تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۹، شماره ۲، خرداد و تیر ۱۳۹۷ (ص ۲۵۹-۲۴۳) DOI: 10.22059/ijswr.2017.223804.667601

مقایسه توان تولید زیست‌توده و جذب و انتقال کادمیوم در سه رقم کلم

سمانه عبداللهی*[1] و احمد گلچین[2]

۱. دانشجوی دکتری، گروه خاکشناسی، دانشگاه زنجان

۲. استاد، گروه خاکشناسی، دانشگاه زنجان

(تاریخ دریافت: ۱۵/ ۱۰/ ۱۳۹۵- تاریخ بازنگری: ۳۱/ ۶/ ۱۳۹۶- تاریخ تصویب: ۲۵/ ۱۰/ ۱۳۹۶)

چکیده

به‌منظور بررسی توان تولید زیست‌توده و جذب و انتقال کادمیوم در سه رقم کلم آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در شرایط گلخانه اجرا گردید. تیمارهای آزمایش شامل شش سطح آلودگی خاک به کادمیوم (صفر، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک) از منبع سولفات کادمیوم [$3Cd(SO_4)\times 8H_2O$] و سه رقم کلم (*Brassica oleracea var. acephala L., Brassica oleracea var. italica* L. & *Brassica oleracea var. capitata* L.) بودند که در سه تکرار مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که سطوح کادمیوم اثر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد ($P<0.01$) بر عملکرد تر و خشک، وزن خشک ریشه، ساقه و برگ، سطح برگ و شاخص کلروفیل برگ هر سه رقم کلم داشتند. با افزایش سطح کادمیوم خاک، انباشت کادمیوم در ریشه، ساقه و برگ رقم‌های کلم به‌طور معنی‌داری ($P<0.01$) افزایش یافت. ریشه غلظت کادمیوم بیش‌تری نسبت به اندام‌های هوایی داشت و در بالاترین سطح کادمیوم خاک (۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک) غلظت کادمیوم ریشه در کلم برگ ۲۸ برابر، در کلم بروکلی ۱۲ برابر و در کلم زینتی ۴ برابر غلظت کادمیوم برگ بود. بیش‌ترین مقدار کادمیوم جذب شده متعلق به کلم برگ (۱/۴۵ میلی‌گرم در گلدان) بود و کلم بروکلی (۰/۷۹ میلی‌گرم در گلدان) و کلم زینتی (۰/۳۵ میلی‌گرم در گلدان) به ترتیب در مکان‌های بعدی قرار گرفتند. در هر سه رقم کلم بیش‌ترین مقدار جذب کادمیوم در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک و کم‌ترین مقدار جذب کادمیوم در تیمار شاهد (بدون کادمیوم) اندازه‌گیری گردید. فاکتور انتقال برای هر سه رقم کلم کم‌تر از یک و فاکتور تجمع زیستی بیش‌تر از یک بود. بر اساس یافته‌های این پژوهش می‌توان گفت هر سه رقم کلم برگ، کلم بروکلی و کلم زینتی جزء گیاهان اجتناب کننده عنصر کادمیوم طبقه‌بندی می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: انباشت، جذب، فاکتور انتقال، فاکتور تجمع زیستی، گیاه‌پالایی.

مقدمه

سلامت بشر به استفاده از مواد غذایی و محیط سالم بستگی دارد، گیاهان به دلیل تولید مواد مغذی، ویتامین‌ها و عناصر مورد نیاز بدن مورد استفاده و توجه عموم هستند (Omale and Emmanuel, 2011). در سال‌های اخیر به‌دلیل گسترش فعالیت‌های صنعتی، غلظت فلزات سنگین در محیط‌زیست و هم‌چنین مواد غذایی افزایش یافته است. یکی از دلایل خطرآفرین بودن فلزات سنگین، قدرت تجمع زیستی[1] آن‌ها است به این مفهوم که قادر هستند در سیستم بدن موجود زنده تجمع یابند و غلظت آن‌ها به‌مرور زمان و با تماس بیشتر با آلاینده‌ها افزایش یابد (Kilic, 2014).

کادمیوم فلزی بسیار سمی و سرطان‌زا است که از طرق مختلف نظیر فرونشت‌های جوی، فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی وارد خاک شده و تجمع آن باعث کاهش کیفیت و کارکرد مطلوب خاک می‌شود. این فلز هم‌چنین از طریق دفع پسماندهای صنایع متالوژی و یا کاربرد کودهای فسفاته در کشاورزی، به محیط‌زیست وارد می‌شود. به‌طور کلی اکثر خاک‌های غیر آلوده به کادمیوم، غلظتی کم‌تر از یک میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک دارند و غلظت بحرانی آن در خاک ۱/۵ تا ۲/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (Bolan *et al*., 2003). کادمیوم می‌تواند از طریق ریشه جذب شده و به بافت‌های مختلف گیاه منتقل شود و در نهایت در ساقه، برگ، میوه و دانه تجمع یابد (Qian *et a*l., 2009). از اثرات سوء ناشی از جذب زیاد کادمیوم توسط گیاه می‌توان به کاهش و توقف رشد ریشه، چوب‌پنبه‌ای شدن و صدمه دیدن ساختار داخلی و خارجی

* نویسنده مسئول: Samaneh.abdollahi87@yahoo.com

1. Bioacuumulation

Archive of SID

www.SID.ir

ریشه، کاهش میزان کلروفیل و بروز کلروز برگ اشاره نمود (Jalil *et al*., 1994; Alloway, 1995). گیاهان می‌توانند بدون این‌که صدمه‌ای ببینند مقادیر زیادی کادمیوم را در خود انباشته کنند. تجمع کادمیوم در گیاهان می‌تواند پتانسیل جذب این عنصر توسط انسان را افزایش دهد و این امر در حالتی صورت می‌گیرد که این گیاهان جزو جیره غذایی باشند (Kabata-Pendias, 2011). آلودگی سبزیجات به کادمیوم منجر به شکستگی استخوان، اسهال، درد معده و استفراغ شدید، ناباروری، آسیب به سیستم عصبی مرکزی و DNA و نیز توسعه سرطان در انسان می‌شود (Oti and Nwabue, 2013).

تکنیک‌های موجود برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین پرهزینه بوده و باعث از بین رفتن ساختمان خاک و غیرفعال شدن خاک از لحاظ زیستی می‌شوند. به همین دلیل در دو دهه اخیر روش‌های بی‌ضرر و اقتصادی با استفاده از گونه‌های گیاهی رایج شده است که به گیاه‌پالایی[1] معروف هستند (Wenzel, 2009). در گیاه‌پالایی معمولاً گونه‌هایی انتخاب می‌شوند که دارای زیست‌توده بالا و مقاوم به سمیت فلزات سنگین باشند (Yan-de *et al*., 2007).

