نشریه پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب) / الف / جلد 30 / شماره 2 / 1395
DOI: http://dx.doi.org/10.22092/ijsr.2016.106718

گیاه پالایی کروم شش ظرفیتی در خاک‌های آلوده با استفاده از گیاه خرفه (*Portulaca oleracea*)

الهام عزیزی[1]، راهله رهباریان و آتنا میربلوک

استادیار گروه زراعت، دانشگاه پیام نور، ایران؛ **azizi40760@gmail.com**

استاد یار گروه زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، ایران؛ **ra_rahbarian@yahoo.com**

دانشجوی دکتری شیمی و حاصلخیزی خاک دانشگاه ارومیه و مدرس مدعو دانشگاه پیام نور، ایران؛ **atena.mirbolook@yahoo.com**

دریافت: **94/7/21** و پذیرش: **95/3/9**

چکیده

امروزه به دلیل پیشرفت صنایع و شهرنشینی، غلظت‌های بالایی از فلز سنگین کروم در منابع خاک و آب وجود دارد که خطر جدی برای سلامت انسان و محیط زیست محسوب می‌شود. در این تحقیق، توانایی گیاه خرفه (*Portulaca oleracea*) در گیاه پالایی کروم شش ظرفیتی از خاک، تحت تأثیر غلظت های مختلف کروم در خاک مورد بررسی قرار گرفت. بذور خرفه در شرایط گلخانه، در گلدان‌هایی که با غلظت‌های 0، 25، 50، 75 و 100 میلی‌گرم بر کیلوگرم کروم (از نمک دی کرومات پتاسیم) آماده شده بودند، رشد کردند. در پایان مرحله رشد رویشی (60 روز پس از کاشت)، غلظت کروم سه و شش ظرفیتی و همچنین فاکتورهای تجمع زیستی در گیاه خرفه بررسی شدند. نتایج نشان دادند که با افزایش غلظت کروم در خاک میانگین وزن خشک ریشه و اندام هوایی گیاه خرفه کاهش معنی‌داری یافتند و غلظت کروم شش ظرفیتی در ریشه و اندام هوایی گیاه افزایش یافت. افزایش غلظت کروم در خاک، به ویژه غلظت‌های بیشتر از 50 میلی‌گرم در کیلوگرم، منجربه کاهش فاکتور انتقال کروم شش ظرفیتی در گیاه شد. در بالاترین سطح کروم در خاک یعنی غلظت 100 میلی‌گرم بر کیلوگرم، کروم کل تجمع یافته در ریشه و اندام هوایی به ترتیب 3400 و 1500 میلی گرم بر کیلوگرم بود. همچنین فاکتور تجمع زیستی در گیاه خرفه بیشتر از 1 بدست آمد که بر این اساس می توان توانایی این گیاه را به عنوان یک تجمع دهنده کارا برای کروم شش ظرفیتی در خاک‌ها تأیید کرد.

واژه‌های کلیدی: کروم سه ظرفیتی، تجمع بیولوژیکی، گیاه تجمع دهنده، فاکتور انتقال

---

[1]. نویسنده مسئول، آدرس: مشهد، آزاد شهر، بلوار معلم، معلم 72، دانشگاه پیام نور مرکز مشهد

مقدمه

توسعه روز افرون فعالیت‌های انسانی به طور جدی،محیط زیست را در معرض تخریب قرار داده است. فرایندهای صنعتی، کارخانجات مختلف، معادن و استفاده از کودهای شیمیایی همراه با ناخالصی ها و همچنین کاربرد لجن فاضلاب،منجربه تجمع انواع آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین در محیط زیست می‌شوند.کروم یکی از مشکل آفرین‌ترین فلزات سنگین می‌باشد زیرا به چندین حالت اکسایشی وجود دارد که اصلی‌ترین آنها کروم سه و شش ظرفیتی هستند (گوش و همکاران، 2005). کروم شش ظرفیتی برای همه گیاهان و حیوانات سمی بوده و شدیداً سرطان زاست و حلالیت و قابلیت دسترسی بالایی در آب و خاک دارد. فرم سه ظرفیتی کروم در خاک به شکل اکسیدهای کم محلول و نسبتاً غیر فراهم وجود دارد و حلالیت آن در خاک بیشتر به pH وابسته است. به دلیل تحرک و سمیت بالای کروم شش ظرفیتی، اکسید شدن کروم سه ظرفیتی به شش ظرفیتی می‌تواند به طورجدی برای محیط زیست خطرناک باشد (آدریانو، 1986).

سطح کروم در گیاهانی که در خاک‌های معمولی رشد کرده‌اند کمتر از 1 میلی‌گرم بر کیلوگرم در وزن خشک آنها می‌باشد و به طور نادر به کمتر از 5 میلی‌گرم می‌رسد (پرت و همکاران، 1966). مطالعات نشان داده است که هر دو فرم کروم سه و شش ظرفیتی قابلیت دسترسی یکسانی را برای جذب شدن توسط گیاه دارند، هر چند با یک مکانیسم مشابه جذب نمی‌شوند (زاید و همکاران، 1998). گونه غالب کروم در ریشه ها فرم سه ظرفیتی کروم است زیرا تبدیل کروم شش به سه ظرفیتی تقریباً در ریشه ها اتفاق می‌افتد (میتیناری و همکاران، 1974). بعضی از گونه‌های گیاهی می‌توانند به طور نسبی مقدار زیادی کروم را در اندام هوایی تجمع دهند که به عنوانبیش تجمع دهنده کروم به شمار می‌آیند، در این میانبالاترین غلظت های کروم در خانواده *Brassicaceae* مثل کلم *Brassica Oleracea* مشاهده شده است (زاید و همکاران، 1998). مطالعات زیاد دیگری نیز روی جذب کروم بوسیله گیاهانی چون گندم، ذرت و برنج توسط مک گراس (1982) انجام شده است. در مطالعه‌ی دیگری، بررسی فرایند جذب کروم شش ظرفیتی روی انواع سبزیجات، صورت گرفت و بیشترین میزان جذب کروم در گیاه اسفناج و گل کلم و کمترین آن در گیاه نخود مشاهده شد. در این محصولات غلظت کروم کل در ریشه‌ها بین 0 تا 500 میلی گرم در کیلوگرم و در اندام هوایی بین 0 تا 250 میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شد (زاید و همکاران، 1998). استفاه از گیاه پالایی تکنیکی است که برای حذف فلزات سنگین از خاک‌های آلوده، رسوبات و آبها پیشنهاد می‌شود (تری و بانلوس، 2000). گیاه پالایی[1] فلزات سنگین از خاک، با عصاره‌گیری آن ها از خاک‌های آلوده بوسیله بافت‌های گیاهی انجام می‌شود. محققان گیاهانی را که توانایی اندوزش بیش از 1000 میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک، کروم را در اندام‌های خود دارند، به عنوان بیش تجمع دهنده کروم معرفی می‌کنند (علی و همکاران، 2013). برای ارزیابی گیاهان بیش تجمع دهنده، دو فاکتور تجمع زیستی و انتقال محاسبه می‌شود. فاکتور تجمع بیولوژیکی[2] (BAF) نسبت غلظت فلز در وزن خشک زیتوده (ریشه یااندام هوایی) به غلظت فلز در وزن خشک خاک می‌باشد (گونزاگا و همکاران، 2006) و فاکتور انتقال[3] (TF) بیانگر نسبت غلظت فلز در وزن خشک اندام هوایی به غلظت فلز در ریشه است. مقادیر بیش از 1 برای BAF و TF نشان دهنده ویژگی تجمع دهندگی در گیاه می‌باشد (دانگ و همکاران، 2007). شاخص بردباری[4] (TI) نیز برای ارزیابی توانایی گیاه در استرس‌های ناشی از آلاینده‌ها استفاده می‌شود که برابر با نسبت طول ریشه در گیاه کشت شده در غلظت بالای فلز آلاینده، به طول ریشه در گیاه شاهد (ردوندو-گومز و همکاران، 2011) است.

