DOI: 10.22059/IJSWR.2019.275245.668117 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۰، شماره ۱۰، اسفند ۱۳۹۸ (ص ۲۴۶۴-۲۴۵۳)

Investigation of Cadmium Uptake and Transfer Ability of Three Ornamental Plants for Remediation of Cadmium Contaminated Soils

AHMAD GOLCHIN*[1], LEILA MOSALLA[2], AND NADER KHADEM MOGHADAM IGDELOU[2]

1. Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Zanjan, Iran.
2. Horticulture Department, Faculty of Agriculture, Abhar Azad University, Zanjan, Iran.

(Received: Feb. 12, 2019- Revised: July. 11, 2019- Accepted: Aug. 3, 2019)

ABSTRACT

The remediation of heavy metal in contaminated soils using ornamental plants presents a suitable solution for decontamination, especially in urban areas. In order to investigate the ability of ornamental plants to refine contaminated soils, an experiment was conducted in the greenhouse using six levels of soil cadmium (0, 5, 10, 20, 40, and 80 mg/kg), three species of ornamental plants (*Calendula officinalis* L., *Helianthus annuus* L., and *Celosia argentea* L.) and three replications. The results showed with increasing cadmium levels in the soil, cadmium concentration in the plant tissues increases, so that, the highest and the lowest concentrations of cadmium were measured in the shoot of *Calendula officinalis L*. and *Helianthus annuus* L. respectively with a difference of 50.2%. However, the highest and the lowest cadmium concentration in the root were found in the *Helianthus annuus L*. and *Calendula officinalis L*., respectively with a difference level of 4.2%. The cadmium uptake of the shoot in *Calendula officinalis* L. was at least 27.63% more than those in the other species. The chlorophyll index of the leaf and the number of flowers in *Calendula officinalis L*. were respectively 17.33% and 34% more than those in the other species. The translocation factor of *Celosia argentea* L. was equal to one (1.0) and those of *Calendula officinalis* L. and *Helianthus annuus* L. were less than one (0.5 and 0.3), but the bioconcentration factors for all species were found to be more than one. With respect to high cadmium uptake, high cadmium concentration of shoot, high biomass and high beauty indices (chlorophyll index and the number of flowers) of the *Calendula officinalis* L., this species is recommended for remediation of cadmium contaminated soils.

Keywords: ornamental plant, remediation, transfer factor, uptake

* Corresponding author: agolchin2011@yahoo.com

بررسی توان جذب و انتقال کادمیم در سه نوع گیاه زینتی برای پالایش خاک‌های آلوده به کادمیم

احمد گلچین*[۱]، لیلا مصلی[۲]، نادرخادم مقدم ایگده‌لو[۱]

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۲. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابهر، زنجان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۳- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۴/۲۰- تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۵/۱۲)

چکیده

اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین با استفاده از گیاهان زینتی، راهکار مناسبی برای پالایش خاک‌های آلوده به‌ویژه در مناطق شهری است. به‌منظور بررسی توانایی گیاهان زینتی در پالایش خاک‌های آلوده، آزمایشی با شش سطح کادمیم (صفر، ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ mg/kg) و سه گونه گیاه زینتی (همیشه بهار، تاج خروس و آفتابگردان زینتی) با سه تکرار در گلخانه انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش سطوح کادمیم، غلظت آن در گیاهان نیز افزایش می‌یابد، به‌طوری که بیشترین غلظت کادمیم در بخش هوایی همیشه بهار و کمترین آن در بخش هوایی آفتابگردان زینتی به‌دست آمد که اختلافی برابر با ٪۵۰/۲ داشتند. ولی بیشترین غلظت کادمیم در ریشه تاج خروس و کمترین آن در ریشه همیشه بهار مشاهده شد که اختلافی برابر با ٪۴/۲ داشتند. جذب کادمیم در بخش هوایی همیشه بهار حداقل به‌میزان ٪۲۷/۶۳ بیشتر از دو گونه گیاهی دیگر بود. در گیاه همیشه بهار، شاخص کلروفیل و تعداد گل به‌ترتیب نسبت به سایر گیاهان حداقل به‌میزان ٪۱۷/۳ و ٪۳۴ بیشتر بود. فاکتور انتقال گیاه تاج خروس برابر با یک و فاکتور انتقال همیشه بهار (۰/۵) و آفتابگردان زینتی (۰/۳) کمتر از یک گزارش شد ولی فاکتور تجمع‌زیستی برای هر سه گونه گیاهی بیشتر از یک بود. با توجه به مقادیر جذب کادمیم و غلظت بالای آن در بخش هوایی همیشه بهار و شاخص‌های زیبایی (سبزینگی و تعداد گل) و زیست‌توده بالای این گیاه، همیشه بهار برای پالایش خاک‌های آلوده به کادمیم توصیه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: پالایش، جذب، فاکتور انتقال، گیاه زینتی

مقدمه

آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از مشکلات اساسی جهان امروز است. عمده‌ترین منابع رهاسازی فلزات سنگین به خاک مربوط به فعالیت‌های صنعتی از قبیل معدن‌کاوی، ذوب فلزات، صنایع آبکاری، فلزکاری، مصرف سوخت، تخلیه فاضلاب و انهدام زباله، کاربرد آفت‌کش‌ها، کودها و لجن فاضلاب مصرفی در بخش کشاورزی است (Mohamadipour and Asadi Kapourchal, 2012). در چند دهه اخیر، آلودگی خاک با فلزات سنگین به‌علت تخلیه زباله و فاضلاب از منابع انسانی، به‌طور چشم‌گیری رو به افزایش بوده است (Ghosh and Singh, 2005). در ایران نیز گزارش‌هایی مبنی بر آلودگی منابع آب و خاک به کادمیم از استان‌های اصفهان (Khosravi-Dehkordi *et al*., 2016)، تهران (Salmanzadeh *et al*., 2012)، همدان (Arfania and Asadzadeh, 2014)، شیراز (Nowrouzi and Ravanbakhsh, 2017) و به‌ویژه زنجان (Afshari *et al*., 2015) ارائه شده است. گزارش‌ها حاکی از افزایش شدت آلودگی منابع آب و خاک استان زنجان به کادمیم است (Afshari *et al*., 2015). این آلودگی‌ها می‌تواند توازن بین اجزای محیط‌زیست را بر هم‌زده و موجب اثرات مخرب زیست‌محیطی شوند (Jafarnejadi *et al*., 2011).

کادمیم یک عنصر سمی محسوب می‌شود و حضور آن در محیط برای موجودات زنده بسیار خطرناک می‌باشد (Kabata-Pendias and Pendias, 2001). از زمان کشف بیماری "ایتای ایتای" در ژاپن در دهه ۱۹۵۰، اثرات سوء ناشی از کادمیم بر سلامت انسان از طریق مصرف برنج‌های آلوده به کادمیم توجه زیادی را به خود جلب کرده است (Wang and Zhou, 2005). این عنصر برای انسان و گیاه ضروری نیست و بسیار کشنده است (Mengel *et al*., 2001).

برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک وجود دارد. پالایش گیاهی یکی از روش‌های بیولوژیک، ساده، ارزان و دوست‌دار محیط‌زیست بوده که در آن از گیاهان برای زدودن آلودگی از خاک استفاده می‌شود و موفقیت در پالایش گیاهی به شناسایی گونه‌های گیاهی با تولید زیست‌توده بالا که قادر به ذخیره فلزات سنگین هستند، وابسته است (Pulford and Watson, 2003). تاکنون، در حدود

* نویسنده مسئول: agolchin2011@yahoo.com

۴۰۰ رده گیاهان خاکزی، متعلق به ۴۵ خانواده بیش‌اندوز فلزات سنگین مختلف شناخته شده‌اند (Baker and Brooks, 1989; Freitas *et al*., 2004 a,b) و اکثر این گونه‌های گیاهی متعلق به گروه گیاهان خوراکی و مرتعی می‌باشند که شب‌بوها، بقولات، فرفیون، کاسنی و نعنائیان از آن جمله هستند (Álvarez-López *et al*., 2006). بنابراین استفاده از این گیاهان با هدف پالایش خاک‌های آلوده احتمال وارد شدن آلاینده به زنجیره غذایی انسان، حیوانات و تهدید سلامتی بشر را به‌دنبال دارد. به‌همین منظور گیاهان غیرخوراکی به‌خصوص گیاهان زینتی و فضای سبز، گزینه‌های بسیار مناسبی برای این تکنولوژی و یک روش ایمن تصفیه بیولوژیکی می‌باشند (Hinchman *et al*., 1995). اطلاعات کمی در مورد سمیت کادمیم بر گیاهان زینتی وجود دارد (Wang and Zhou, 2005). گیاهان زینتی در مقایسه با دیگر گیاهان خوراکی و داوریی گزینه مناسبی هستند چرا که فواید زیادی از قبیل پاکسازی محیط‌های آلوده به فلزات سنگین، زیباسازی محیط‌زیست، تولید محصولات جانبی و مزایای اقتصادی داشته و وارد زنجیره غذایی انسان نمی‌شوند (Asgari Lajayer *et al*., 2015). خاک‌های مناطق شهری به‌دلیل وجود منابع آلاینده متعددی مثل اتومبیل‌ها و صنایع متخلف آلوده به کادمیم هستند (Nadal *et al*., 2004). در این مناطق با بهبود استانداردهای زندگی، گیاهان زینتی بیشتری در خانه‌ها، کنار جاده‌ها و خیابان‌ها، مغازه‌ها، پارک‌ها و دیگر اماکن پرورش داده می‌شود (Wang and Zhou, 2005) که می‌تواند در امر پالایش خاک‌های آلوده این مناطق مورد استفاده قرار گیرد. در ایران فقط در شهر تهران ۶۳ گونه گیاه زینتی یکساله و چند ساله شناسایی شده که ۱۷ گونه آن از تیره آفتابگردان زینتی (*Compositae*) و پنج گونه آن از تیره تاج خروس (*Amarathaceae*) هستند (Mir Zadeh Vaghefi *et al*., 2008) و گل همیشه بهار نیز به‌مقدار زیادی در ایران کشت می‌شود. این گل در ایران شش گونه علفی یکساله دارد که گونه همیشه بهار شیرازی انحصاری ایران است (Ameri *et al*., 2013). آزمایشی بر روی سه گیاه زینتی همیشه بهار[1]، ختمی[2] و حنا[3] در خاکی با سطوح مختلف آلوده به کادمیم انجام شد و نتایج نشان داد که هر سه گیاه زینتی آزمایش شده، مقاومت زیادی به کادمیم داشتند. همیشه بهار، مقاومت و توانایی زیادی برای انباشتن کادمیم نشان داد اما غلظت کادمیم در ریشه‌ها نسبت به شاخه‌ها بالاتر بود. ختمی نیز مقاومت زیادی به فلزات سنگین سرب و کادمیم نشان داد (Liu *et al*., 2008). Orroño and Lavado (2009) با انجام آزمایشی بر روی شمعدانی معطر[4] تحت تأثیر فلزات سنگین کادمیم، سرب، نیکل، کروم، مس و روی به این نتیجه رسیدند که افزایش غلظت فلزات سنگین در گیاهان متناسب با افزایش غلظت فلز در خاک بود. تجمع فلزات سنگین در ریشه بالاتر از سایر اندام‌ها بود. غلظت کادمیم، نیکل و روی در ریشه در طول زمان افزایش معنی‌داری داشت ولی تجمع فلزات در ساقه و برگ تفاوت معنی‌داری را نشان ندادند. هدف از مطالعه حاضر، بررسی تأثیر فلز سنگین کادمیم بر گل همیشه بهار، آفتابگردان زینتی[5] و تاج خروس[6] و مطالعه توانایی جذب و انتقال کادمیم و هم‌چنین تأثیر این فلز روی حضوصیات مورفوفیزیولوژیکی این گیاهان و امکان استفاده از این گیاهان برای پالایش خاک‌های آلوده به کادمیم بود.

مواد و روش‌ها

به‌منظور انجام این پژوهش، یک نمونه خاک غیرآلوده انتخاب و پس از هوا خشک شدن در هوای آزاد، از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن از قبیل pH و EC در عصاره اشباع، بافت خاک به‌روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، درصد کربن آلی به‌روش والکلی و بلک (Nelson and Sommers, 1982)، درصد کربنات کلسیم معادل (Loeppert and suarez, 1996)، ظرفیت تبادل کاتیونی به‌روش باور (Sumner and Miller, 1996)، نیتروژن کل خاک به‌روش هضم کجلدال (Bremner and Mulvaney, 1996)، جرم مخصوص ظاهری خاک (Blake and Hartge, 1986) و غلظت اولیه کادمیم قابل جذب خاک به‌روش Lindsay and Norvell (1978) و با جذب اتمی (Spectr AA.200) تعیین و در جدول (۱) ارائه شده است. این تحقیق به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو عامل، کادمیم در شش سطح (صفر، ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ mg/kg) و نوع گونه گیاه زینتی در سه سطح (همیشه بهار، آفتابگردان زینتی و تاج خروس) با سه تکرار در سال ۱۳۹۵ در گلخانه انجام شد و ۵۴ عدد گلدان پلاستیکی که گنجایش هر کدام ۵ کیلوگرم خاک بود، جامعه آماری این آزمایش را تشکیل می‌داد. برای آلوده کردن خاک با کادمیم، از منبع نمک سولفات کادمیم ($3CdSO_4.8H_2O$) استفاده گردید. نمک مورد نظر برای آلوده‌سازی به خاک توزین شده هر گلدان اسپری شد و بعد از خشک شدن خاک، گلدان‌ها به رطوبت ظرفیت زراعی رسانده شدند و به‌مدت دو ماه در معرض چرخه‌های تر و خشک شدن

1. *Calendula officinalis*
2. *Althaea rosea*
3. *Impatiens balsamina*
4. *Pelargonium hortorum*
5. *Helianthus annuus*
6. *Celosia argentea*

برای به تعادل رسیدن خاک با آلاینده قرار گرفتند. پس از گذشت دو ماه، نشاءهای گیاهان آفتابگردان زینتی، همیشه بهار و تاج خروس که در مرحله ۴-۳ برگی بودند، کشت شدند. بعد از گذشت حدود سه ماه از کاشت نشاءها و در پایان دوره رشد، علاوه بر شمارش تعداد گل، شاخص کلروفیل برگ توسط دستگاه SPAD (مدل MILOTA-502 JAPAN) سنجیده شد و بعد اقدام به برداشت و جمع‌آوری گیاهان گردید. ریشه‌ها از خاک بیرون آورده شدند و خاک‌های چسبیده به ریشه‌ها، با احتیاط با آب شستشو داده شده و بدین ترتیب ریشه گیاهان به‌دست آمد. قسمت‌های مختلف گیاه بعد از انتقال به آزمایشگاه با آب مقطر شسته شده و در داخل پاکت‌های کاغذی قرار داده شدند و در آون به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند و سپس با آسیاب برقی پودر شدند. یک گرم از نمونه پودر شده توزین و در بالن ژوژه ۵۰ میلی‌لیتری ریخته شده و سپس ۱۵ میلی‌لیتر از مخلوط اسیدها (H_2SO_4، $HClO_4$ و HNO_3 با نسبت ۱:۱:۵) روی نمونه‌ها ریخته شده و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد تا شفاف شدن نمونه‌ها حرارت داده شدند (Allen *et al*., 1986). بعد از سرد شدن، نمونه‌ها با آب مقطر به حجم رسانده شدند و با کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف شدند و بدین صورت غلظت کادمیم گیاه با روش اکسیداسیون تر تعیین و اندازه‌گیری آن با استفاده از جذب اتمی (Spectr AA.200) صورت گرفت.

برای محاسبه فاکتور انتقال (TF) از رابطه (۱) (Marchiol *et al*., 2004)، فاکتور تجمع‌زیستی (BCF) از رابطه (۲) (Lum *et al*., 2014) و جذب کادمیم از رابطه (۳) استفاده گردید (Asgari Lajaier *et al*., 2016).

$$TF = \frac{C_{shoots}}{C_{roots}} \quad (۱)$$

$$BCF = \frac{C_{roots}}{C_{Total\ soil}} \quad (۲)$$

جذب کادمیم = (وزن خشک ریشه یا بخش هوایی) × (غلظت کادمیم ریشه یا بخش هوایی) (۳)

در رابطه (۱ و ۲) C_{shoots}، C_{roots} و $C_{Total\ soil}$ به‌ترتیب نشان دهنده غلظت فلزات سنگین در بخش هوایی، ریشه گیاه و خاک است.

تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۱۷ و مقایسه میانگین‌ها با بهره‌گیری از آزمون چند دامنه‌ای دانکن صورت گرفت. ترسیم نمودارها نیز با کمک نرم افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

غلظت و جذب کادمیم در ریشه و بخش هوایی

نتایج تجزیه فیزیکوشیمیایی خاک مورد آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

ویژگی	مقدار
بافت خاک	لوم رسی شنی
غلظت اولیه کادمیم خاک (mg/kg)	< ۰/۰۱
ظرفیت تبادل کاتیونی ($Cmol_+/kg$)	۱۲
کربن آلی (٪)	۰/۸۳
جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3)	۱/۳۱
pH	۷/۴
کربنات کلسیم (٪)	۶/۷
EC (dS/m)	۱/۰۲
ازت (٪)	۰/۰۸

نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تیمار کادمیم، نوع گیاه و اثر متقابل گیاه در کادمیم بر غلظت کادمیم بخش‌های هوایی و ریشه از نظر آماری معنی‌دار بود ($P \leq ۰/۰۱$) (جدول ۲).

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثرات سطوح مختلف کادمیم بر صفات اندازه‌گیری شده

منابع تغییرات	df	میانگین مربعات							
		جرم خشک بخش هوایی	جرم خشک ریشه	کادمیم اندام‌های هوایی	کادمیم ریشه	کلروفیل	تعداد گل	جذب کادمیم بخش هوایی	جذب کادمیم ریشه
نوع گیاه	۲	۱۲۷/۲۴**	۱/۰۵**	۱۰۴۰۷۲/۶۱**	۱۵۳۲۰۴/۷۶**	۲۴/۹۷**	۲/۱۳*	۰/۱۴۳**	۰/۰۱۳**
کادمیم	۵	۶/۶۲**	۰/۱۷**	۵۱۹۴۰/۱**	۱۵۰۸۵۳/۰۳**	۱۷/۴۷**	۲/۷۲**	۰/۰۴۴**	۰/۰۰۴**
گیاه×کادمیم	۱۰	۱/۶۰**	۰/۰۶**	۲۶۵۳۲/۱۷**	۲۰۲۲۸/۵۴**	۱/۳۷**	۱/۰۹**	۰/۰۱۳**	۰/۰۰۱**
خطا	۳۶	۰/۲۵۶	۰/۰۱	۹۳/۰۳	۴۰۱/۴۶۱	۰/۳۹۶	۰/۲۱۴	۰/۲۴۳	۰/۲۳۱
CV (٪)		۱۹/۰۳	۱۹/۱۱	۱۱/۹۶	۱۵/۶۸	۱۰/۳۵	۲۰/۰۵	۲/۴	۲/۷۶

**و* به‌ترتیب معنی‌داری در سطح یک و پنج درصد را نشان می‌دهد.

بررسی اثر متقابل گیاه در کادمیم نشان داد که بیشترین غلظت کادمیم بخش هوایی در تیمار mg/kg ۸۰ با گیاه همیشه بهار به‌میزان mg/kg ۴۷۴/۸ و کمترین آن در تیمار شاهد گیاهان همیشه بهار، آفتابگردان زینتی و تاج خروس (به‌میزان بسیار اندک و خارج از محدوده دستگاه جذب اتمی با واحد mg/kg) مشاهده گردید (جدول ۳). نتایج اثرات متقابل گیاه در کادمیم نشان داد که سه گونه گیاه زینتی مورد استفاده از لحاظ جرم خشک بخش هوایی و ریشه متفاوت بودند، به‌طوری که ترتیب کاهش جرم خشک بخش هوایی و ریشه به‌صورت زیر بود (جدول ۳):

آفتابگردان زینتی > همیشه بهار > تاج خروس

با افزایش سطوح کادمیم خاک از صفر تا mg/kg ۸۰، جرم خشک بخش‌های هوایی و ریشه آفتابگردان زینتی، همیشه بهار و تاج خروس به‌ترتیب ٪۳۹/۷-٪۳۵/۰، ٪۶۳/۸-٪۶۱/۸ و ٪۹۴/۱-٪۹۶/۲ کاهش یافتند. بیشترین کاهش جرم خشک بخش هوایی و ریشه در گیاه تاج خروس دیده شد. خصوصیات تحمل، فاکتور غنی‌سازی و تولید زیست‌توده بالا، سه فاکتور کلیدی در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به‌شمار می‌رود (Antonkiewicz and Para, 2016). هم‌چنین بررسی اثر متقابل سطوح مختلف کادمیم و نوع گونه گیاهی مشخص کرد که با افزایش سطوح کادمیم خاک از صفر تا mg/kg ۸۰، جرم خشک بخش هوایی و ریشه، کلروفیل و تعداد گل کاهش یافت، ولی غلظت کادمیم ریشه افزایش یافت (جدول ۳). Shanying *et al.* (2017) گزارش کردند که طول ریشه گیاهان علفی چند ساله و نخود تحت تأثیر کادمیم قرار می‌گیرد، ولی کادمیم بر زیست‌توده ریشه آن‌ها چندان تأثیری ندارد. آنان هم‌چنین بیان کردند که فتوسنتز و کلروفیل به‌شدت تحت تأثیر کادمیم قرار گرفته و کاهش می‌یابد.

جدول ۳. مقایسه میانگین اثرات متقابل سطوح مختلف کادمیم و نوع گونه گیاهی بر صفات اندازه‌گیری شده