گیاهان از لحاظ جذب و انتقال فلزات سنگین به سه دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول گیاهانی که فلزات سنگین را در بافت‌های خود ذخیره می‌سازند و آثار ناشی از سمیت فلز مانند زرد شدن، چروکیدگی و پیری زودرس برگ‌ها با توجه به نوع و غلظت فلز در محیط رشد در این گیاهان نمایان می‌شود که به گیاهان شاخص[2] معروف هستند. یکی از شاخص‌های شناسایی این گیاهان محاسبه دو عامل فاکتور انتقال[3] (TF) و فاکتور تجمع زیستی[4] (BCF) است. در گیاهان شاخص TF و BCF مساوی یک است (Olowoyo *et al*., 2010). در این گیاهان غلظت فلز جذب شده در گیاه بیانگر غلظت فلز در خاک است (Kupper *et al*., 1999; Memon *et al*., 2001). دسته دوم گیاهانی که با استفاده از مکانیسم تثبیت گیاهی (Phytostabilization) به‌طور مؤثری از ورود فلز به بخش‌های هوایی خود با وجود غلظت‌های زیاد فلزات سنگین در خاک جلوگیری می‌کنند و به گیاهان اجتناب‌کننده[5] معروف هستند. غلظت فلز در اندام‌های هوایی این گیاهان کمی زیاد شده یا ثابت باقی می‌ماند در حالی‌که ممکن است حاوی مقادیر زیادی از فلزات در ریشه‌های خود باشند. در گیاهان اجتناب‌کننده، TF کوچک‌تر از یک و BCF بزرگ‌تر از یک است (Joonki *et al*., 2006; Mcfaralane *et al*., 2007). دسته سوم گیاهانی که با استفاده از مکانیسم گیاه جذبی (Phytoextraction) توانایی جذب و تجمع فلز در آلودگی‌های کم تا زیاد را دارند و به آن‌ها گیاهان انباشت‌گر[6] گفته می‌شود (Kupper *et al*., 1999; Memon *et al*., 2001). در این گیاهان TF و BCF بزرگ‌تر از یک است. در واقع غلظت فلز در این گیاهان در حدود ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر بیش‌تر از غلظت فلز در سایر گیاهانی است که در خاک‌های آلوده رشد می‌کنند (Anderson *et al*., 1999; McGrath *et al*., 2002).

خانواده براسیکاسه[7] یکی از بزرگ‌ترین خانواده‌های گیاهان دو لپه‌ای و شامل ۱۹-۱۰ تیره، ۳۶۰-۳۳۸ جنس و حدود ۳۷۰۹ گونه است که در سراسر جهان و تمام قاره‌ها به‌جز قطب جنوب توزیع شده است (Al-Shehbaz *et al*., 2006). گیاهان این خانواده محدوده متفاوتی از تحمل به تنش شوری و عناصر سمی از خود نشان می‌دهند (Boyd and Barbour 1986; Megdiche *et al*., 2007). از جمله عناصر سمی که برخی از گیاهان این خانواده قادر به تحمل غلظت‌های بالایی از آن‌ها می‌باشند می‌توان به کادمیوم، نیکل، سرب، سلنیوم و روی اشاره کرد (Przedpelska and Wierzbicka 2007; Warwick 2011). با توجه به این‌که گونه *Brassica* از جمله گونه‌های این خانواده است که از اهمیت اقتصادی و زراعی بالایی برخوردار می‌باشد (Bailey *et al*., 2006) و در سال‌های اخیر جایگاه ویژه‌ای از لحاظ تولید ماده غذایی در بین مردم پیدا کرده است. لذا این تحقیق با هدف مقایسه تولید بیوماس و توانایی جذب و انتقال کادمیوم در برخی رقم‌های معروف این‌گونه شامل کلم پیچ یا کلم برگ[8] (*Brassica oleracea var. capitata* L.)، کلم زینتی[9] (*Brassica oleracea var. acephala* L.) و کلم بروکلی[10] (*Brassica oleracea var. italica* L.) انجام شد. هم‌چنین تأثیر کادمیوم بر برخی پارامترهای فیزیولوژیکی این رقم‌ها مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی توانایی تولید بیوماس و جذب و انتقال کادمیوم در سه رقم کلم یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سال ۱۳۹۴ به‌صورت گلخانه‌ای اجرا شد. تیمارهای

1. Phytoremedation
2. Metal indicator
3. Translocation Factor
4. BioConcentration Factor
5. Metal excluders
6. Metal accumulator
7. Brassicaceae
8. Cabbage
9. Ornamental Cabbage
10. Broccoli

Archive of SID

www.SID.ir

آزمایش شامل شش سطح آلودگی خاک به کادمیوم (صفر، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک) از منبع سولفات کادمیوم [$3Cd(SO_4)\times 8H_2O$] و سه رقم کلم (کلم زینتی، کلم بروکلی و کلم برگ) بودند که در سه تکرار مورد بررسی قرار گرفتند؛ بنابراین در مجموع ۱۸ تیمار و با لحاظ نمودن سه تکرار در مجموع ۵۴ واحد آزمایشی وجود داشت. هر واحد آزمایشی از یک گلدان حاوی چهار کیلوگرم خاک تشکیل شده بود که در آن تعداد چهار عدد نشاء کلم کشت شد. پس از آلوده کردن نمونه‌های خاک از طریق اسپری نمودن آن‌ها با مقادیر مختلف نمک سولفات کادمیوم که در آب مقطر حل شده بود، به‌منظور به تعادل رسیدن آن‌ها، تمام گلدان‌ها به مدت هشت هفته در رطوبت ظرفیت مزرعه و دمای ۲۵°c خوابانیده شدند. در طول دوره خوابانیدن هر هفته، از هر گلدان به میزان ۱۰ گرم نمونه خاک برداشت و پس از هوا خشک شدن غلظت کادمیوم قابل جذب در آن پس از عصاره‌گیری با DTPA اندازه‌گیری گردید (Lindsay and Norwell, 1978). با توجه به این‌که از هفته ششم به بعد غلظت کادمیوم قابل جذب تغییرات اندکی داشت لذا به نظر رسید که نمونه‌ها بعد از گذشت هشت هفته به تعادل نسبی رسیده‌اند، به همین منظور کشت نشاء بعد از گذشت مدت هشت هفته خوابانیدن انجام شد.