در حالت بدون تنش این مقدار 1 می باشد، اما وقتی گیاه در معرض تنش آلاینده قرار گیرد این نسبت به شدت کاهش می یابد. به علت سمیت بالای کروم شش ظرفیتی تعداد گونه های تجمع دهنده این فلز اندک است، حتی تجمع دهنده‌های معمول برای فلزات سنگینی مثل کادمیوم نیکل و روی همچون*Salix spp* برای کروم مناسب نیستند.گیاه *Brassica juncea* در مجاورت با غلظت 20 میلی گرم در کیلوگرم کروم به میزان 48 درصد کاهش در کل وزن خشک را نشان داد (الیویرا، 2012). مطالعه دیگری برای همان گیاه در غلظت 100میلی گرم در کیلوگرم کروم خاک نشان داد که غلظت کروم در اندام هوایی در حدود 20 میلی گرم در کیلوگرم و در ریشه ها در حدود 400 میلی‌گرم بود (بندیا و همکاران، 2010). در میان گونه‌های مورد استفاده برای گیاه پالایی کروم روی *ndica plucheria*، *cynodon dactylon* (سامپانپانیش و همکاران، 2006) و*typha angustifolia* (یو و همکاران،

1. Phytoremediation
2. Bioaccumulation Factor
3. Translocation Factor
4. Tolerance

2006) و *phragmites australis* (بارین و همکاران، 2008) تحقیق شده است. امروزه بشر سعی کرده است که دقت بیشتری را در انتخاب گیاهان پالاینده خاک داشته باشد. گیاه*Portulaca oleracea* یک گیاه گوشتی است که سازگاری بالایی را در مناطق خشک و نیمه خشک پیدا کرده است. این گیاه با جذب مقادیر بالای آب در اندام‌ها، قادر است غلظت‌های بالایی از فلزها را وارد بافت‌های خود کرده و در عصاره‌گیری آنها از خاک نقش دارد. تحقیقات نشان داده است که این گیاه قادر به تجمع غلظت های بالایی از فلز سنگین کروم در بافت‌هایش است (آیمان و همکاران، 2014). ویژگی‌های خاص گیاه خرفه و تحمل‌پذیری بالای آن در مناطق خشکی مثل ایران، بررسی قابلیت تحمل‌پذیری آن را به آلاینده‌های معدنی در حال رشد چون فلز سنگین کروم ارزشمند می‌کند، چرا که شاید بتوان از آن به عنوان گیاه جایگزین در مناطق آلوده برای رفع آلودگی بهره برد. در این تحقیق به بررسی خاصیت گیاه پالایی گیاه خرفه در خاک‌های آلوده به کروم پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف فلز کروم بر گیاه پالایی گیاه خرفه، تحقیق آزمایشگاهی به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار برای هر تیمار، در دانشگاه پیام نور مشهد انجام شد. برای شروع آزمایش گلدان‌های پلاستیکی آماده شدند و در هر کدام مقدار 3 کیلوگرم خاک با مشخصات ذکر شده در جدول 1 که از نواحی غربی شهر مشهد تهیه شده بود، ریخته شد. هر گلدان به عنوان یک واحد آزمایش در نظر گرفته شد و در آن، 10 عدد بذر گیاه خرفه *Portulaca oleracea* تهیه شده از مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان رضوی، کاشته شد. شرایط گلخانه با دمای تقریبی 25 تا 30 درجه سانتی گراد ثابت نگه داشته شد و گلدان-ها هر بار به میزان 75 درصد ظرفیت مزرعه آبیاری شدند. برای آماده سازی غلظت‌های 25، 50، 75 و 100 میلی‌گرم در کیلوگرم کروم از نمک دی کرومات پتاسیم استفاده شد.

جدول 1- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک قبل از شروع آزمایش

بافت خاک	پتاسیم فراهم (mg.kg⁻)	فسفر فراهم (mg.kg⁻)	نیتروژن کل (mg.kg⁻)	کروم فراهم (mg.kg⁻)	کروم فراهم (mg.kg⁻)	pH	EC (mmho.cm⁻)	مواد آلی (%)	آهک (%)
Silty loam	118	7/1	298	425	4/5	7/75	1/14	0/9	3/5

گلدان‌ها در طی 60 روز تا کامل شدن دوره رشد گیاه، 8 مرتبه (هفته ای یک بار) تا حد ظرفیت مزرعه به کمک آب پاش و به صورت یکنواخت با محلول های دی کرومات پتاسیم و گلدان‌های شاهد با آب مقطر آبیاری شدند (آیمان و همکاران، 2014). پس از 60 روز گیاهان از درون گلدان‌ها برداشت شدند و بعد از شستشو با آب مقطر، اندام هوایی و ریشه به طور جداگانه خشک و آماده تجزیه‌های شیمیایی شدند.