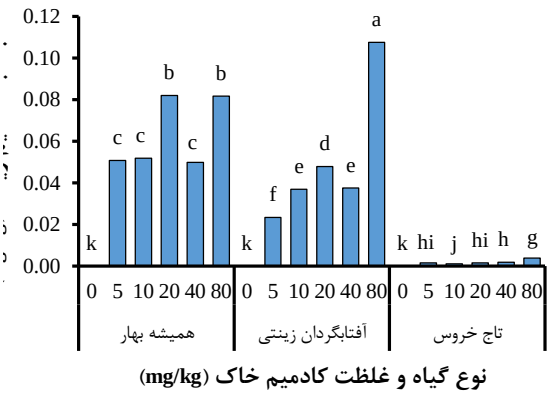
تیمار		جرم خشک بخش هوایی (g)	کادمیم بخش هوایی (mg/kg)	جرم خشک ریشه (g)	کادمیم ریشه (mg/kg)	کلروفیل	تعداد گل (عدد)
گیاه	کادمیم						
همیشه بهار	۰	۲/۱۹^{c}	۰/۰۰^{h}	۰/۳۴^{efg}	۰/۰۰^{i}	۹/۲۱^{a}	۴/۲۱^{a}
	۵	۲/۲۳^{c}	۵۵/۵۴^{ef}	۰/۵۵^{bcde}	۹۲/۴۵^{efg}	۷/۶۲^{b}	۲/۷۸^{b}
	۱۰	۲/۵۱^{c}	۶۹/۳۱^{de}	۰/۳۹^{def}	۱۳۲/۸^{e}	۷/۱۱^{bcd}	۲/۴۴^{bc}
	۲۰	۱/۹۹^{cd}	۹۷^{c}	۰/۳۵^{efg}	۲۳۴/۲^{cd}	۷/۴۲^{bc}	۱/۸۹^{bcd}
	۴۰	۰/۹^{de}	۳۰۵/۴^{b}	۰/۱۶^{fgh}	۳۱۱/۳^{b}	۶/۹۳^{bcde}	۱/۱۱^{d}
	۸۰	۰/۸^{e}	۴۷۴/۸^{a}	۰/۱۳^{gh}	۶۲۷/۸^{a}	۶/۱۹^{bcdef}	۱/۲۲^{d}
آفتابگردان زینتی	۰	۶/۰۵^{a}	۰/۰۰^{h}	۰/۶^{abcd}	۰/۰۰^{i}	۷/۱۰^{bcd}	۲/۱۷^{bcd}
	۵	۷/۰۹^{a}	۸/۴۸^{h}	۰/۸۱^{a}	۲۸/۹۶^{hi}	۷/۱۵^{bcd}	۲/۲۷^{bcd}
	۱۰	۷/۱۲^{a}	۱۵/۱۸^{gh}	۰/۷۹^{ab}	۴۶/۷۵^{ghi}	۵/۵۳^{efg}	۲/۴۴^{bc}
	۲۰	۵/۹۵^{a}	۲۰/۱۰^{gh}	۰/۶۸^{abc}	۷۰/۴۳^{fgh}	۵/۹۹^{cdef}	۲/۲۲^{bcd}
	۴۰	۴/۰۶^{b}	۳۵/۵۵^{fg}	۰/۳۴^{efg}	۱۱۰/۴^{ef}	۴/۴۶^{gh}	۲/۴۴^{bc}
	۸۰	۳/۶۵^{b}	۶۴/۲۴^{de}	۰/۳۹^{def}	۲۷۵/۷^{bc}	۳/۷۸^{hi}	۱/۲۲^{d}
تاج خروس	۰	۲/۰۲^{cd}	۰/۰۰^{h}	۰/۵۲^{cde}	۰/۰۰^{i}	۷/۱۷^{bcd}	۲/۱۱^{bcd}
	۵	۰/۴۸^{e}	۴۹/۶۱^{ef}	۰/۰۷^{h}	۲۲/۲۵^{hi}	۷/۳۷^{bc}	۱/۸۳^{bcd}
	۱۰	۰/۵^{e}	۵۲/۰۷^{ef}	۰/۰۳^{h}	۳۷/۱۷^{hi}	۵/۶۴^{defg}	۱/۶۶^{bcd}
	۲۰	۰/۱۵^{e}	۵۸/۳۷^{def}	۰/۰۳^{h}	۵۱/۹۳^{gh}	۴/۷۹^{fgh}	۱/۴^{cd}
	۴۰	۰/۱۳^{e}	۶۴/۸۷^{de}	۰/۰۳^{h}	۶۲/۳^{gh}	۳/۶۴^{hi}	۱/۳۷^{cd}
	۸۰	۰/۱۲^{e}	۸۰/۱۷^{cd}	۰/۰۲^{h}	۱۹۴/۹^{d}	۲/۴۰^{i}	۱/۳۳^{cd}

حروف مشترک در هر ستون نشان دهنده عدم معنی‌داری در سطح پنج درصد است.

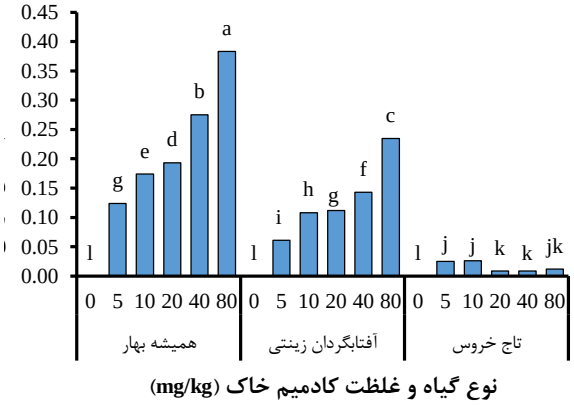
بیشترین غلظت کادمیم ریشه در تیمار mg/kg ۸۰ با گیاه همیشه بهار (به‌میزان mg/kg ۶۲۷/۸) و کمترین آن در تیمار شاهد گیاهان همیشه بهار، آفتابگردان زینتی و تاج خروس (به‌میزان بسیار اندک و خارج از محدوده دستگاه جذب اتمی با واحد mg/kg) به‌دست آمد. با افزایش سطوح کادمیم خاک از ۵ به mg/kg ۸۰، غلظت کادمیم موجود در ریشه گیاهان همیشه بهار، تاج خروس و آفتابگردان زینتی به‌ترتیب به‌میزان ٪۸۵/۳، ٪۸۹/۵ و ٪۸۸/۶ افزایش نشان داد که بیشترین افزایش غلظت

کادمیم در ریشه با افزایش سطوح کادمیم خاک، در ریشه تاج خروس و کمترین آن در ریشه همیشه بهار دیده شد (جدول ۳).

تغییرات پارامتر جذب (رابطه ۳) در شکل‌های (۱ و ۲) ارائه شده است. بیشترین جذب کادمیم در ریشه گیاه آفتابگردان زینتی مشاهده شد و در مرحله بعدی گیاهان همیشه بهار و تاج خروس قرار داشتند. علت این‌که در ریشه آفتابگردان زینتی بیشترین جذب رخ داده این است که این گیاه دارای بیشترین جرم زیست‌توده بود (جذب برابر با حاصلضرب جرم زیست‌توده در غلظت کادمیم است) (شکل ۱). جذب کادمیم در بخش‌های هوایی گیاه همیشه بهار و در تیمار ۸۰ mg/kg کادمیم بیشتر از دو گونه دیگر بود. این گیاه بیشترین اختلاف را با گیاه تاج خروس (به‌میزان ٪۹۷/۸۹) و کمترین اختلاف در جذب کادمیم را با تیمار ۴۰ mg/kg خود داشت (٪۲۷/۶۳) (شکل ۲). بررسی پارامتر جذب کادمیم در ریشه و بخش هوایی همیشه بهار نشان داد وقتی که سطوح کادمیم خاک از ۲۰ به ۴۰ mg/kg افزایش یافت، جذب کادمیم در ریشه ٪۳۹/۲ کاهش و برعکس در بخش هوایی به‌میزان ٪۲۹/۳ افزایش یافت. دلیل این نوسان با بررسی فاکتور انتقال (TF) آشکار شد، چرا که با افزایش سطوح کادمیم خاک از ۲۰ به ۴۰ mg/kg، TF به‌میزان ٪۵۸/۲ افزایش یافت و این خود به مفهوم جابجایی کادمیم از ریشه به بخش هوایی است که می‌تواند دلیلی بر جهش غلظت کادمیم بخش هوایی همیشه بهار از ۹۷ به ۳۰۵/۴ mg/kg در این سطوح از کادمیم خاک باشد (جدول ۳). بیشتر یون‌های موجود در محیط با ریشه‌ها در ارتباط هستند و اولین محل جذب، ریشه‌ها می‌باشند. مقداری از یون‌ها به دیواره‌های سلولی ریشه جذب می‌شوند و نمی‌توانند به ساقه منتقل شوند. یون‌ها ممکن است با ترکیبات مختلفی پیوند یافته و درون ساختارهای سلولی مانند واکوئل‌ها به دام بیفتند، بنابراین انتقال به ساقه کاهش می‌یابد (Lasat et al., 1998). علاوه بر این مکانیسم‌های تخصصی دیگری نیز برای محدود کردن انتقال فلز وجود دارد، لذا مقدار جذب یون در درون ریشه‌ها زیاد می‌باشد اما امکان انتقال آن به ساقه محدود است. در این تحقیق نیز میزان تجمع یون‌های کادمیم در ریشه‌های هر سه گیاه بیشتر از اندام‌های هوایی آن‌ها بود. با وجود محدودیت انتقال فلز به اندام هوایی، برای گیاه‌پالایی لازم است که فلز مورد نظر از ریشه به بخش هوایی منتقل شود (Lasat, 2000). پاسخ گیاهان به تنش فلزات سنگین متفاوت است. برخی از گیاهان با وجود غلظت زیاد فلزات سنگین در خاک، مانع از جذب این فلزات می‌شوند (گیاهان اجتناب‌کننده)، برخی دیگر از گیاهان به‌وسیله عوامل کلاته‌کننده، فلزات را در بخش‌هایی از گیاهان که حساس نیستند، انباشته می‌کنند (گیاهان شاخص) و برخی دیگر از گیاهان، مقدار زیادی از فلزات را در بخش هوایی خود تجمع می‌دهند به‌طوری که حتی غلظت این فلزات در بخش هوایی بیش از غلظت آن در خاک است (گیاهان بیش‌اندوز) (Shah *et al*., 2010). Lal *et al*. (2008) در پژوهشی گزارش کردند که گیاهان زینتی گلایول، داودی و همیشه بهار توانایی رشد در خاک‌های آلوده به کادمیم را دارند و با افزایش مقدار کادمیم در خاک، غلظت این فلز در بخش هوایی گیاهان افزایش یافت. آنان بیان کردند که گلایول با بیشترین تحمل رشد و بالاترین جذب کادمیم، توانایی پاکسازی خاک‌های نیمه‌آلوده را دارند. Lai and Chen (2006) گزارش کردند که گل رنگین کمان صورتی توانایی تجمع کادمیم، روی و سرب در اندام هوایی خود را دارد.