پس از بررسی چندین خاک از لحاظ بافت و غلظت کادمیوم قابل جذب، خاک مورد استفاده در آزمایش از یک خاک زراعی با کم‌ترین غلظت کادمیوم واقع در موقعیت جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۱ دقیقه و ۱۵ ثانیه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۲۳ دقیقه و ۱۶ ثانیه طول شرقی تهیه شد. برای این منظور ابتدا یک نمونه مرکب خاک (۲۰ نمونه فرعی از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری یک هکتار خاک زراعی جمع‌آوری و با هم مخلوط شد) تهیه و پس از هوا خشک کردن و عبور دادن از الک دو میلی‌متری، برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن از قبیل غلظت قابل جذب عنصر کادمیوم (Lindsay and Norvell, 1978)، نیتروژن کل (Bremner, 1996)، فسفر قابل جذب (Olsen *et al*., 1954)، پتاسیم قابل جذب (Helmke and Spark, 1996)، غلظت عناصر کم مصرف (Page, 1982)، واکنش خاک (Thomas, 1996)، قابلیت هدایت الکتریکی (Rhoades, 1982)، ماده‌آلی خاک (Walkley and Black, 1934)، کربنات کلسیم معادل (Loeppert and Suarez, 1996) و بافت خاک (Bouyoucos, 1962) اندازه‌گیری شدند.

نشاهای ارقام مختلف کلم در آذرماه سال ۱۳۹۴ در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه زنجان در گلدان‌ها کشت شد. شرایط گلخانه از نظر دمایی c° ۲۰- ۱۵ و طول روشنایی ۱۲- ۱۰ ساعت در روز بود. در طی دوره رشد، آبیاری گلدان‌ها با آب مقطر در حد رطوبت ظرفیت مزرعه انجام شد. برای این منظور گلدان‌ها در فاصله زمانی هر دو روز یک‌بار توزین شده و آب از دست رفته تا رسیدن گلدان‌ها به وزن نهایی (رطوبت ظرفیت مزرعه) به گلدان‌ها اضافه گردید. شاخص کلروفیل برگ به کمک دستگاه SPAD و قبل از گل‌دهی گیاه تعیین شد. برای این منظور میزان نسبی کلروفیل در سه نقطه از پنج برگ هر گیاه اندازه‌گیری و میانگین اعداد مربوط به عنوان محتوای نسبی کلروفیل هر گیاه گزارش شد. بعد از گذشت سه ماه و برداشت گیاه در اسفندماه، بخش‌های هوایی و ریشه گیاه از یکدیگر جدا و وزن‌های تر بخش هوایی و ریشه در هر واحد آزمایشی اندازه‌گیری شدند. سطح تک تک برگ‌های هر بوته با استفاده از نرم‌افزار اسکن برگ (GSA Image Analyser 3.1) اندازه‌گیری گردید.

قسمت‌های مختلف گیاه بعد از انتقال به آزمایشگاه توسط آب مقطر شسته و به‌طور جداگانه داخل پاکت‌های کاغذی قرار داده شدند و در آون به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردیدند. برای اندازه‌گیری میزان کادمیوم در اندام‌های هوایی و ریشه، نمونه‌های مورد نظر بعد از خشک شدن، با آسیاب برقی پودر شدند. یک گرم از نمونه پودر شده توزین و در بالن ژوژه ۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد. سپس ۱۵ میلی‌لیتر از مخلوط اسیدها (HNO_3 (70%), $HClO_4$ (65%), H_2SO_4 (65%)) با نسبت (۵:۱:۱) روی نمونه‌ها ریخته و در دمای ۸۰ درجه سلسیوس تا شفاف شدن نمونه‌ها حرارت داده شد. بعد از سرد شدن، نمونه‌ها با آب مقطر به حجم رسانده شد و با کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف گردید (Allen *et al*., 1986). سپس غلظت عنصر کادمیوم در عصاره حاصل توسط دستگاه جذب اتمی مدل Varian Spectr. AA20 تعیین و بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک محاسبه شد.

فاکتور انتقال (TF) یا میزان انتقال کادمیوم از ریشه به اندام‌های هوایی از نسبت غلظت فلز در برگ به غلظت فلز در ریشه محاسبه گردید و فاکتور تجمع زیستی (BCF) یا میزان انتقال کادمیوم از خاک به گیاه از نسبت غلظت فلز در ریشه به غلظت کل فلز در خاک به دست آمد (Li *et al*., 2007). هم‌چنین مقدار جذب کادمیوم کل زیست‌توده از حاصل‌ضرب غلظت عنصر کادمیوم در وزن زیست‌توده خشک بخش‌های مختلف گیاه محاسبه گردید. تجزیه آماری داده‌ها توسط نرم‌افزار SAS 9.1، مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شدند.

Archive of SID

www.SID.ir

نتایج و بحث

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش قبل از اعمال تیمارها در جدول (۱) و غلظت قابل جذب کادمیوم خاک بعد از گذشت هشت هفته خوابانیدن در جدول (۲) ارائه شده است.

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر برخی صفات مورد مطالعه نشان می‌دهد (جدول ۳) که تأثیر تیمارهای مورد بررسی بر تمامی صفات فیزیولوژیکی شامل عملکرد تر و خشک، وزن خشک ریشه، ساقه و برگ، سطح برگ و شاخص کلروفیل برگ و نیز انباشت عنصر کادمیوم در ریشه، ساقه و برگ و جذب کادمیوم توسط گیاه در سطح احتمال یک درصد ($P<0.01$) معنی‌دار بود.

مقایسه میانگین‌های تأثیر رقم‌های مختلف کلم بر صفات مورد بررسی نشان داد (جدول ۴) بیشترین عملکرد تر و خشک، وزن خشک ریشه و برگ، سطح برگ و شاخص کلروفیل برگ مربوط به رقم کلم برگ بود. بیشترین انباشت کادمیوم در ریشه و بیشترین مقدار جذب کادمیوم در کلم برگ و بیشترین انباشت کادمیوم در ساقه و برگ در کلم زینتی مشاهده شد

مقایسه میانگین‌های تأثیر سطوح مختلف کادمیوم بر صفات مورد بررسی نشان داد (جدول ۵) که بیش‌ترین عملکرد تر و خشک، وزن خشک ریشه، ساقه و برگ، سطح برگ و شاخص کلروفیل برگ مربوط به تیمار شاهد (بدون کادمیوم) و کم‌ترین مقدار این صفات مربوط به تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک بود. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار کادمیوم خاک تمام صفات فیزیولوژیکی گیاه کاهش می‌یابند که حاکی از تأثیر منفی حضور کادمیوم در خاک برای رشد و عملکرد رقم‌های مختلف کلم است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های مهم فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش قبل از اعمال تیمار

شن	۶۶	درصد	فسفر قابل جذب	۱۵	میلی‌گرم بر کیلوگرم
سیلت	۱۴	درصد	پتاسیم قابل جذب	۳۰۰	میلی‌گرم بر کیلوگرم
رس	۲۰	درصد	آهن قابل جذب	۶/۲	میلی‌گرم بر کیلوگرم
کربن آلی	۰/۴۸	درصد	روی قابل جذب	۱/۲	میلی‌گرم بر کیلوگرم
کربنات کلسیم معادل	۱۱/۲۵	درصد	مس قابل جذب	۰/۸۴	میلی‌گرم بر کیلوگرم
رطوبت مزرعه	۱۷/۵	درصد	منگنز قابل جذب	۴/۶	میلی‌گرم بر کیلوگرم
نیتروژن	۰/۱۸	درصد	منیزیم قابل جذب	۶/۱	میلی‌گرم بر کیلوگرم
قابلیت هدایت الکتریکی	۰/۴۵۳	دسی زیمنس بر متر	کادمیوم قابل جذب	۰/۰۶	میلی‌گرم بر کیلوگرم
اسیدیته خاک	۷/۷۷	-			