نمونه‌های ریشه و اندام هوایی به صورت جداگانه در دمای 75 درجه سانتی گراد و به مدت 48 ساعت در آون قرار داده شدند. برای تعیین میزان کروم کل در گیاه از روش اکسیداسیون تر با اسید استفاده شد. بدین منظور 0/03 گرم بافت خشک ریشه و اندام هوایی به طور جداگانه وزن گردید و میزان 3 میلی لیتر اسید نیتریک غلیظ به آن اضافه شد. پس از 48 تا 72 ساعت به منظور تکمیل فرایند هضم میزان 3 میلی لیتر اسید پرکلریک اضافه گردید و به آرامی تا بی رنگ شدن نمونه-ها حرارت داده شد. در نهایت حجم محلول با آب مقطر به 25 میلی لیتر رسانیده شده و در این عصاره میزان کروم کل توسط دستگاه جذب اتمی (مور، 1947) و میزان کروم شش ظرفیتی با استفاده از روش دی فنیل کربازاید (جیمز و همکاران، 1995) تعیین شد. در این روش از دی فنیل کربازاید به عنوان معرف کروم شش ظرفیتی استفاده می‌شود. در صورت وجود کروم شش ظرفیتی در محلول رنگ عصاره به رنگ ارغوانی تغییر می‌یابد. در نهایت شدت رنگ نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج 540 نانومتر اندازه‌گیری شد. میزان کروم سه ظرفیتی نیز از تفاضل کروم کل و کروم شش ظرفیتی بدست آمد.

برای تعیین کروم کل در خاک از روش هضم با دو اسید استفاده می‌شود، نمونه‌های خاک از گلدان‌ها برداشته شده و پس از خشک شدن و عبور از الک 2 میلی‌متری، با مخلوط 3 به 1 اسید کلریدریک و اسید نیتریک غلیظ هضم شدند و پس از سرد شدن و عبور از کاغذ صافی واتمن 42، میزان کروم کل با کمک دستگاه جذب اتمی تعیین گردید (داکیکی و خامیس، 2001). برای اندازه‌گیری کروم شش ظرفیتی در خاک، نمونه‌های خاک با کمک مخلوط کربنات سدیم 0/28 مولار و سود

0/5مولار (جیمز و پتورا، 1995) عصاره‌گیری شدند و پس از سانتریفیوژ، مقدار کروم شش ظرفیتی با استفاده از متد دی فنیل کربازاید در طول موج 540 نانومتر با کمک دستگاه اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری شد (جیمز و همکاران، 1995).

فاکتور تجمع بیولوژیکی از محاسبه‌ی نسبت غلظت فلز در وزن خشک زیتوده (ریشه یا اندام هوایی) به غلظت فلز در وزن خشک خاک بدست آمد (گونزاگا و همکاران، 2006). فاکتور انتقال از نسبت غلظت فلز در وزن خشک اندام هوایی به غلظت فلز در ریشه محاسبه شد. شاخص بردباری نیز برای ارزیابی توانایی گیاه در استرس‌های ناشی از آلاینده‌ها استفاده می‌شود که برابر با نسبت طول ریشه در گیاه کشت شده در غلظت بالای فلز آلاینده، به طول ریشه در گیاه شاهد می‌باشد (ردوندو-گومز و همکاران، 2011) که از طریق اندازه‌گیری طول ریشه ها با خط کش محاسبه شد. درصد کاهش کروم شش ظرفیتی در داخل گیاه نیز از رابطه Cr(III)/Cr(Total)*100) محاسبه شد. میزان کروم حذف شده از خاک نیز از طریق تعیین مجموع کروم شش و سه ظرفیتی در گیاه، اندازه‌گیری شد. تجزیه داده‌ها و ترسیم اشکال با استفاده از نرم افزارهای Minitab، MSTAT-C و Excel انجام گرفت. مقایسه میانگین داده‌ها نیز با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال 5 درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

اثر فلزات سنگین بر گیاهان با قابلیت دسترسی آن فلز در خاک رابطه مستقیم دارد (جیمز و پتورا، 1995). با توجه به اهمیت این موضوع، درصد قابل دسترس فلز سنگین کروم (کروم شش ظرفیتی) در خاک 60 روز پس از اعمال تیمارهای کروم به خاک، اندازه‌گیری شدند و در جدول 2 نشان داده شده است.

تغییرات وزن خشک ریشه و اندام هوایی گیاه خرفه در سطوح مختلف کروم در جدول 4 نشان داده شده است. با افزایش غلظت کروم در خاک وزن خشک ریشه و اندام هوایی به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد که نشان دهنده تنش ناشی از غلظت‌های بالای فلز سنگین در خاک می‌باشد (آیمان و همکاران، 2014).

جدول 2- میانگین کروم قابل دسترس، 60 روز پس از انکوباسیون در سطوح مختلف کروم

کروم افزوده شده ($mg\ kg^{-1}$)	کروم قابل دسترس ($mg\ kg^{-1}$)	درصد کروم قابل دسترس
0	0	0
25	7/27	29/08
50	16/1	32/2
75	26/57	35/42
100	38/18	38/18

جدول 3- تجزیه واریانس وزن خشک ریشه و اندام هوایی گیاه خرفه در سطوح مختلف کروم

منابع تغییر	درجه آزادی	+میانگین مربعات		
		وزن خشک ریشه	وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک کل
کروم	4	0/205**	0/187**	0/777**
خطا	10	0/003	0/002	0/007
ضریب تغییرات (درصد)		4/470	1/490	1/900