شکل ۱. تأثیر نوع گیاه و غلظت کادمیم خاک، بر جذب کادمیم ریشه در هرستون حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.



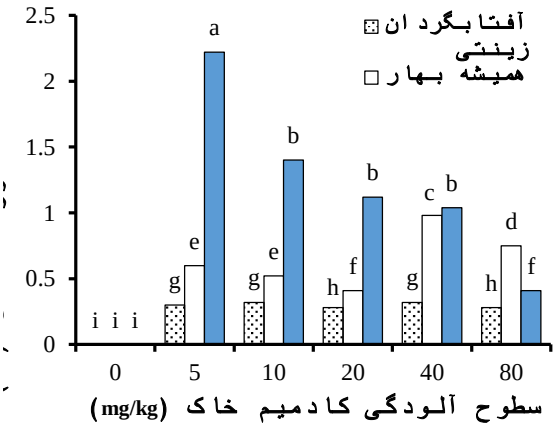
شکل ۲. تأثیر نوع گیاه و غلظت کادمیم خاک، بر جذب کادمیم بخش هوایی در هرستون حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

Zhuang *et al.* (2007) طی تحقیقی میزان جذب کادمیم، روی و سرب را در هشت گونه گیاهی شامل بنفشه، دو رقم از ترشک باغی، ترشک مواج، ترشک، میخک چینی، ناز و *Vetiveria zizanioide* مورد ارزیابی قرار داده و عنوان کردند که در بین این گیاهان بیشترین غلظت کادمیم در بنفشه با میزان ۲۸ mg/kg، بیشترین غلظت روی در ترشک مواج با ۱۳۴۰ mg/kg و بیشترین غلظت سرب در میخک چینی با ۱۴۶ mg/kg مشاهده گردید و بیشترین کارایی گیاه جذبی نیز در مورد کادمیم در بنفشه با ۰/۹، در مورد فلز روی در گیاه ناز با ۱/۸ و در مورد فلز سرب در ترشک مواج با نسبت گیاه جذبی ۰/۲ گزارش گردید.

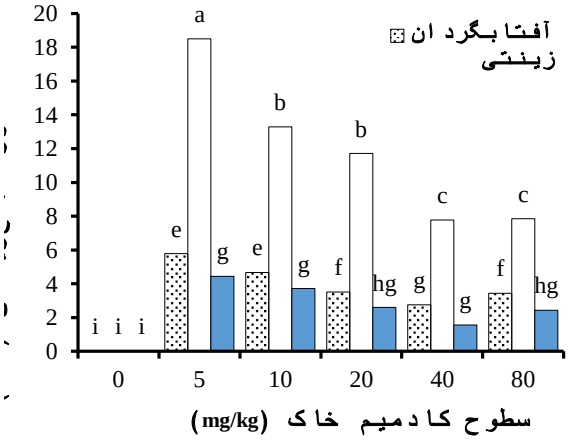
غلظت کادمیم تنها ملاک تعیین گونه مورد نظر برای گیاه‌پالایی نیست، چرا که برای موفقیت در گیاه‌پالایی، زیست‌توده تولید شده توسط آن گونه نیز مهم است (Pulford and Watson, 2003). وقتی جذب کادمیم در بخش هوایی محاسبه گردید، مشخص شد که جذب کادمیم در اندام هوایی همیشه بهار نسبت به تاج خروس و آفتابگردان زینتی بیشتر است. نتایج تحقیقات نشان داده‌اند که افزایش آلودگی کادمیم و روی باعث کاهش جرم خشک گل‌های گلایول و لایه نسبت به شاهد گردید ولی بر جرم خشک نرگس تأثیر نداشت و با افزایش آلودگی، جذب کادمیم و روی توسط تمام گل‌ها افزایش یافت (Rahimi and. Dodonge, 2013).

فاکتور انتقال (TF) و فاکتور تجمع زیستی (BCF)

بررسی‌ها نشان داد که بیشترین غلظت کادمیم در اندام هوایی و ریشه در گیاه همیشه بهار و در تیمار ۸۰ mg/kg مشاهده گردید، اما بیشترین TF در گیاه تاج خروس و با غلظت کادمیم mg/kg ۵ دیده شد (شکل ۳). علاوه بر این، بیشترین و کمترین BCF در گیاه همیشه بهار (۹/۸) و تاج خروس (۲/۵) گزارش شد که اختلافی برابر با ٪۷۵ داشتند. مطابق با شکل (۳) TF تاج خروس در غلظت‌های پایین کادمیم خاک خیلی بیشتر از همیشه بهار است، ولی با افزایش غلظت کادمیم خاک، TF تاج خروس کمتر شده به‌طوری که در غلظت ۸۰mg/kg کادمیم خاک، TF همیشه بهار به‌میزان ٪۴۵/۳ با اختلاف معنی‌داری بیشتر از تاج خروس به‌دست آمد.



شکل ۳. بررسی TF در سه گونه گیاهی
در هرستون حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.



شکل ۴. بررسی BCF در سه گونه گیاهی
در هرستون حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

در غلظت‌های پایین کادمیم خاک، جذب کادمیم تقریباً به‌صورت خطی اتفاق می‌افتد (Palm, 1994)، یعنی با افزایش غلظت کادمیم خاک، غلظت آن در گیاه نیز بیشتر می‌شود ولی در گیاهانی مثل تاج خروس، مکانیسم دفاع گیاهی در برابر سمیت کادمیم تا سطح خاصی از کادمیم از گیاه خوب محافظت می‌کند (مکانیسم‌های دفاعی شامل تجمع در واکوئل‌ها، تثبیت فلزات به‌وسیله پروتئین‌های خاص و در نهایت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی است) و در غلظت‌های بیشتر از سطح مذکور، مسمومیت کادمیم ایجاد شده و فتوسنتز مختل شده و غشای سلولی گیاهان آسیب می‌بینند (Küpper and Leitenmaier, 2013). از این‌رو، جذب کادمیم و حتی عناصر غذایی به‌شدت کاهش می‌یابد. Zhu *et al.* (2018) در بررسی BCF و TF در گیاه *Ageratum conyzoides L.* گزارش کردند که با افزایش سطح کادمیم، غلظت کادمیم در بخش‌های هوایی این گیاه افزایش می‌یابد، ولی از یک غلظتی (۱۲ mg/kg) به بعد، مقدار کادمیم در بخش‌های هوایی کاهش می‌یابد. غلظت فلزات در اندام‌های هوایی