جدول ۲- غلظت کل و قابل جذب کادمیوم در سطوح اعمال شده

غلظت کل کادمیوم (مقادیر اسپری شده)	غلظت قابل جذب کادمیوم (بعد از گذشت هشت هفته و قبل از کشت)
میلی‌گرم بر کیلوگرم	
شاهد	۰/۰۶
۵	۱/۶۵
۱۰	۳/۲۳
۲۵	۸/۱۰
۵۰	۱۴/۱۵
۱۰۰	۳۰/۸۵

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر کادمیوم، نوع رقم و اثر متقابل آن‌ها بر برخی از صفات مورد مطالعه در گیاه کلم

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات									
		عملکرد تر	عملکرد خشک	وزن خشک			سطح برگ	شاخص کلروفیل	غلظت کادمیوم		جذب کل زیست-
				ریشه	ساقه	برگ		برگ	ریشه	ساقه	برگ	توده
گیاه	۲	۱۶۴۸۵۳/۰۲**	۱۸۲۶/۳۲**	۱۵/۹۷**	۳۱/۲۰**	۵۱/۹۷**	۱۶۵۴۲۵/۳۹**	۱۵۴۶۶/۸۱**	۵۸۰/۹۲**	۹۳/۳۲**	۳۱۳/۴۵**	۰/۴۶۸**
سطوح آلودگی	۵	۴۲۸۸/۹۵**	۲۷/۲۷**	۰/۴۲**	۰/۵۷**	۰/۳۶**	۱۰۷۸۶/۹۰**	۶۷۷/۱۸**	۱۶۱۴۲/۳۳**	۸۷۴/۷۷**	۱۸۴/۳۰**	۱/۰۴۸**
گیاه × سطوح آلودگی	۱۰	۸۰۳/۱۸**	۴/۱۴**	۰/۰۳۵**	۰/۲۱**	۰/۰۴**	۷۶۸/۵۳**	۲۴۵/۵۱**	۷۷۳/۶۰**	۴/۰۲**	۲۳/۲۲**	۰/۱۶۵**
خطا	۳۶	۲/۸۸	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۳۶/۴۴	۰/۷۳	۱۸/۱۳	۰/۳۶	۰/۰۰	۰/۰۰۱
ضریب تغییرات	-	۰/۷۷	۰/۴۳	۱/۱۵	۰/۶۵	۰/۵۷	۲/۰۷	۲/۲۱	۱۰/۵۳	۵/۴۱	۰/۰۰	۹/۳۶

** و * به ترتیب در سطح ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار و ns اختلاف معنی‌دار نیست.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های تأثیر نوع رقم بر برخی از صفات مورد مطالعه در گیاه کلم

منابع تغییرات	عملکرد تر	عملکرد خشک	وزن خشک			سطح برگ	شاخص کلروفیل برگ	غلظت کادمیوم			جذب کل زیست‌توده
			ریشه	ساقه	برگ			ریشه	ساقه	برگ	
	گرم در گلدان		گرم در بوته			سانتی‌متر مربع	-	میلی‌گرم بر کیلوگرم			میلی‌گرم در گلدان
کلم زینتی	۱۳۵/۱۶c	۹/۴۷c	۰/۷۲c	۰/۷۰c	۱/۶۶b	۳۴۶/۲۳a	۵/۱۳c	۳۸/۸۶b	۱۳/۴۵a	۹/۷۴a	۰/۱۸c
کلم بروکلی	۲۰۰/۸۵b	۱۹/۳۱b	۱/۲۳b	۳/۰۴a	۱/۴۲c	۱۸۰/۵۹b	۵۰/۷۵b	۴۳/۵۱a	۱۰/۵۹b	۴/۲۳b	۰/۳۲b
کلم برگ	۳۲۳/۷۰a	۲۹/۶۱a	۲/۵۵a	۲/۹۳b	۴/۴۷a	۳۴۷/۰۵a	۵۹/۸۳a	۴۳/۸۸a	۸/۹۱c	۱/۵۶c	۰/۵۱a

میانگین‌هایی که حداقل یک حرف مشترک دارند، از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های تأثیر سطوح مختلف کادمیوم بر برخی از صفات مورد مطالعه در گیاه کلم

سطوح آلودگی	عملکرد تر	عملکرد خشک	وزن خشک			سطح برگ	شاخص کلروفیل برگ	غلظت کادمیوم			جذب کل زیست‌توده
			ریشه	ساقه	برگ			ریشه	ساقه	برگ	
میلی‌گرم بر کیلوگرم	گرم در گلدان		گرم در بوته			سانتی‌متر مربع	-	میلی‌گرم بر کیلوگرم			میلی‌گرم در گلدان
شاهد	۲۵۴/۹۵a	۲۲/۲۲a	۱/۸۳a	۲/۶۴a	۲/۸۱a	۳۴۴/۵۱a	۴۹/۸۰a	۲/۷۸e	۰/۵۶f	۰/۰۰f	۰/۰۰f
۵	۲۳۰/۱۴b	۲۰/۴۵b	۱/۶۴b	۲/۳۳b	۲/۶۸b	۳۱۴/۹۱b	۴۶/۳۵b	۷/۴۲e	۲/۲۲e	۱/۱۱e	۰/۰۵۸e
۱۰	۲۲۳/۰۷c	۱۹/۷۳c	۱/۵۵c	۲/۲۷c	۲/۵۴c	۲۹۸/۶۹c	۴۱/۷۵c	۱۴/۶۶d	۶/۱۲d	۳/۳۴d	۰/۱۵d
۲۵	۲۱۴/۱۴d	۱۸/۸۹d	۱/۴۱d	۲/۱۶d	۲/۴۳d	۲۷۱/۲۳d	۳۵/۸۲d	۳۶/۳۷c	۱۳/۱۷c	۵/۹۰c	۰/۳۴c
۵۰	۲۰۵/۴۷e	۱۸/۱۴e	۱/۳۵e	۲/۰۳e	۲/۳۶e	۲۶۵/۸۲d	۳۱/۴۹e	۷۱/۴۴b	۱۹/۳۰b	۹/۴۶b	۰/۶۲b
۱۰۰	۱۹۱/۶۵f	۱۷/۳۵f	۱/۲۴f	۱/۹۲f	۲/۲۸f	۲۵۲/۵۹e	۲۸/۲۴f	۱۰۹/۸۵a	۲۵/۲۳a	۱۱/۲۴a	۰/۸۶a

میانگین‌هایی که حداقل یک حرف مشترک دارند، از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