جدول 4- تغییرات میانگین وزن خشک ریشه و اندام هوایی گیاه خرفه در سطوح مختلف کروم

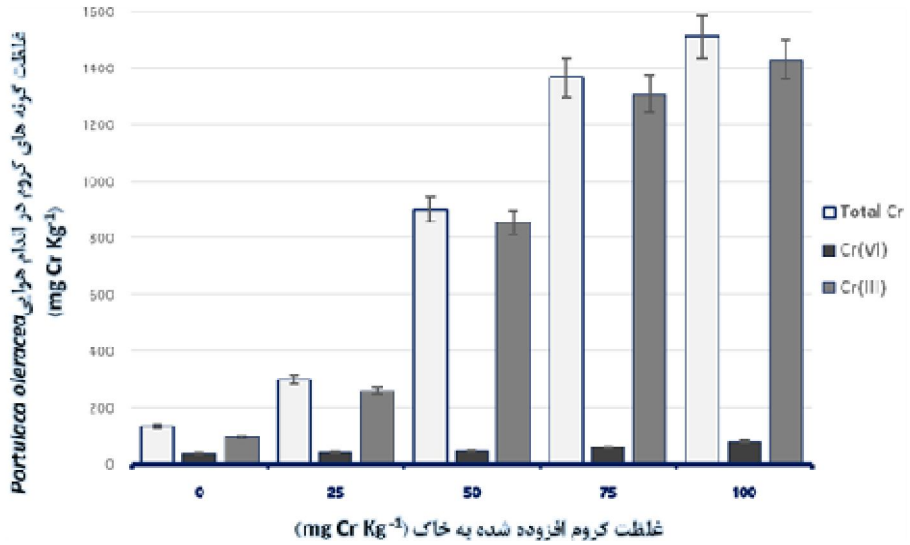
سطوح مختلف کروم (mg kg^{-})	وزن خشک ریشه (گرم در بوته)	وزن خشک اندام های هوایی (گرم در بوته)	وزن خشک کل (گرم در بوته)
0	1/613^{a}	3/420^{a}	5/033^{a}
25	1/427^{b}	3/287^{b}	4/713^{b}
50	1/217^{c}	3/153^{c}	4/370^{c}
75	1/033^{d}	2/913^{d}	3/947^{d}
100	1/000^{d}	2/823^{e}	3/823^{d}
LSD	0/099	0/081	0/152

غلظت و گونه‌های کروم در بافت های گیاه خرفه

تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف کروم بر میزان تجمع کروم کل، کروم سه و شش ظرفیتی در اندام هوایی و ریشه گیاه خرفه در جدول 5 نشان داده شده است. غلظت کروم کل(Total Cr)، کروم سه ظرفیتی(Cr(III)) و کروم شش ظرفیتی (Cr(VI)) در اندام-های هوایی و ریشه گیاه خرفه و در مجاورت با غلظت های 0 تا 100 میلی گرم بر کیلوگرم کروم در خاک در شکل‌های 1 و 2 نشان داده شده است. با افزایش غلظت کروم در خاک، میزان کروم کل به طور معنی‌داری در اندام‌های هوایی خرفه افزایش یافت به طوری‌که در غلظت 100 میلی گرم بر کیلوگرم کروم در خاک، غلظت کروم در اندام هوایی به 1500میلی گرم بر کیلوگرم رسید که نسبت به شاهد 1430میلی گرم بر کیلوگرم افزایش یافت. میزان کروم شش ظرفیتی نیز از 38/33 میلی‌گرم بر کیلوگرم در شاهد به 80/33 میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار 100 میلی گرم بر کیلوگرم کروم در خاک رسید.

جدول 5- تجزیه واریانس پیامد سطوح آلودگی برمیزان تجمع کروم کل، کروم سه و شش ظرفیتی در اندام هوایی و ریشه گیاه خرفه

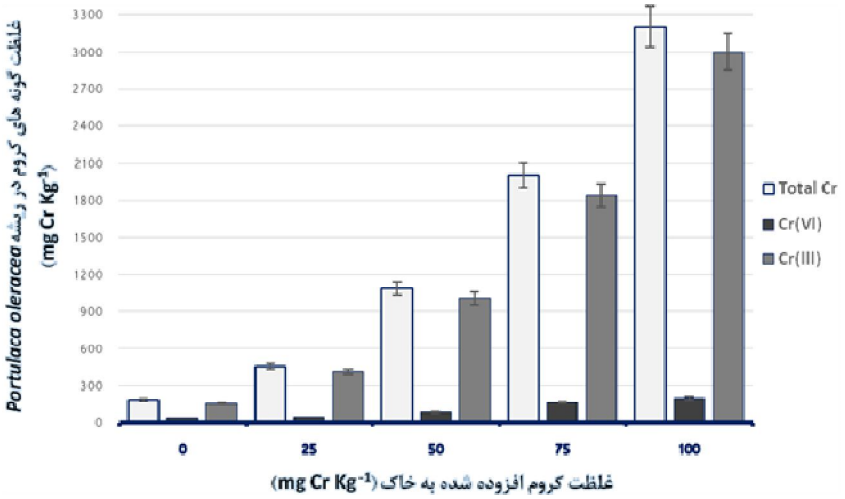
منابع تغییر	درجه آزادی	Cr(Total) Shoot	Cr(VI) Shoot	Cr(III) Shoot	Cr(Total) Root	Cr(VI) Root	Cr(III) Root
کروم	4	1139969**	903/07**	1083920**	5120543**	16285**	4569754**
خطا	10	7599	0/33	7609	13300	1	13247
ضریب تغییرات (درصد)		13/74	1/10	14/65	14/94	1/60	16/16



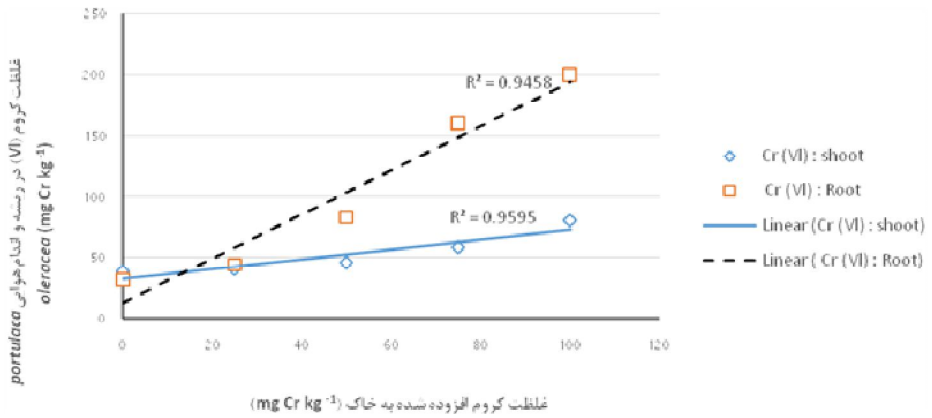
شکل 1- غلظت کروم کل، کروم سه و کروم شش ظرفیتی در اندام هوایی گیاه خرفه در غلظت‌های مختلف کروم در خاک (مقایسه میانگین‌ها در هر ظرفیت کروم به صورت مجزا صورت گرفته است.)

