در خاک، بین تیمارهای D با G در جذب آرسنیک و تیمارهای C با G در جذب جیوه اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. نتایج این پژوهش با نتایج ترانگ (۲۰۰۰a) نیز مقایسه شد (جدول ۷). در این

جدول کمترین غلظت این عناصر در هر دو پژوهش در قسمت اندام هوایی گیاه مشاهده شد. نسبت غلظت آرسنیک در اندام هوایی به ریشه گیاه و تیور در این پژوهش با نتایج پژوهش مذکور همخوانی دارد، اما این نسبت در مورد عناصر جیوه و کروم صادق نیست و در این پژوهش بیشتر شد. نسبت غلظت عنصر آرسنیک در اندام هوایی به کل غلظت عناصر موجود در این پژوهش نسبت به نتایج پژوهش تجمع یافته ترانگ (۲۰۰۰a) کمتر شد، اما این نسبت در مورد دیگر عناصر همخوانی خوبی داشت. بیشترین غلظت عنصر آرسنیک تجمع یافته در خاک در این پژوهش برابر ۲۵۵/۳۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم شد (جدول ۸) که با نتایج پژوهش ترانگ (۱۹۹۹ و ۲۰۰۰b) (۱۰۰-۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) همخوانی داشت.

همچنین غلظت عناصر آرسنیک و جیوه در گیاه و تیور (اندام هوایی و ریشه) در این پژوهش با نتایج پژوهش مذکور همخوانی خوبی نشان داد. غلظت عنصر کروم در گیاه و تیور (۴/۴۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک) نیز با نتایج پژوهش‌های مذکور نسبتاً همخوان بود.

جدول ۷- متوسط توزیع عناصر سنگین آرسنیک، کروم و جیوه در اندام هوایی و ریشه گیاه وتیور ۱- توسط (Truong, 2000a) و ۲- در

## این پژوهش

فلز سنگین	خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)	اندام هوایی (میلی گرم بر کیلوگرم)	ریشه (میلی گرم بر کیلوگرم)	ریشه / اندام هوایی %	کل / اندام هوایی %
آرسنیک	۶۸۸/۴	۸/۴	۱۸۰/۲	۴/۸	۴/۶
۱ کروم	۲۸۳/۳	۹	۱۱۰۸	< ۱	< ۱
جیوه	۱/۹۸	۰/۰۵	۲/۲۷	۶	۵
آرسنیک	۲۵۵/۳۲	۲/۲۹	۴۲/۴۸	۵/۴	۰/۸
۲ کروم	۰/۳۲	۰/۰۸	۴/۳۵	۱/۹	۱/۷
جیوه	۰/۱۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۲۱/۷	۶/۶

جدول ۸- حد آستانه فلزات سنگین آرسنیک، کروم و جیوه در گیاه وتیور در مقایسه با سایر گیاهان (Truong, 1999, 2000b) و مقایسه

## آن با این پژوهش

فلز سنگین	حد آستانه در خاک (میلی گرم بر کیلوگرم ماده خشک)		حد آستانه در گیاه (میلی گرم بر کیلوگرم ماده خشک)	
	ترانگ (۱۹۹۹ و ۲۰۰۰b)	تجمع یافته در این پژوهش	ترانگ (۱۹۹۹ و ۲۰۰۰b)	تجمع یافته در این پژوهش
آرسنیک	۲۵۰-۱۰۰	۲۵۵/۳۲	۷۲-۲۱	۴۷/۷۷
کروم	۶۰۰-۲۰۰	۰/۳۲	۱۸-۵	۴/۴۳
جیوه	> ۶	۰/۱۱	> ۰/۱۲	۲۱/۷۰۵