جدول ۶- مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل سطوح مختلف کادمیوم و نوع رقم بر برخی از صفات مورد مطالعه در گیاه کلم

سطوح آلودگی	کلم زینتی				کلم بروکلی				کلم برگ			
	عملکرد تر	عملکرد خشک	وزن خشک			عملکرد تر	عملکرد خشک	وزن خشک			عملکرد تر	عملکرد خشک	وزن خشک		
			ریشه	ساقه	برگ			ریشه	ساقه	برگ			ریشه	ساقه	برگ
میلی‌گرم بر کیلوگرم	گرم در گلدان		گرم در بوته			گرم در گلدان		گرم در بوته			گرم در گلدان		گرم در بوته		
شاهد	۱۴۹/۳۳m	۱۰/۶۷m	۰/۸۷m	۰/۷۸l	۱/۸۸g	۲۲۴/۹۷g	۲۱/۳۸g	۱/۵۷g	۳/۲۲b	۱/۸۱h	۳۹۰/۵۴a	۳۴/۶۱a	۳/۰۳a	۳/۹۱a	۴/۷۴a
۵	۱۳۷/۶۷n	۹/۷۷n	۰/۸۱n	۰/۷۵m	۱/۶۹j	۲۲۰/۳۰h	۲۱/۰۶h	۱/۴۲h	۳/۱۸c	۱/۷۷i	۳۳۲/۴۴b	۳۰/۵۲b	۲/۷۰b	۳/۰۵e	۴/۵۸b
۱۰	۱۳۴/۲۳no	۹/۴۲o	۰/۷۴o	۰/۷۲n	۱/۶۴k	۲۱۱/۹۸i	۱۹/۸۳i	۱/۳۴i	۳/۱۱d	۱/۴۵n	۳۲۲/۹۹c	۲۹/۹۶c	۲/۵۶c	۲/۹۷f	۴/۵۲c
۲۵	۱۳۲/۳۰o	۹/۲۳p	۰/۷۰o	۰/۶۹no	۱/۶۲kl	۲۰۰/۸۱j	۱۸/۸۱j	۱/۰۷j	۳/۰۹d	۱/۲۱o	۳۱/۳۰۹d	۲۸/۶۴d	۲/۴۴d	۲/۷۰i	۴/۴۶d
۵۰	۱۳۰/۸۳o	۹/۰۸p	۰/۶۴p	۰/۶۸o	۱/۶۰l	۱۸۴/۴۳k	۱۷/۷۶k	۱/۰۲k	۲/۸۳g	۱/۱۸p	۳۰۱/۱۷e	۲۷/۵۷e	۲/۳۸e	۲/۵۷j	۴/۳۲e
۱۰۰	۱۲۶/۶۰p	۸/۶۶q	۰/۵۹q	۰/۶۱p	۱/۵۵m	۱۶۲/۶۳l	۱۷/۰۱l	۰/۹۶l	۲/۷۷h	۱/۰۷q	۲۸۵/۷۲f	۲۶/۳۹f	۲/۱۶f	۲/۳۷k	۴/۲۳f

میانگین‌هایی که حداقل یک حرف مشترک دارند، از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

جدول ۷- مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل سطوح مختلف کادمیوم و نوع رقم بر برخی از صفات مورد مطالعه در گیاه کلم

سطوح آلودگی	کلم زینتی		کلم بروکلی		کلم برگ	
	سطح برگ	شاخص کلروفیل برگ	سطح برگ	شاخص کلروفیل برگ	سطح برگ	شاخص کلروفیل برگ
میلی‌گرم بر کیلوگرم	سانتی‌متر مربع	-	سانتی‌متر مربع	-	سانتی‌متر مربع	-
شاهد	۴۰۳/۲۰ab	۷/۷۰l	۲۱۴/۸۰i	۵۸/۴۸d	۴۱۵/۵۲a	۸۳/۲۳a
۵	۳۵۲/۳۴cd	۶/۶۹lm	۲۰۱/۹۵ij	۵۵/۵۲e	۳۹۰/۴۳b	۷۶/۸۳b
۱۰	۳۴۱/۲۶de	۵/۰۶mn	۱۹۵/۱۴j	۵۱/۷۱f	۳۵۹/۶۷c	۶۸/۴۸c
۲۵	۳۳۶/۶۰ef	۴/۳۷no	۱۶۱/۹۳k	۴۸/۱۲gh	۳۱۵/۱۷g	۴۸/۹۷g
۵۰	۳۲۵/۱۴fg	۴/۰۶no	۱۵۷/۵۷k	۴۶/۲۶hi	۳۱۴/۷۵g	۴۴/۱۵j
۱۰۰	۳۱۸/۸۱g	۲/۹۴o	۱۵۲/۱۸k	۴۴/۴۵ij	۲۸۶/۷۹h	۳۷/۳۳k

میانگین‌هایی که حداقل یک حرف مشترک دارند، از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۸- مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل سطوح مختلف کادمیوم و نوع رقم بر برخی از صفات مورد مطالعه در گیاه کلم

سطوح آلودگی	کلم زینتی				کلم بروکلی				کلم برگ			
	غلظت کادمیوم			جذب کل زیست‌توده	غلظت کادمیوم			جذب کل زیست‌توده	غلظت کادمیوم			جذب کل زیست‌توده
	ریشه	ساقه	برگ		ریشه	ساقه	برگ		ریشه	ساقه	برگ	
میلی‌گرم بر کیلوگرم	میلی‌گرم بر کیلوگرم			میلی‌گرم در گلدان	میلی‌گرم بر کیلوگرم			میلی‌گرم در گلدان	میلی‌گرم بر کیلوگرم			میلی‌گرم در گلدان
شاهد	۵/۰۱hi	۱/۶۷i	۰/۰۰j	۰/۰۰j	۱/۶۷i	۰/۰۰j	۰/۰۰j	۰/۰۰j	۱/۶۷i	۰/۰۰j	۰/۰۰j	۰/۰۰j
۵	۱۱/۷ghi	۵/۰۱g	۳/۳۴g	۰/۰۷ij	۷/۲۴hi	۱/۶۷i	۰/۰۰j	۰/۰۶j	۳/۳۴hi	۰/۰۰j	۰/۰۰j	۰/۰۴j
۱۰	۱۸/۹۳g	۱۰/۰F	۸/۳۵e	۰/۱۴hi	۱۲/۲ghi	۵/۰۱g	۱/۶۷h	۰/۱۴hi	۱۲/۸gh	۳/۳۴h	۰/۰۰j	۰/۱۷gh
۲۵	۳۹/۵۲e	۱۵/۰e	۱۱/۷c	۰/۲۳g	۴۱/۱۹e	۱۴/۵e	۵/۰۱f	۰/۳۸ef	۲۸/۳۹f	۱۰/۰۲f	۱/۰۰i	۰/۴۰e
۵۰	۵۷/۸۹d	۲۱/۱c	۱۶/۷b	۰/۳۱f	۷۷/۹۳c	۱۸/۹d	۸/۳۵e	۰/۵۷d	۷۸/۴۹c	۱۷/۸۱d	۳/۳۴g	۰/۹۷b
۱۰۰	۷۰/۱۴c	۲۷/۸a	۱۸/۴a	۰/۳۵ef	۱۲۰/۷۹b	۲۵/۶b	۱۰/۳۵d	۰/۷۹c	۱۳۸/۶۱a	۲۲/۲۷c	۵/۰۱f	۱/۴۵a