میزان کروم کل در ریشه‌های گیاه خرفه با افزایش سطح کروم در خاک، افزایش معنی‌داری را نشان داد. غلظت کروم کل در ریشه در شاهد 183/33 بود و در تیمار 100 میلی‌گرم کروم به 3400 میلی‌گرم بر کیلوگرم کروم رسید. غلظت کروم شش ظرفیتی در ریشه گیاه خرفه نیز با افزایش غلظت کروم در خاک افزایش یافت و از 31/40 میلی‌گرم در شاهد به 200/16 میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار 100 کروم رسید (شکل 2). همان گونه که مشاهده می‌شود، اکثر گونه‌های کروم در ریشه و ساقه، کروم سه ظرفیتی می‌باشد، در حالیکه بیشترین فرم فراهم کروم در خاک به صورت کروم شش ظرفیتی می‌باشد. این نشان می‌دهد که جذب کروم ازخاک به فرم کروم شش ظرفیتی اتفاق می‌افتد و سپس این کروم شش ظرفیتی با کارایی بالایی در گیاه به کروم سه ظرفیتی کاهش می‌یابد به همین دلیل در بافت‌های گیاهی بیشترین میزان کروم به فرم سه ظرفیتی یافت می‌شود. نتایج مشابهی در این زمینه به وسیله شانکر و همکاران (2005) ارائه شده است که قابلیت گیاه را در تبدیل کروم شش ظرفیتی به سه ظرفیتی نشان می‌دهد.

همان گونه که در شکل 3 مشاهده می‌شود به ازای هر 25 واحد افزایش در غلظت کروم در خاک، غلظت کروم به طور معنی‌داری در ریشه و اندام هوایی خرفه افزایش یافت و رابطه خطی معنی‌داری بین پارامترهای مورد بررسی در اندام‌های گیاهی مشاهده شد.



شکل 2- غلظت کروم کل، کروم سه و کروم شش ظرفیتی در ریشه گیاه خرفه در غلظت‌های مختلف کروم در خاک



شکل 3- همبستگی بین غلظت کروم در خاک و غلظت کروم شش ظرفیتی در اندام هوایی و ریشه گیاه خرفه

محققان دیگر نیز نتایج مشابهی را مطرح کردند، مثلاً کیم و همکاران (2003) در تحقیق روی تجمع کروم در گیاه *Leersia hexandra*، سطوح 0 تا 60 میلی‌گرم بر کیلوگرم کروم را انتخاب کردند و مشاهده نمودند که میزان تجمع کروم در ریشه‌ها تا 3300 میلی‌گرم و در اندام هوایی 2160 میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد و همچنین در این رنج غلظتی تفاوت معنی‌داری در کاهش زیتوده گیاهان مشاهده نکردند. همچنین پراکاش و همکاران (1995) گزارش کردند که در معرض غلظت‌های 0 تا 120 میلی‌گرم بر کیلوگرم کروم در خاک میزان 1824 میلی‌گرم بر کیلوگرم کروم در ریشه و 494 میلی‌گرم بر کیلوگرم در اندام‌های هوایی گیاه *Zea mays* مشاهده شد.

درصد کروم کاهش یافته (Cr(III)/Cr(Total)*100) در ریشه و اندام‌های هوایی گیاه خرفه در جدول 6 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود 82 تا 94 درصد از کروم در ریشه و 71 تا 95 درصد از آن در اندام هوایی پس از جذب تبدیل به کروم سه ظرفیتی می‌شوند. بنابراین تقریباً بیشترکروم شش ظرفیتی جذب شده توسط گیاه خرفه در داخل بافت‌های گیاهی به کروم سه ظرفیتی کاهش یافته است. گونه غالب کروم در ریشه و اندام هوایی، کروم سه ظرفیتی بود که تا 94 درصد در ریشه و تا 95 درصد در اندام هوایی مشاهده شد.

جدول 6- درصد کروم کاهش یافته در ریشه و اندام هوایی گیاه خرفه در سطوح مختلف کروم در خاک

غلظت کروم در خاک ($mg\ kg^{-1}$)	کروم کاهش یافته در ریشه (%)	کروم کاهش یافته در اندام هوایی (%)
0	82/87[e]	71/60[d]
25	90/34[d]	86/55[c]
50	92/34[b]	94/92[b]
75	91/93[c]	95/73[a]
100	94/11[a]	94/67[b]
LSD	0/26	0/30

با توجه به نمودار شکل‌های 1 و 2 تفاوت غلظت کروم در اندام هوایی و ریشه گیاه خرفه قابل توجه بود. بطوری‌که در تیمار 100 میلی‌گرم کروم در خاک، غلظت کروم کل در اندام هوایی 1511 میلی گرم و در ریشه 3400میلی‌گرم بوده و غلظت کروم 6 ظرفیتی به ترتیب 80/33 و 200/16 میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آمد. به طور کلی انباشت کروم در بخش‌های مختلف گیاه، متفاوت است زیرا با توجه به غلظت بالای کروم شش ظرفیتی در خاک، انتقال کروم از ریشه به اندام هوایی کمتر صورت گرفته است و تجمع کروم در ریشه‌های گیاه خرفه بیشتر می‌باشد. واجپای و همکاران (2000) در بررسی تجمع زیستی کروم در ریشه‌های گیاه *Nelumbonu cifera* دلیل این امر را اتصال یون کروم در جایگاه های تبادلی کاتیونی در ریشه و در نتیجه غیر متحرک شدن آن معرفی کردند. بنابراین بیشترین مقدار کروم جذب شده توسط گیاه در ریشه‌ها باقی می‌ماند و تنها بخش کوچکی از آن به اندام‌های هوایی منتقل می‌شود، لذا ریشه‌ها دارای کروم بسیار بیشتری نسبت به اندام هوایی می‌باشند (مک فارلین و همکاران، 2001). با توجه به این امر می‌توان برای گیاه پالایی کروم از خاک از گیاهانی بهره گرفت که ریشه‌های خوراکی نداشته باشند. البته بعضی از گونه‌های گیاهان نیز می‌توانند این عنصر را به میزان زیادی در اندام هوایی تجمع دهند. طبق گزارش لیون و همکاران (1969) در برگ‌های گونه *Leptospermum scoparium* غلظت کروم به بیشتر از 20000 میلی‌گرم بر کیلوگرم رسید و همچنین در گیاه *Sutera fodina* غلظت 48000 میلی‌گرمی کروم در برگ‌ها مشاهده شد (پیترسون و همکاران، 1975). در گیاه خرفه، با افزایش غلظت کروم در محیط، غلظت کروم کل و شش ظرفیتی در بافت‌ها نیز افزایش یافت و میزان تجمع این یون‌ها در ریشه بیشتر از اندام هوایی بود. این اطلاعات با نتایج گزارش شده در مورد گیاهان گندم، ذرت و گل کلم نیز مطابقت داشت (شارما و همکاران، 2003؛ شی- رانگ و همکاران، 1999؛ واجپای و همکاران، 2000).