شاخص خوبی برای زیست‌فراهمی فلزات نیست و برای فهم این مطلب بهتر است از رابطه بین فلزات در ریشه و ذخیره موجود در توده خاک استفاده شود (Fang *et al*., 2007). با توجه به شکل‌های (۳ و ۴) و مقایسه TF و BCF در هر سه رقم مورد مطالعه مشخص گردید که گیاه تاج خروس دارای TF برابر با یک (۱/۰)، ولی گیاهان همیشه بهار (۰/۵) و آفتابگردان زینتی (۰/۳) TF کمتر از یک داشتند. با این حال BCF در هر سه نوع گونه گیاهی بیشتر از یک بود. گیاهان بیش‌اندوز کادمیم باید دارای میزان رشد و تولید زیست‌توده بالا باشند چرا که این دو عامل، تعیین‌کننده استفاده از گیاهان در امر اصلاح خاک‌های آلوده است (Mahar *et al*., 2016). Amouei *et al*. (2012) در بررسی گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به سرب و کادمیم توسط سه نوع گونه گیاهی گاو پنبه، تاج خروس وحشی و ذرت به این نتیجه رسیدند که گیاهان ذرت و تاج خروس وحشی، با توجه به‌میزان جذب و تجمع سرب و کادمیم و هم‌چنین زیست‌توده تولیدی آن‌ها گزینه‌های مناسبی برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به سرب و کادمیم می‌باشند. بر اساس اعلام Yanqun *et al*. (2004)، بیش‌اندوز کادمیم به گیاهی اطلاق می‌شود که بتواند بیش از ۱۰۰ mg/kg کادمیم را در اندام هوایی خود تجمع دهد. بر این اساس و بر طبق جدول (۳) می‌توان همیشه بهار را یک گیاه بیش‌اندوز کادمیم گزارش نمود (تیمار ۸۰ mg/kg کادمیم). Liu *et al*. (2008) با بررسی رشد سه گیاه زینتی (همیشه بهار، ختمی و گل حنا) در واکنش به کادمیم و سرب-کادمیم و ویژگی انباشتگی فلز در آنها گزارش کردند که با وجود رشد بهتر همیشه بهار در خاک‌های دارای ۱۰۰ mg/kg کادمیم و غلظت بالای کادمیم در ریشه‌ها نسبت به شاخه‌ها، نمی‌توان آن را جزء بیش‌اندوزهای کادمیم به‌حساب آورد، اما این گیاه پتانسیل زیادی برای پالایش گیاهی خاک‌های آلوده به کادمیم دارد. ختمی هم نه‌تنها در انباشتن کادمیم و سرب عملکرد بهتری داشته، بلکه در انتقال کادمیم از ریشه‌ها به شاخه، در غلظت‌های Cd < mg/kg ۱۰۰ نیز موثر بود. پژوهشگران با کشت گیاه *Thlaspi praecox Wulf* در خاک آلوده به روی، سرب و کادمیم گزارش نمودند که غلظت کادمیم و روی در اندام هوایی این گیاه به‌ترتیب ۷۵ و ۲۰ برابر مقادیر کل این عناصر در خاک بود. غلظت روی، سرب و کادمیم در اندام هوایی این گیاه به‌ترتیب ۱۴۵۹۰، ۵۹۶۰ و ۳۵۰۰ mg/kg گزارش گردید. فاکتور انتقال برای عنصر روی ۹/۶ و برای کادمیم ۵/۶ به‌دست آمد که نشان دهنده توانایی گیاه در انتقال فلزات فوق از ریشه به اندام‌های هوایی بود (Vogel-Mikul *et al*., 2005).

شاخص کلروفیل

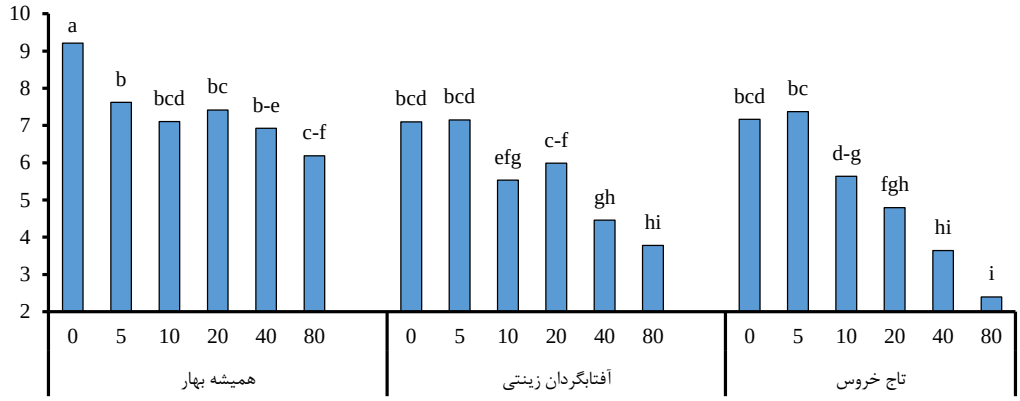
در هر سه نوع گیاه زینتی مورد استفاده، با افزایش غلظت کادمیم خاک، شاخص کلروفیل کاهش یافت. بیشترین شاخص کلروفیل برگ در تیمار شاهد گیاه همیشه بهار و کمترین آن در تیمار ۸۰ mg/kg تاج خروس مشاهده شد که اختلاف بین بیشترین و کمترین شاخص کلروفیل برگ برابر با ٪۷۳/۹ بود (شکل ۵). حداقل اختلاف شاخص کلروفیل گیاه همیشه بهار نسبت به سایر تیمارها ٪۱۷/۳ بود. میانگین شاخص کلروفیل در سه نوع گونه گیاهی به‌صورت زیر است:

همیشه بهار (۷/۴۱) > آفتابگردان زینتی (۵/۶۷) > تاج خروس (۵/۱۷)

کاهش ذخیره کلروفیل در برگ‌ها به‌علت مهار مراحل مختلف بیوسنتز کلروفیل است. مهار بیوسنتز کلروفیل احتمالاً به‌وسیله مهار سنتز دلتا آمینولوولینیک اسید[1] و مهار تشکیل پروتوکلروفیلید رداکتاز[2] می‌باشد. هم‌چنین جایگزین شدن یون منیزیم مرکزی کلروفیل به‌وسیله کادمیم صدمه دیگری است که باعث جلوگیری از به دام انداختن نور فتوسنتزی و در نتیجه از بین رفتن کلروفیل و کاهش فعالیت فتوسنتز می‌شود (Prasad and Strzałka, 1999). کاهش محتوای کلروفیل می‌تواند دلیلی بر کاهش تثبیت کربن و به‌تبع آن کاهش زیست‌توده تولیدی توسط گیاهان و به‌ویژه تاج خروس باشد (جدول ۳). از دیگر دلایل کاهش شاخص کلروفیل با افزایش سطوح کادمیم خاک می‌تواند برهمکنش منفی بین کادمیم و عناصری مثل آهن باشد. در خاک از بارزترین اثرات کادمیم بر گیاهان می‌توان به کلروز برگی و توقف رشد گیاهان اشاره کرد، کلروز برگی به‌دلیل برهمکنش کادمیم با آهن و در نتیجه کمبود آهن ایجاد می‌شود (Nagajyoti et al., 2010). جلوگیری از فعالیت آنزیم Fe(III) رداکتاز در ریشه توسط کادمیم منجر به کمبود Fe(II) شده و همین امر به‌شدت فتوسنتز را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Hasan *et al*., 2009). Ebrahimi *et al*.(2017) در بررسی خاصیت گیاه‌پالایی تاجریزی در محیط‌های آلوده به کادمیم عنوان کردند که کادمیم جرم خشک، سطح برگ و میزان کلروفیل را کاهش و طول ریشه، طول بخش‌های هوایی و میزان جذب کادمیم توسط گیاه را افزایش داد. Abdollahi and Golchin (2018) با بررسی اثر سطوح مختلف کادمیم در سه رقم کلم برگ، بروکلی و کلم‌زینتی عنوان کردند که کادمیم تأثیر معنی‌داری بر عملکرد تر و خشک، جرم خشک ریشه، ساقه و برگ، سطح برگ و شاخص کلروفیل برگ هر سه رقم کلم داشت.

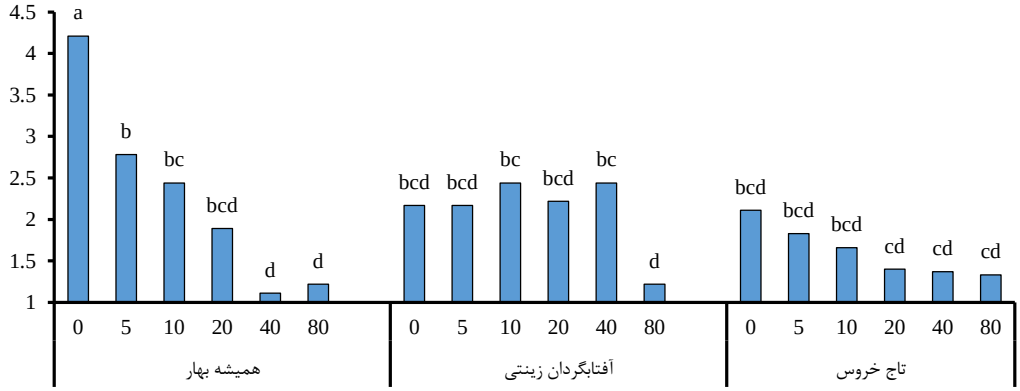
1. Delta aminolevulinic acid

2. Protochlorophyllide reductase



اثر متقابل نوع گیاه × غلظت کادمیم خاک

شکل ۵. تأثیر اثرات متقابل نوع گیاه و غلظت کادمیم خاک بر شاخص کلروفیل برگ
در هرستون حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.