میانگین‌هایی که حداقل یک حرف مشترک دارند، از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

عملکرد تر و خشک

با مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل سطوح مختلف کادمیوم و نوع رقم بر عملکرد تر و خشک گیاه کلم (جدول ۶) مشاهده گردید که بیش‌ترین میزان عملکرد تر و خشک مربوط به کلم برگ (به ترتیب ۳۹۰/۵۴ و ۳۴/۶۱ گرم در گلدان) و کم‌ترین میزان عملکرد تر و خشک مربوط به کلم زینتی (به ترتیب ۱۲۶/۶۰ و ۸/۶۶ گرم در گلدان) بود. همان‌طور که در شکل (۱) نیز مشاهده می‌گردد در هر سه رقم کلم (زینتی، بروکلی و برگ) با افزایش سطوح آلودگی خاک به کادمیوم عملکرد تر و خشک به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. به‌طوری که عملکرد تر در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک در کلم زینتی ۱۵/۲۲ درصد، در کلم بروکلی ۲۷/۷۱ درصد و در کلم برگ ۲۶/۸۴ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش نشان دادند. بر این اساس می‌توان گفت که کلم زینتی مقاومت بیش‌تری به غلظت‌های بالای کادمیوم خاک نسبت به دو رقم دیگر دارد.

Liu *et al* (2011) گزارش کردند وجود غلظت‌های بیش از ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک باعث کاهش رشد و عملکرد گیاه و کاهش فعالیت ریشه شد. از جمله دلایل کاهش رشد گیاه در اثر تنش فلزات سنگین می‌توان به واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی بین فلزات سنگین و اجزاء خاک که منجر به تغییر در خواص خاک و کاهش حاصلخیزی خاک می‌شود اشاره نمود (Chang and Wu, 2005). به عنوان مثال آلودگی خاک به فلزات سنگین می‌تواند تثبیت فسفر در خاک را افزایش داده و جذب فسفر توسط گیاه را کاهش دهد (Li *et al*., 2004; Zhang *et al*., 2004). اثرات سمی فلزات سنگین نیز موجب کاهش فتوسنتز گیاه، در نتیجه کاهش جذب آب و مواد غذایی توسط گیاه می‌شود که رشد و عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Qin *et al*., 2000).

وزن خشک ریشه، ساقه و برگ

ریشه‌ها به عنوان سطوح جذب کننده آب و مواد غذایی تأثیر بسیار زیادی بر میزان آب و املاح جذب شده دارند و عوامل مختلف محیطی از طریق تأثیر بر ریشه بر رشد گیاه اثر می‌گذارند. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود بیش‌ترین مقدار وزن خشک ریشه، ساقه و برگ در تیمار شاهد (بدون کادمیوم) و کم‌ترین مقدار آن‌ها در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک مشاهده شد و با افزایش سطح آلودگی خاک به کادمیوم وزن خشک ریشه، ساقه و برگ به‌طور معنی‌داری ($P<0.01$) کاهش یافتند. به‌طوری که در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک وزن خشک ریشه، ساقه و برگ در کلم زینتی به ترتیب ۳۲/۱۸، ۲۱/۷۹ و ۱۷/۵۵ درصد، در کلم بروکلی به ترتیب ۳۸/۸۵، ۱۳/۹۷ و ۴۰/۸۸ درصد و در کلم برگ به ترتیب ۲۸/۷۱، ۳۹/۳۸ و ۱۰/۷۶ درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون کادمیوم) کاهش نشان دادند. با مقایسه این نتایج می‌توان گفت بیش‌ترین کاهش وزن خشک ریشه و برگ در کلم بروکلی (به ترتیب ۳۸/۸۵ و ۴۰/۸۸ درصد) و بیش‌ترین کاهش وزن خشک ساقه در کلم برگ (۳۹/۳۸ درصد) مشاهده شد. این امر نشان دهنده حساسیت کلم بروکلی به سطوح بالای کادمیوم در خاک است. لذا می‌توان گفت رقم کلم بروکلی رقم مناسبی برای کشت در خاک‌های آلوده به غلظت‌های بالای کادمیوم نیست.

با افزایش غلظت کادمیوم وزن خشک شاخه و ریشه در کلم و خردل (Chen *et al*., 2011) و ارتفاع بوته، تعداد پنجه و وزن خشک ریشه در برنج (Herath *et al*., 2014) کاهش یافتند. در غلظت ۱۰۰ میکرومول کادمیوم در کیلوگرم خاک، میزان زیست‌توده ریشه، ساقه و برگ به ترتیب به میزان ۴۵/۸، ۳۳/۸ و ۵۰/۷ درصد کاهش یافتند (Liu *et al*., 2014). تنش فلزات