جدول 7 اثر معنی‌داری سطوح مختلف کروم در خاک را بر میزان انباشت کروم کل، کروم سه و کروم شش ظرفیتی در اندام هوایی و ریشه نشان می‌دهد. با توجه به جدول، تغییر معنی‌دار میزان تجمع کروم سه و

شش ظرفیتی در سطوح غلظتی کروم نسبت به شاهد مشهود است و این میزان تجمع در سطح غلظتی 100 میلی‌گرم بر کیلوگرم کروم نسبت به شاهد بیشترین است. با توجه به جدول 7 مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت کروم در خاک، میزان تجمع کروم در گیاه با شدت بیشتری صورت گرفته است، به طوری‌که مثلاً در تغییر سطح فلز از 25 به 50 میلی‌گرم در خاک، غلظت فلز در گیاه 3 برابر شده است. دلیل این امر می‌تواند اثر رقابتی عناصر غذایی در خاک باشد، یعنی عنصری که دارای غلظت بیشتری در خاک است جذب بیشتری هم خواهد داشت، همچنین احتمال دارد تجمع لوکس عنصر در گیاه اتفاق بیفتد، و از طرفی گیاه خرفه یک گیاه وحشی است و طبیعاً مشابه گیاهان زراعی عمل نخواهد نکرد و واکنش‌های متفاوتی نسبت به تغییرات محیطی از خود نشان می‌دهد که قابل مطالعه و بررسی می‌باشند.

جدول 7-مقایسه میانگین سطوح مختلف کروم در خاک با تجمع کروم کل، کروم سه و کروم شش ظرفیتی در ریشه و اندام هوایی گیاه خرفه

سطوح کروم خاک ($mg\ kg^{-1}$)	Total Cr Shoot	Cr(VI) shoot	Cr(III) Shoot	Total Cr Root	Cr(VI) Root	Cr(III) Root
0	135/00^{d}	38/33^{e}	96/67^{d}	33/183^{e}	31/40^{e}	151/93^{e}
25	300/00^{c}	40/33^{d}	259/67^{c}	456/67^{d}	44/09^{d}	412/58^{d}
50	900/00^{b}	45/67^{c}	854/33^{b}	1083/33^{c}	82/99^{c}	1000/35^{c}
75	1366/67^{a}	58/33^{b}	1308/33^{a}	2000/00^{b}	160/26^{b}	1838/68^{b}
100	1511/11^{a}	80/33^{a}	1430/67^{a}	3400/00^{a}	200/16^{a}	3199/89^{a}
LSD	158/60	1/045	158/70	209/80	1/819	209/40

جدول 8-تجزیه واریانس فاکتورهای تجمع بیولوژیکی (BAF)، انتقال (TF) و شاخص تحمل (TI) در گیاه خرفه تحت سطوح مختلف کروم

منابع تغییر	درجه آزادی	BAF Cr(VI) Shoot	BAF Cr(VI) Root	TF Cr(VI)	TF Cr(Total)	TI
کروم	4	49/942**	9/5046**	0/4220**	0/0615*	0/5066**
خطا	10	0/1980	0/0855	0/0001	0/0138	0/0072
ضریب تغییرات (درصد)		9/0847	4/6047	3/3200	16/7520	13/2583

فاکتورهای انتقال و تجمع بیولوژیکی

تجزیه واریانس فاکتورهای تجمع بیولوژیکی، شاخص انتقال و تحمل در سطوح مختلف کروم در جدول 8 نشان داده شده است. با توجه به داده‌های مربوط به فاکتور تجمع بیولوژیکی(BAF) کروم 6 ظرفیتی در ریشه و اندام هوایی گیاه خرفه که در جدول 9 آورده شده است، مشاهده شد که گیاه خرفه ظرفیت بالایی را برای تجمع فلز سنگین کروم در اندام‌های خود دارد. دانگ و همکاران (2007) بیان کرده‌اند که مقادیر بالاتر از 1 برای BAF نشان دهنده گیاه تجمع دهنده می‌باشد. با افزایش غلظت کروم در خاک فاکتور تجمع در ریشه‌ها با شدت کمتری نسبت به اندام هوایی کاهش یافت که دلیل این امر تجمع بیشتر کروم در ریشه ها نسبت به اندام هوایی می‌باشد. فاکتور تجمع زیستی در ریشه گیاه خرفه در غلظت‌های 25 تا 100 میلی‌گرم کروم در خاک بین مقادیر 5 تا 6 تغییر کرد و تفاوت معنی‌داری در بین تیمارهای غلظتی مشاهده نشد. این امر نشان می‌دهد که گیاه خرفه کروم شش ظرفیتی را با یک نسبت ثابتی نسبت به غلظت این عنصر در خاک، تجمع می‌دهد.آیمان و همکاران (2014) گزارش کردند که در غلظت‌های بیشتر از 250 میلی‌گرم کروم در خاک، فاکتور تجمع زیستی به 15 می‌رسد که نشان دهنده‌ی پتانسیل بالای گیاه خرفه به عنوان یک بیش تجمع دهنده‌ی کارا برای کروم شش ظرفیتی می‌باشد.

جدول 9-فاکتور تجمع بیولوژیکی (BAF)، فاکتور انتقال (TF) و شاخص تحمل (TI) در غلظت های مختلف کروم در خاک

غلظت کروم در خاک ($mgkg^{-1}$)	BAF Cr(VI) Shoot	BAF Cr(VI) Root	TF Cr(VI)	TF Cr(Total)	TI
0	11/73[a]	9/46[a]	1/24[a]	0/81[a]	0/89[b]
25	5/62[b]	5/82[b]	0/91[b]	0/69[a]	1/20[a]
50	2/84[c]	5/16[c]	0/55[c]	0/83[a]	0/31[d]
75	2/20[c]	6/07[b]	0/36[e]	0/69[a]	0/21[d]
100	2/10[c]	5/24[c]	0/40[d]	0/46[b]	0/60[c]
LSD	0/81	0/53	0/02	0/21	0/15