## نتیجه گیری

در این مطالعه، نشان داده شد که بیشترین غلظت عناصر در خاک و پس از آن در ریشه و کمترین غلظت این عناصر در قسمت اندام هوایی گیاه وتیور تجمع می‌یابد. در این پژوهش نسبت غلظت آرسنیک در اندام هوایی به ریشه گیاه وتیور کمترین مقدار و همچنین نسبت تجمع این عنصر در اندام هوایی به کل غلظت عناصر تجمع یافته در گیاه، نسبت به نتایج پژوهش‌های دیگر کمتر شد. با توجه به تجمع بالای عناصر سنگین آرسنیک، کروم و جیوه در قسمت ریشه گیاه وتیور، می‌توان از آن به عنوان جاذب خوب عناصر سنگین آرسنیک، کروم و جیوه استفاده کرد، به گونه‌ای که بیشترین تجمع در تیمار B که از بیشترین درصد پساب برای آبیاری استفاده شده است، مشاهده شد. همچنین بیشترین تجمع عناصر، بعد از تیمار B مربوط به تیمارهایی بوده که سهم پساب در آبیاری در آن‌ها بیشتر شده است. مقدار خیلی کمی از عناصر سنگین آرسنیک، کروم و جیوه در قسمت اندام هوایی گیاه وتیور تجمع یافت؛ بنابراین می‌توان از قسمت سبزینه گیاه برای علوفه حیوانات نیز استفاده کرد.

## منابع

- اسکندری م. ۱۳۹۰. امکان‌سنجی و بررسی استفاده از آب‌های غیرمتعارف (پساب) در آبیاری با استفاده از نانوفناوری. گزارش نهایی از طرح تحقیقاتی. جهاد دانشگاهی دانشگاه تربیت مدرس. ۱۱۹ ص.
- اسماعیلی ساری ع. ۱۳۸۱. آلاینده‌ها، بهداشت و استاندارد در محیط‌زیست، انتشارات نقش مهر. ۷۹۸ ص.
- اکبرپور ا. نصری ف. و شمسی ب. ۱۳۸۵. فلزات سنگین و محیط‌زیست، انتشارات دانشگاه آزاد سنندج. ۱۷۶ ص.
- بابایی ی. قاسمزاده ف. ارباب زوار م. ح. و علوی مقدم م. ر. ۱۳۸۶. مطالعه آزمایشگاهی حذف آرسنیک از آب آلوده توسط جلبک ماکروسکوپی «کارا علوم و تکنولوژی محیط‌زیست. ۹(۲): ۱۱-۱۸.
- براتی ا. ه. ۱۳۸۳. بررسی منابع آب شرب روستایی براساس پارامترهای استاندارد ملی در شهرستان بیجار و قروه از توابع استان کردستان. انتشارات دانشگاه کردستان. ۱۲۲ ص.