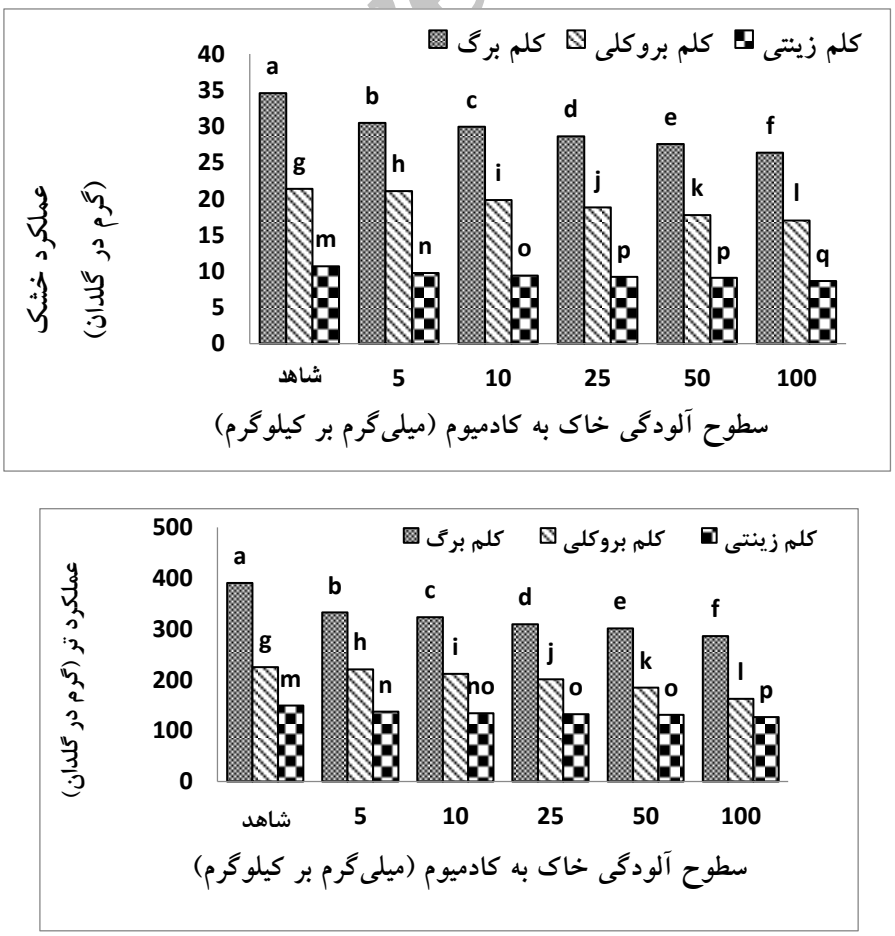
Archive of SID

www.SID.ir

سنگین از جمله عوامل محدود کنندهٔ رشد ریشه است و کاهش رشد ریشه فعالیت‌های رشدی گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. عدم توسعه و گسترش مناسب سیستم ریشه‌ای باعث کاهش سطوح جذب کننده مواد غذایی، تغییر در ساختار غشا سلولی و کاهش جذب و محتوی آب می‌شود که این امر بر فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند تعرق، تنفس و فتوسنتز اثر گذاشته و در نهایت موجب کاهش رشد در سایر قسمت‌های گیاه و از جمله کاهش زیست‌توده و سطح برگ می‌شود (Sharma and Dubey, 2005). هم‌چنین کادمیم از تقسیم سلول‌های منطقه مریستمی و رشد سلول‌های منطقه رشد جلوگیری کرده و موجب کاهش رشد ریشه می‌شود (Fusconi *et al.*, 2007). مطالعات نشان داد با افزایش غلظت کادمیوم در خاک، وزن اندام‌های (ریشه، ساقه و برگ) گیاه اکالیپتوس کاهش یافت که از این میان کاهش در ساقه و برگ محسوس‌تر بود (Shariat *et al.*, 2010). بر این اساس می‌توان گفت افزایش سطوح آلودگی خاک به کادمیوم در درجه اول باعث کاهش رشد ریشه گردیده و کاهش توسعه سیستم ریشه‌ای به محدود شدن رشد بخش هوایی منجر شده است.

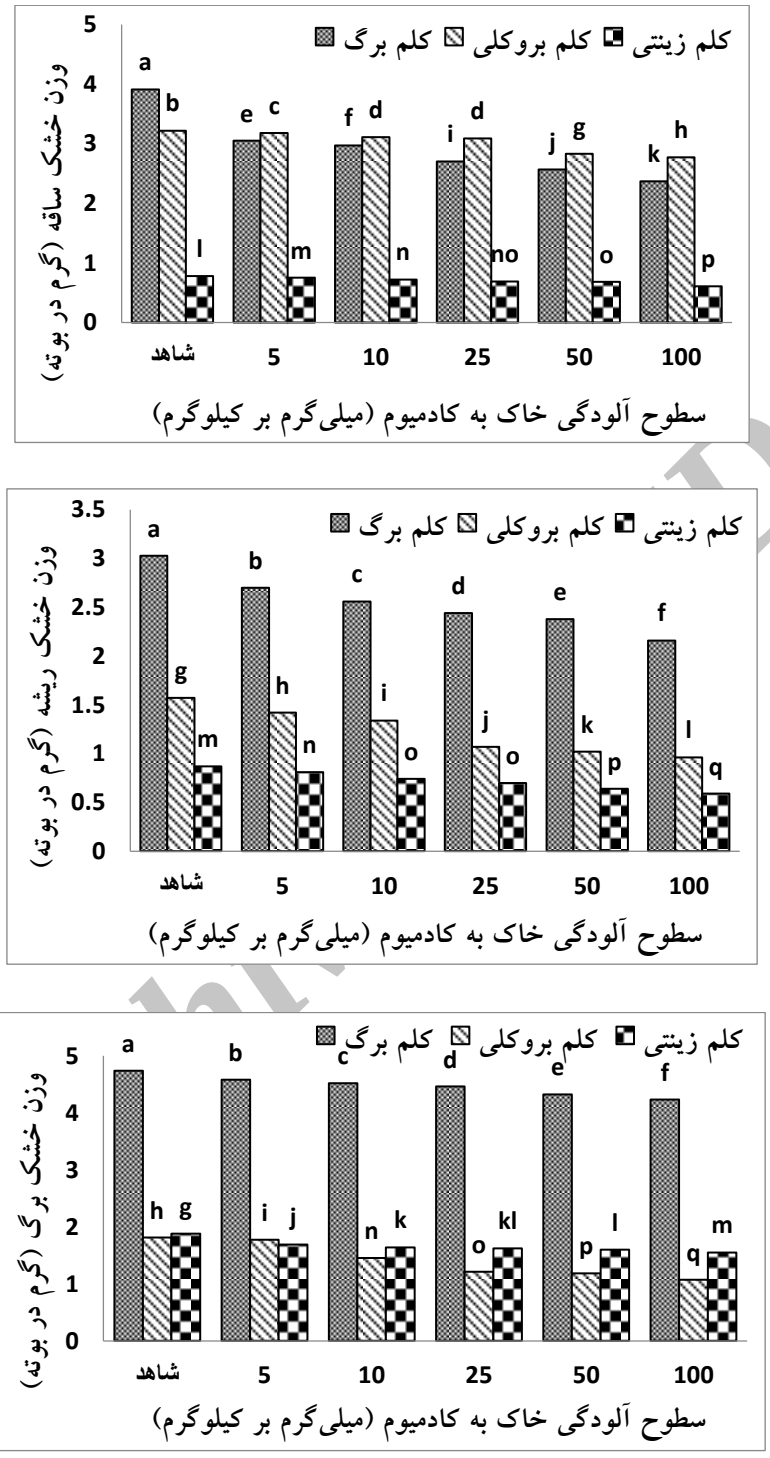
سطح برگ و شاخص کلروفیل برگ

سطح برگ به عنوان یک عامل اساسی و تأثیرگذار بر فرآیندهای رشد و نمو گیاه به تنش‌های محیطی حساس است. مقایسه میانگین‌های سطح برگ سه رقم کلم (جدول ۷) نشان داد که بیش‌ترین مقدار سطح برگ (۴۱۵/۵۲ سانتی‌متر مربع) مربوط به کلم برگ و تیمار شاهد و کم‌ترین مقدار سطح برگ (۱۵۲/۱۸ سانتی‌متر مربع) مربوط به کلم بروکلی و تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک بود. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود در هر سه رقم کلم، مقدار سطح برگ در تیمار شاهد (بدون کادمیوم) بیش‌ترین مقدار و در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک کم‌ترین بود و با افزایش سطح آلودگی خاک به کادمیوم سطح برگ کاهش یافت؛ اما در کلم بروکلی اختلاف معنی‌داری در مقدار سطح برگ بین سطوح ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک مشاهده نشد. با این حال سطح برگ در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک در سه رقم کلم (زینتی، بروکلی و برگ) به ترتیب ۲۰/۹۳، ۲۹/۱۵ و ۳۰/۹۸ درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون کادمیوم) کاهش یافت. Herath *et al.* (2014) نیز کاهش سطح برگ با افزایش غلظت کادمیوم خاک را گزارش کرده‌اند.