فاکتور انتقال (TF) که نسبت غلظت فلز کروم در وزن خشک اندام هوایی به ریشه می‌باشد، برای کروم 6 ظرفیتی از محدوده 0/36 تا 1/24 و برای کروم کل از محدوده 0/46 تا 0/81 بدست آمد (جدول 9). فاکتور انتقال کروم شش ظرفیتی در گیاه خرفه با افزایش غلظت کروم در خاک، کاهش یافت. این نشان می‌دهد که در غلظت‌های بالای کروم در خاک انتقال این فلز به اندام-های هوایی کمتر اتفاق می‌افتد و تجمع بیشتر در ریشه‌ها صورت می‌گیرد. بیواینديا-گنزالس (2010) مقادیر 0/7 را برای فاکتور انتقال کروم در یک گونه بیابانی بدست آورد. زاید و همکاران (1998) نیز تجمع بیشتر کروم در ریشه سبزیجات را به دلیل انتقال کم کروم از ریشه به اندام‌های هوایی معرفی کردند و دلیل این امر را تنش بالای اکسیداتیو در بافت‌های ریشه در حضور کروم شش ظرفیتی دانستند.مک فارلین و همکاران (2001) در بررسی فیزیولوژیکی کروم در گیاهان بیان کردند که کروم سه ظرفیتی می‌تواند با گروه‌های COOH موجود در دیواره سلول‌های ریشه، پیوند برقرار کرده و این اتصال از جابجایی این فرم یونی به اندام‌های هوایی ممانعت می‌کند و در نتیجه غلظت کروم در اندام هوایی خیلی کمتر از غلظت آن در ریشه‌ها خواهد بود (مک فارلین و همکاران، 2001).

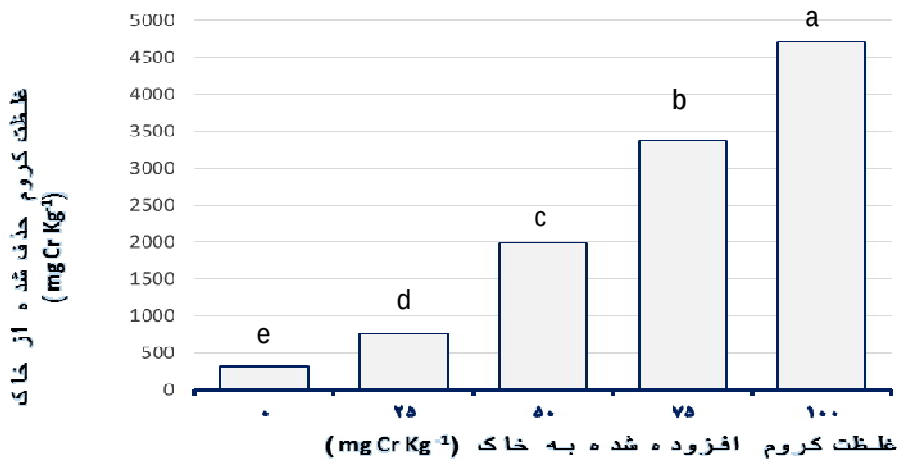
شاخص تحمل (TI) که نشان دهنده رشد ریشه گیاه در حضور آلاینده استدر حالت عادی دارای مقدار 1 می‌باشد اما وقتی گیاه در معرض تنش آلاینده قرار گیرد این نسبت به شدت کاهش می‌یابد (کائو و همکاران، 2008). با توجه به جدول 6، مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت کروم در خاک شاخص تحمل نسبت به شاهد کاهش یافت. کمترین میزان این شاخص در تیمار 75 میلی‌گرم بر کیلوگرم کروم در خاک مشاهده شد. افزایش شاخص تحمل در تیمار 25 میلی‌گرم بر کیلوگرم کروم نسبت به شاهد شاید به دلیل تأثیر مثبت مقادیر کم کروم در رشد گیاه و مقاومت بالای گیاه به تحمل شرایط تنش در این تیمار باشد (بونت و همکاران، 1991).

با توجه به اینکه با افزایش غلظت کروم در خاک، غلظت کروم فراهم (Cr(VI)) افزایش یافت (جدول2)، می‌توان نتیجه گرفت که کروم شش ظرفیتی جذب شده توسط گیاه خرفه، در درون بافت‌های گیاهی با کارایی بالایی تبدیل به کروم سه ظرفیتی می‌شود.درصد کاهش کروم نشان می‌دهد که بیشتر کروم شش ظرفیتی قبل از اینکه به اندام هوایی برسد در ریشه احیا می‌شود که دلیل این امر شاید استرس ناشی از آلاینده باشد. شانکر و همکاران (2005) نیز نتایج مشابهی را بدست آوردند و نشان دادند که ریشه های گیاه در غلظت های بالاتر از 200 میلی گرم بر کیلوگرم کروم نسبت به اندام هوایی سریعتر تخریب شدند. وقتی کل کروم ریشه و اندام هوایی خرفه محاسبه شود، میزان کروم حذف شده از خاک بدست می‌آید. همان گونه که در شکل 4 مشاهده می‌شود با افزایش غلظت کروم در خاک، میزانکروم حذف شده از خاک نیز افزایش یافته و در تیمار 100 میلی گرم کروم به حداکثر میزان خود رسید (شکل 4).

نتیجه‌گیری

گیاه خرفه با داشتن فاکتور تجمع بیولوژیکی بیشتر از 1 برای کروم، قابلیت رشد در خاک‌های آلوده به کروم را دارد و می‌تواند به عنوان یک گیاه بیش تجمع دهنده برای حذف آلودگی‌های ناشی از کروم شش ظرفیتی مورد استفاده قرار گیرد. البته با توجه به مشاهدات این تحقیق، تجمع کروم در ریشه‌های گیاه خرفه بیشتر از اندام هوایی بود و بیشتر کروم جذب شده در ریشه‌های گیاه به فرم سه ظرفیتی باقی ماند، در نتیجه می‌توان این گیاه را به عنوان یک گونه مناسب برای فرایند تثبیت زیستی[6] نیز معرفی نمود.