- Wildflowers as Bioremediation for Contaminated Soils in the Hong Kong S.A.R. Open Journal of Soil Science. 4: 305-311.
17. ISIRI (Institute of Standards & Industrial Research of Iran). 1997. Quality standards of drinking water. Institute of Standards and Industrial Research of Iran. available from: <http://www.isiri.org/std/1053.htm>
18. Jadia C. D. and Fulekar M. H. 2009. "Phytoremediation of heavy metals: Recent techniques." African Journal of Biotechnology. 8(6): 921-928.
19. Kaldorf M. Kuhn A. J. Schroder W. H. Hildebrandt U. and Bothe H. 1999. Selective element deposits in maize colonized by a heavy metal tolerance conferring arbuscular mycorrhizal fungus. Journal Plant Physiol. 154: 718-728.
20. Lomonte C. Wang Y. Doronila A. Gregory D. Baker A. J. M. Siegle R. and Kolev S. D. 2014. Study of the spatial distribution of mercury in roots of vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) by micro-pixe spectrometry. International Journal of Phytoremediation. 16(11): 1170-1182.
21. McBride M. B. 1998. Growing food crops on sludge-amended soils problems with the U.S. Environmental Protection Agency method of estimating toxic metal transfer. Environmental Toxicol and Chem. 17: 2274-2281.
22. Meharg A. A. and Jardine L. 2003. Arsenite transport into paddy rice (*Oryza sativa*) roots. New Phytologist. 157: 39-44.
23. Mellem J. J. Baijnath H. and Odhav B. 2012. Bioaccumulation of Cr, Hg, As, Pb, Cu and Ni with the ability for hyperaccumulation by *Amaranthus dubius*. African Journal of Agricultural Research. 7: 591-596.
24. Taylan K. Elif Y. Eda K. Çi dem B. Sirri Y. Murat B. Gül C. and Muammer U. 2011. Uptake, accumulation and some biochemical responses in *Raphanus sativus* L. to zinc stress. Afr. J. Biotechnol. 10: 5993-6000.
25. Truong P. N. 1999. Vetiver Grass Technology for mine tailings rehabilitation. Proc. First Asia Pacific Conference on Ground and Water Bio-engineering for Erosion Control and Slope Stabilization. Manila, April 1999.
26. Truong P. N. 2000a. The Global Impact of Vetiver Grass Technology on the Environment. Journal of Colloid and Interface Science. 345: 234-240.
27. Truong P. N. 2000b. Application of the Vetiver System for phytoremediation of Mercury Pollution in the Lake and Yolo Counties, Northern California. Invited paper presented at the Pollution Solutions Seminar, sponsored by
۶. سمرقندی م. ح. ۱۳۸۸. حذف کروم شش ظرفیتی از محیط‌های آبی با استفاده از خاک اره اصلاح شده درخت راجی: مطالعه تعادلی و سینتیکی. مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی همدان. ۱۶(۴): ۶۱-۶۷.
۷. شکوه‌السادات خ. و وثوقی ش. و غلام‌نیا ر. ۱۳۹۲. مقایسه کارایی دو نوع پوست بادام در حذف جیوه از محلول‌های آبی. مجله بهبود. ۱۷(۳): ۱۵۵-۱۶۳.
۸. قانعیان م. ت. احرامپوش م. ح. دهوراری م. جمشیدی ب. و امرالهی م. ۱۳۹۱. کاربرد پودر طبیعی گل گیاه تلخه به عنوان جاذب بیولوژیکی طبیعی در حذف کروم شش ظرفیتی از فاضلاب سنتتیک. طلوع بهداشت. ۲: ۱۹-۲۸.
۹. کریم‌پور م. افیونی م. و اسماعیلی ساری ع. ۱۳۸۹. اثر لجن فاضلاب بر غلظت جیوه خاک و گیاه ذرت. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۵۲: ۱۱۵-۱۲۳.
10. Chen Y. Shen Z. and Li X. 2004. The use of Vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) in the hytoremediation of soils contaminated with heavy metals. Applied geochemistry. 19: 1553-1565.
11. Datta R. Das P. Smith S. Punamiya P. Ramanathan D. M. Reddy R. and Sarkar D. 2013. Phytoremediation potential of vetiver grass [*Chrysopogon zizanioides* (L.)] for tetracycline. International journal of phytoremediation. 15: 343-351.
12. Demirbas E. Kobya M. and Senturk E. 2004. Adsorption kinetics for the removal of Chromium (VI) from aqueous solutions on the activated carbons prepared from agricultural wastes. Water S.A. 30(4): 533-539.
13. Girginova P. L. Daniel L. Lapoes B. Figueira P. Otero M. Amaral V. S. Pereira E. and Trindade T. 2010. Silica coated magnetite particles for magnetic removal of  $Hg^{2+}$  from water. Journal of Colloid and Interface Science. 345: 234-240.
14. Granato T. C. Pietz R. I. Gschwind J. and Lue-Hing C. 1995. Mercury in soils and crops from fields receiving high cumulative sewage sludge applications: validation of 9. U.S. EPA's risk assessment for human ingestion. Water, Air and Soil Pollut. 80: 1119-1127.
15. Hyun-Doc C. Jung-Min C. and Kitae B. 2009. Influence of cationic surfactant on adsorption of Cr (VI) onto activated carbon. Journal Hazardous Material. 161(2-3): 1565-1568.
16. Indelicato A. 2014. The Use of Plants and



- 
- the Yolo County Flood Control & Water Conservation District and Family Water Alliance at Clear Lake on 10 May 2000.
28. WHO. 2004. Guidelines for Drinking-Water Quality. World Health Organization Geneva. 210p.
29. Yang B. Shu W. Ye Z. LAN C. and Wong M. 2003. Growth and metal accumulation in vetiver and two *Sesbania* species on lead/zinc mine tailings. *Chemosphere*. 52: 1593-1600.