اثر متقابل نوع گیاه × غلظت کادمیم خاک (mg/kg)

شکل ۶. تأثیر اثرات متقابل نوع گیاه و غلظت کادمیم خاک بر تعداد گل
در هرستون حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

تعداد گل در بوته

نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم، تعداد گل نیز کاهش یافت. به‌طوری که بیشترین اختلاف معنی‌دار (۷۳/۶٪) بین تیمارهای ۴۰ mg/kg و شاهد گل همیشه بهار مشاهده شد (شکل ۶). حداقل اختلاف تعداد گل در گیاه همیشه بهار نسبت به سایر تیمارها به‌میزان ۳۴٪ بود. نتایج مشابهی توسط Mohammadi *et al*. (2013) گزارش شد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی بر آن بود که کارایی سه گونه گیاه زینتی همیشه بهار، آفتابگردان زینتی و تاج خروس در پالایش خاک‌های آلوده به کادمیم مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج مطالعه حاکی از آن است که متناسب با افزایش غلظت کادمیم در خاک، غلظت این عنصر در ریشه و اندام هوایی این سه گونه مورد بررسی نیز افزایش یافت به‌طوری که بین بیشترین (همیشه بهار) و کمترین (آفتابگردان زینتی) غلظت کادمیم در اندام هوایی اختلاف معنی‌داری برابر با ۵۰/۲٪ وجود داشت. در ریشه هم با افزایش سطوح کادمیم خاک، بیشترین و کمترین غلظت کادمیم در گیاهان تاج خروس و همیشه بهار گزارش شد که اختلاف بین آنها ۴/۲٪ بود. اما جذب کادمیم در بخش هوایی همیشه بهار بیشتر از دو رقم دیگر بود. به‌طوری که این گیاه در بخش هوایی خود حداقل به میزان ۲۷/۶۳٪ بیشتر از سایر تیمارها جذب کادمیم داشت. بررسی پارامترهایی نظیر شاخص کلروفیل و تعداد گل آشکار کرد که گیاه همیشه بهار از لحاظ شاخص کلروفیل و تعداد

گل به‌ترتیب نسبت به سایر گیاهان حداقل به‌میزان ٪۱۷/۳ و ٪۳۴ برتری داشت. با بررسی TF این سه گونه در می‌یابیم که گیاه تاج خروس بیشترین TF را داشته ولی این توانایی با افزایش غلظت کادمیم خاک کاهش می‌یابد ولی گیاه همیشه بهار در غلظت‌های پایین کادمیم خاک، TF کمی داشته به‌طوری که با افزایش غلظت کادمیم خاک، TF این گیاه نیز افزایش می‌یابد و گیاه آفتابگردان زینتی نیز دارای کمترین TF بود. هر سه گونه گیاهی دارای BCF بیشتر از یک بودند. برای گیاه‌پالایی در مناطق شهری باید از گیاهانی استفاده کرد که علاوه بر داشتن شاخص‌های زیبایی (میزان سبزینگی و تعداد گل)، به لحاظ تولید زیست‌توده و جذب کادمیم نیز کارا باشند، لذا برای پالایش آلودگی کادمیم با گیاه‌پالایی، گل همیشه بهار نسبت به تاج خروس و آفتابگردان زینتی گزینه بهتری است.

REFERENCES

Abdollahi, S. and Golchin, A. (2018). Biomass Production and Cadmium Accumulation and Translocation in Three Varieties of Cabbage. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(2), 243-259. (In Farsi)

Afshari, A., Khademi, H. and Delavar, M. A. (2015). Heavy metals contamination assessment in soils of different land uses in central district of Zanjan province using contamination factor. *Water and Soil Science*, 25(2), 41-52. (In Farsi)

Allen, S. E., Grimshaw, H. M. and Rowland, A. P. (1986). Chemical Analysis. In: "Methods in Plant Ecology", (Eds.): Moore, P. D. and Chapman, S. B. Blackwell Scientific Publication, Oxford, London, PP. 285-344.

Álvarez-López, A., Prieto-Fernández, Á., Cabello-Conejo, M. I. and Kidd, P. S. (2016). Organic amendments for improving biomass production and metal yield of Ni-hyperaccumulating plants. *Science of the Total Environment*, 548, 370–379.

Ameri, A. A., Rabbani nasab, H., Jalilvand, M. and Imani, M. (2013). Survey on phenological stages, effect of nitrogen fertilizer levels and plant density and stage of flower harvest on flower production, active ingredients of Marigold (*Calendula officinalis*). *Jouranl of North Khorasan University Medical Sciences*, 4(5), 57-66. (In Farsi)

Amouei, A., Mahvi, A. H., Naddafi, K., Fahimi, H., Mesdaghinia, A. and Naseri, S. (2012). Optimum operating conditions in the phytoremediation of contaminated soils with Lead and Cadmium by native plants of Iran. *Scientific Journal of Kurdistan University of Medical Sciences*, 17(4), 93-102. (In Farsi)

Antonkiewicz, J. and Para, A. (2016). The use of dialdehyde starch derivatives in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. *International Journal of Phytoremediation*, 18(3), 245-250.

Arfania, H. and Asadzadeh, F. (2014). Heavy metals bio-availablity (Zn, Cd, Ni, Cu, and Pb) in sediments of Abshineh River. *Journal of Soil Management and Sustainable*, 5(4), 133-146. (In Farsi)

Asgari Lajaier, H., Savaghebi Firoozabadi, G., Motesharezadeh, B. and Hadian, J. (2015). Evaluation of trends in mineral nutrition uptake in balangu (lallemantia iberica) under different copper and zinc application rates. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46(54), 791-799. (In Farsi)

Baker, A.J.M. and Brooks, R.R. (1989). Plant regeneration of the mining ecotype Sedum alfredii and cadmium hyperaccumulation in regenerated plants. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 99, 9-16.

Blake, G. R. and Hartge, K. H. (1986). Bulk Density. Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods, (methodsofsoilan1), 363-375.

Bremner, J. M. and Mulvaney, C. S. (1996). Nitrogen total. In: Page, A. L., Miller, R. H. and Keeney, D. R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2. SSSA, Inc. ASA, Inc. Madison, WI*, pp. 1085-1122.

Ebrahimi, F., Baghizadeh, A. and Pourseyedi, S. (2017). Phytoremediation potential of black nightshade in cadmium contaminated soils in hydroponic system. *Agroecology Journal*, 13(1), 1-8. (In Farsi)

Fang, J., Wen, B., Shan, X. Q., Lin, J. M. and Owens, G. (2007). Is an adjusted rhizosphere-based method valid for field assessment of metal phytoavailability? Application to non-contaminated soils. *Environmental Pollution*, 150(2), 209-217.

Freitas, H., Prasad, M. N. V. and Pratas, J. (2004 a). Plant community tolerant to trace elements growing on the degraded soils of São Domingos mine in the south east of Portugal: environmental implications. *Environment International*, 30, 65-72.

Freitas, H., Prasad, M. N. V. and Pratas, J. (2004 b). Analysis of serpentinophytes from north-east of Portugal for trace metal accumulation – relevance to the management of mine environment. *Chemosphere*, 54, 1625-1642.

Gee, G. W. and Bauder, J. W. (1986). Physical and mineralogical methods. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of soil analysis, Part 1. Soil Science Society of America, Madison,WI, USA*, pp. 383-411.

Ghosh, M. and Singh, S. P. (2005). Strategies for enhancing the phytoremediation of cadmiumcontaminated agricultural soils by *Solanum nigrum* L. *Environmental Pollution*, 159, 762-768.