6. Phytostabilization



شکل 4- مجموع کروم سه و شش ظرفیتی حذف شده از خاک توسط گیاه خرفه در سطوح مختلف کروم در خاک

فهرست منابع:

1. Adriano, D.C. 1986. Trace Elements in the Environment. Chapter 5: Chromium. Springer-Verlag, New York.
2. Ali, H.E. Khan, and Sajad. M. 2013. “Phytoremediation of Heavy Metals – Concepts and Applications.” Chemosphere 91:869–881.
3. Ayman, H. Alyazouri, Jewsbury, A. Hassan, A. Tayim, Paul N. Humphreys Mohammad H. Al-Sayah, 2014. Phytoextraction of Cr(VI) from soil using Portulaca oleracea.Toxicological and Environmental Chemistry.
4. Bareen, S. Khilji, H. 2008, Bioaccumulation of metals from tannery sludge by Typhaangustifolia L., Afr. J. Biotechnol. 7: 3314–3320.
5. Bonet, A. Poschenrieder, C. and Barcelo, J. 1991. Chromium III-iron interaction in Fe-deficient and Fe-sufficient bean plants. I. Growth and nutrient content. J. Plant Nutr. 14(4): 403–414.
6. Buendia-Gonzalez, L., J. Orozco-Villafuerte, F. Cruz-Sosa, C.E. Barrera-Diaz, and E.J. Vernon- Carter. 2010. “prosopislaevigata a potential chromium (VI) and cadmium (II) hyperaccumulator desert Plant.” Bioresource Technology 101: 5862–5867.
7. Cao, L., M. Jiang, Z. Zeng, A. Du, H. Tan, and Y. Liu. 2008. “Trichodermaatroviride F6 Improve Phytoextraction Efficiency of Mustard (Brassica juncea (L.) Coss. var. foliosa Bailey) in Cd, Ni Contaminated Soils.” Chemosphere 71: 1769–1773.
8. Dakiky, M., & M. Khamis. 2002. Selective adsorption of chromium (VI) in industrial wastewater using low cost abundantly available adsorbents. Advanced in Environmental Research. 6: 533-540.
9. Dong, J., F. Wu, R. Huang, and G. Zang. 2007. “A Chromium-Tolerant Plant Growing in the Cr-Contaminated Land.” International Journal of Phytoremediation 9: 167–179.
10. Gonzaga, M.I.S., Santos, A. and L. Ma, L. 2006. “arsenic phytoextraction and hyperaccumulation by fern Species.” Scientia Agricola 63: 90–101.
11. Gosh, M. and Singh, S. 2005. Comparative uptake and pytoextraction study of soil induced chromium by accumulator and high biomass weed species. Applied Ecology and Environmental Research, 3(2) :67-69.

12. James, B.R. Petura, J.C. 1995. Hexavalent Chromium extraction from soils acomparison of 5 methods. Environmetal Science and Technology 29(9) : 2377-2381.
13. Kim, I.S., Kang, P. Jonson-Green, and Lee, E. 2003. “Investigation of Heavy Metal Accumulation in Polygonumthunbergii for Phytoextraction.” Environmental Pollution 126 : 235–243.
14. Lyon, G L, Brooks R. Peterson, P. J., and Butler, G. W. 1969. Some trace elements in plants for Serpentine soils. N. Z. J. Sci. 13: 133–139.
15. Macfarlane, G.R. and M.D. Burchett, 2001. Photosynthetic pigments and peroxidase activity as indicators of heavy metal stress in the grey mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *Marine Pollution Bulletin* 42(3): 233-240.
16. McGrath, S.P. 1982. “The Uptake and Translocation of Tri- and Hexavalent Chromium and Effects on the Growth of Oat in Flowing Nutrient Solution and in Soil.” New Phytologist 92: 381–390.
17. More, T. 1974. Research experiences in plant physiology. Springer-Verlag.
18. Myttenaere, C. and Mousny, J. M. 1974. The distribution of Cr-51 in lowland rice in relation to the chemical form and to the amount of stable Cr in the nutrient solution. Plant Soil. 41: 65–72.
19. Oliveira, H. 2012. Chromium as an Environmental Pollutant: Insights on Induced Plant Toxicity Journal of Botany. 2012: 1–8. doi:10.1155/2012/375843.
20. Peterson, P. J.1975. InProceedings of the International Conference on Heavy Metals in the Environment. Ed. T C Hutchinson. 2, 39. University of Toronto, Canada.
21. Prakash, S., Mishra, S., Singh, S. Srivastava, R. Srivastava, M. Srivastava, S. Dass, and G.P. Satsangi.1995. Studies on Uptake of Trivalent and Hexavalent Chromium by Maize (Zea Mays).Food and Chemical Toxicology 33: 393–397.
22. Pratt, P. F., 1966. Chromium. InDiagnostic Criteria for Plants and Soils. Ed. H D Chapman. Ch. 9: 136–141. University of California, Riverside.
23. Redondo-Gomez, S., E. Mateos-Naranjo, I. Vecino-Bueno, and S.R. Feldman. 2011. “Accumulation and Tolerance Characteristics of Chromium in a Cordgrass Cr Hyperaccumulator, Spartinaargentinensis.” Journal of Hazardous Materials 185: 862–869.
24. Sampanpanish, P.W. Ongsapich, S. Khaodhiar, E. Khan, 2006. Chromium removal from soil by phytoremediation with weed plant species in Thailand, Water Air Soil Poll. 6: 191–206.
25. Shanker, A.K., C. Cervantes, H. Loza-Tavewra, and S. Avudainayagam. 2005. Chromium Toxicity in Plants. Environment International 31: 739–753.
26. Sharma, D.C., C.P. Sharma and R.D. Tripathi, 2003. Phytotoxic lesions of chromium in maize. *Chemosphere* 51(1): 63-68.
27. Shi-rong, T. and X. Lei, (2002), Accumulation of chromium by *Commelinacommunis*L. grown in solution with different concentrations of Cr and L-histidine. *Journalof Zhejiang University Science* 3(2):232-236.
28. Terry, N. and Banuelos, G. 2000. Phytoremediation of Contaminated Soil and Water. Lewis Publishers, New York. 389.
29. USEPA (United States Environmental Protection Agency). 1996. Alkaline Digestion for Hexavalent Chromium. Method 3060A. Washington, DC: USEPA.
30. Vajpayee, P., R.D. Tripathi, U.N. Rai, M.B. Ali and S.N. Singh, (2000), Chromium (VI) accumulation reduces chlorophyll biosynthesis, nitrate reductase activity and protein content in *Nymphaea alba* L. *Chemosphere* 41:1075-1082.
31. Vajpayee, P., S.C. Sharma, R.D. Tripathi, U.N. Rai and M. Yunus, 1999. Bioaccumulation of chromium and toxicity to photosynthetic pigments, nitrate reductase activity and protein content of *Nelumbonucifera*Gaertn. *Chemosphere* 39(12):2159-2169.

32. Xu, P.R. Jaffe, 2006. Effects of plants on the removal of hexavalent chromium inwetland sediments, J. Environ. Qual. 35: 334–341.
33. Zayed, A. Lytle, C. M. Qian, H., and Terry, N. 1998. Chromium accumulation, translocation and chemical speciation in vegetable crops. Planta 206: 293–299.