Hasan, S. A., Fariduddin, Q., Ali, B., Hayat, S. and Ahmad, A. (2009). Cadmium: toxicity and

tolerance in plants. *Journal of Environmental Biology*, 30(2), 165-174.

Hinchman, R. R., Negri, M. C. and Gatliff, E. G. (1995). Phytoremediation: using green plants to clean up contaminated soil, groundwater, and wastewater. *Argonne National Laboratory Hinchman, Applied Natural Sciences*, Inc, 1995.

Jafarnejadi, A. R., Homaee, M., Sayyad, G. h. A. and Bybordi, M. (2011). Large Scale Spatial Variability of Accumulated Cadmium in the Wheat Farm Grains. *Soil and Sediment Contamination*, 20(1), 98-113.

Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. (2001). Trace Elements in Soils and Plants. Florida: Boca Raton.

Khosravi-Dehkordi, A., Afyuni, M. and Soffianian, A. (2016). Spatial Distribution of Total Cadmium and Total Plumb in Surface Soils of the Southwest Isfahan. *Journal of Water and Soil Science*, 20(77), 101-110. (In Farsi)

Küpper, H. and Leitenmaier, B. (2013). Cadmium-accumulating plants. In: *Cadmium: from toxicity to essentiality* (pp. 373-393). Springer, Dordrecht.

Lai, H. Y. and Chen, Z. S. (2006). The influence of EDTA application on the interactions of cadmium, zinc, and lead and their uptake of rainbow pink (*Dianthus chinensis*). *Journal of Hazardous Materials*, 137(3), 1710-1718.

Lajayer, B. A., Khadem Moghadam, N., Maghsoodi, M. R., Ghorbanpour, M. and Kariman, K. (2019). Phytoextraction of heavy metals from contaminated soil, water and atmosphere using ornamental plants: mechanisms and efficiency improvement strategies. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-17.

Lal, K., Minhas, P. S., Chaturvedi, R. K. and Yadav, R. K. (2008). Extraction of cadmium and tolerance of three annual cut flowers on Cd-contaminated soils. *Bioresource Technology*, 99(5), 1006-1011.

Lasat, M. M. (2000). The Use of Plants for the Removal of Toxic Metals from Contaminated Soil. U.S. American Association for the Advancement of Science, Environmental Science and Engineering Fellow.

Lasat, M. M., Baker, A. J. M. and Kochian, L. V. (1998). Altered Zn compartmentation in the root symplasm and stimulated Zn absorption into the leaf as mechanisms involved in Zn hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens*. *Plant Physiology*, 118, 875-883.

Lindsay, W. L. and Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421-428.

Liu, J. N., Zhou, Q. X., Sun, T. Q., Ma, L. and Wang, S. (2008). Growth responses of three ornamental plants to Cd and Cd-Pb stress and their metal accumulation characteristics. *Journal of Hazardous Materials*, 151, 261–267.

Loeppert, R. H. and suarez, D. L. (1996). Carbonate and gypsum, in: 'Sparks, D. L., Page, A. L., Sumner, M.E., Tabatabai, M. A. and Helmke, P. A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part3-Chemical Methods. *Soil Science Society of America Inc., Madison, WI, USA*. (pp. 437-474).

Lum, A. F., Ngwa, E. S. A., Chikoye, D. and Suh, C. E. (2014). Phytoremediation potential of weeds in heavy metal contaminated soils of the Bassa Industrial Zone of Douala, Cameroon. *International Journal of Phytoremediation*, 16(3), 302-319.

Mahar, A., Wang, P., Ali, A., Awasthi, M. K., Lahori, A. H., Wang, Q., Li, R. and Zhang, Z. (2016). Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 126, 111-121.

Marchiol, L., Assolari, S., Sacco, P. and Zerbi, G. (2004). Phytoextraction of heavy metals by canola (Brassica napus) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil. *Environmental Pollution*, 132(1), 21-27.

Mengel, K., Kirkby, E. A. and Kosegarten, H. (2001). *Principles of plant nutrition* (5th ed.). Netherland: Springer.

Mir Zadeh Vaghefi, S.S., Rajamand, M.A. and Khayami, M. (2008). Introduction of the cultivated plants of Tehran city. *Iranian Journal of Biology*, 21(2), 298-314. (In Farsi)

Mohamadipour, F. and Asadi Kapourchal, S. (2012). Assessing land cress potential for phytoextraction of cadmium from Cdcontaminated soils. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 2(2), 25-36. (In Farsi)

Nadal, M., Schuhmacher, M. and Domingo, J. L. (2004). Metal pollution of soils and vegetation in an area with petrochemical industry. *Science of the Total Environment*, 321(1-3), 59-69.

Nagajyoti, P. C., Lee, K. D. and Sreekanth, T. V. M. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 8(3), 199-216.

Nelson, D. W. and Sommers, L. E., (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T. and Sumner, M. E. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA*, pp. 539-579.

Nowrouzi, A. and Ravanbakhsh, M. H. (2017). Assessment of Cadmium spatial distribution in surface soil in thevicinity of Shiraz refinery by geostatistical method. *Journal of Enviromental Science and Technology*, 19(5), 203-214. (In Farsi)

Orroño, D. I., and Lavado, R. S. (2009). Heavy metal accumulation in *Pelargonium hortorum*: Effects on growth and development. *Phyton (Buenos Aires)*. 75.

Palm, V. (1994). A model for sorption, flux and plant uptake of cadmium in a soil profile: model structure and sensitivity analysis. *Water, Air, and Soil Pollution*, 77(1-2), 169-190.

Prasad, M. N. V. and Strzałka, K. (1999). Impact of

heavy metals on photosynthesis. In M. N. V. Prasad, J. Hagemeyer (Ed.) *Heavy metal stress in plants* (pp. 117-138). Springer, Berlin, Heidelberg.

Pulford, I. D. and Watson, C. (2003). Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees - a review. *Environment International*, 29(4), 529-540.

Rahimi, G. and. Dodonge, H. (2013). The evaluation of uptake of Cd and Zn by Gladiola, Narcissus and Tulip. *Journal of Water and Soil*, 27(6), 1207-1215. (In Farsi)

Salmanzadeh, M., Saeedi, M. and Nabi Bidhendi, G. (2012). Heavy metals pollution in street dusts of Tehran and their ecological risk assessment. *Journal of Enviromental Studies*, 38(1), 9-18. (In Farsi)

Shah, F. U. R., Ahmad, N., Masood, K. R., Peralta-Videa, J. R. and Ahmad, F. D. (2010). Heavy Metal Toxicity in Plants. In M. Ashraf, M. Ozturk, and M. S. A. Ahmad (Eds.), *Plant Adaptation and Phytoremediation*. (pp. 71–97). Dordrecht: Springer Netherlands.

Shanying, H. E., Xiaoe, Y. A. N. G., Zhenli, H. E. and Baligar, V. C. (2017). Morphological and physiological responses of plants to cadmium toxicity: a review. *Pedosphere*, 27(3), 421-438.

Sumner, M. E. and Miller, W. P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. In: Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T., Sumner, M. E. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 3. Soil Science Society of America, Inc., Madison, USA*, pp. 1201-1229.

Vogel-Mikus, K., Drobne, D. and Regvar, M. (2005). Zn, Cd and Pb accumulation and arbuscular mycorrhizal colonization of pennycress *Thlaspi praecox Wulf.* (*Brassicaceae*) from the vicinity of a lead mine and smelter in Slovenia. *Environmental Pollution*, 133, 233-242.

Wang, X. F. and Zhou, Q. X. (2005). Ecotoxicological effects of cadmium on three ornamental plants. *Chemosphere*, 60(1), 16-21.

Yanqun, Z., Yuan, L., Schvartz, C., Langlade, L. and Fan, L. (2004). Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area, China. *Environment International*, 30, 567–576.

Zhu, G., Xiao, H., Guo, Q., Zhang, Z., Zhao, J. and Yang, D. (2018). Effects of cadmium stress on growth and amino acid metabolism in two compositae plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 158, 300-308.

Zhuang, P., Yang, Q. W., Wang, H. B. and Shu, W. S. (2007). Phytoextraction of heavy metals by eight plant species in the field. *Water, Air and Soil Pollution*, 184, 235-242.