شکل ۱- اثر متقابل سطوح مختلف کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و نوع رقم بر عملکردتر و خشک گیاه کلم.

www.SID.ir



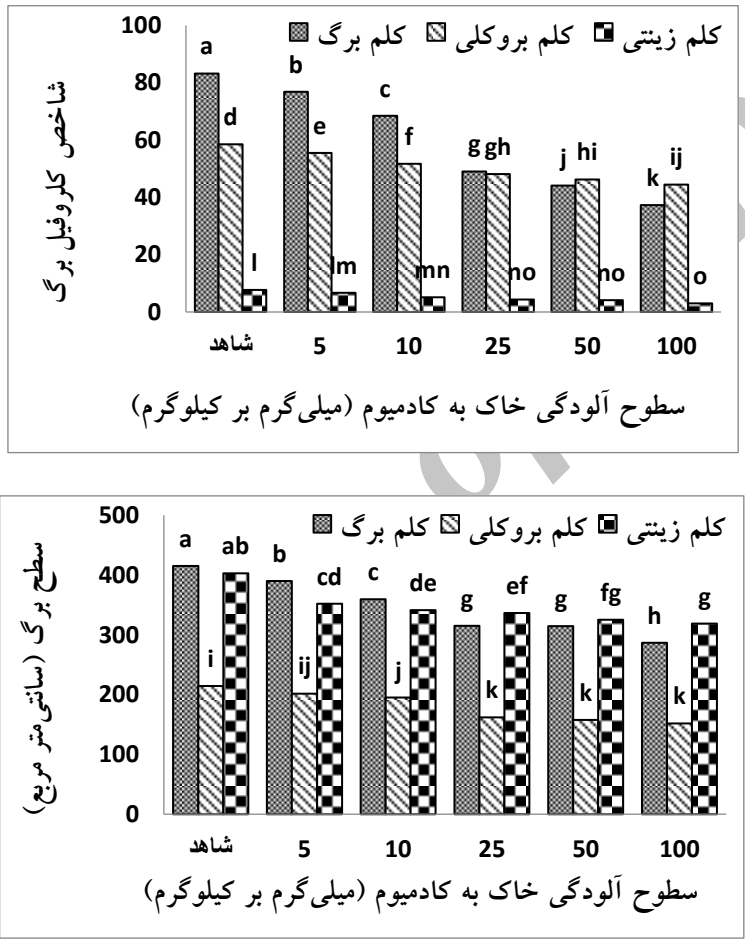
شکل ۲- اثر متقابل سطوح مختلف کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و نوع رقم بر وزن خشک ریشه، ساقه و برگ گیاه کلم

فتوسنتز مهم‌ترین و اساسی‌ترین فرایند بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی گیاه است. با بررسی میانگین شاخص کلروفیل برگ (جدول ۷) مشخص گردید که بیش‌ترین مقدار شاخص کلروفیل برگ (۸۳/۲۳) مربوط به کلم برگ و تیمار شاهد (بدون کادمیوم) و کم‌ترین مقدار آن (۲/۹۴) مربوط به کلم زینتی و تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک بود. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود با افزایش سطح آلودگی خاک به کادمیوم مقدار شاخص کلروفیل برگ در کلم برگ و کلم بروکلی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. اما در کلم زینتی بین تیمارهای شاهد، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک و سطوح ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. اما شاخص کلروفیل برگ در

www.SID.ir

تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک در سه رقم کلم (زینتی، بروکلی و برگ) به ترتیب ۶۱/۸۲، ۲۳/۹۹ و ۵۵/۱۵ درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون کادمیوم) کاهش یافت.

افزایش میزان کادمیوم خاک با اختلالات فیزیولوژیکی زیادی مانند جلوگیری از جوانه زنی بذر، کاهش رشد به‌ویژه رشد ریشه، اختلال در جذب مواد معدنی و متابولیسم کربوهیدرات‌ها و در نتیجه کاهش شدید زیست‌توده گیاهی همراه است. کاهش زیست‌توده نتیجه مستقیم کاهش سنتز کلروفیل و فتوسنتز می‌باشد (Claussen, 2002). محققین مختلفی گزارش کرده‌اند که غلظت‌های بالای کادمیوم می‌تواند موجب تأخیر در رشد، کلروز و نکروزه شدن برگ (Xue *et al*., 2013) و کاهش کلروفیل و در نتیجه کاهش فتوسنتز شود (Azevedo *et al*., 2005; Jiang *et al*., 2007; Chen *et al*., 2011; Liu *et al*., 2011).



شکل ۳- اثر متقابل سطوح مختلف کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و نوع رقم بر سطح و شاخص کلروفیل برگ در گیاه کلم

غلظت کادمیوم در ریشه، ساقه و برگ

بیش‌ترین غلظت کادمیوم ریشه در کلم برگ ۱۳۸/۶۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم و بیش‌ترین غلظت کادمیوم برگ در کلم زینتی ۱۸/۳۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری گردید (جدول ۸). همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود بیش‌ترین غلظت کادمیوم ریشه، ساقه و برگ در هر سه رقم کلم در بالاترین سطح آلودگی خاک به کادمیوم (۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک) و کم‌ترین مقدار آن در تیمار شاهد (بدون کادمیوم) اندازه‌گیری گردید. در هر سه رقم کلم با افزایش سطح کادمیوم خاک، غلظت کادمیوم ریشه، ساقه و برگ نیز به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. Maria *et al* (2013) گزارش کردند با افزایش غلظت کادمیوم خاک، غلظت کادمیوم برگ ۱۰ برابر و غلظت کادمیوم ریشه حدود سه برابر در گیاه آفتابگردان افزایش یافت. محققین دیگری نیز افزایش غلظت کادمیوم گیاه با افزایش غلطت کادمیوم خاک را گزارش کرده‌اند (Sohrabi Yourtchi and Bayat, 2013; Herath *et al*., 2014).

با مقایسه میانگین غلظت کادمیوم در ریشه، ساقه و برگ در رقم‌های مختلف کلم مشاهده شد که انباشت کادمیوم در اندام‌های مختلف گیاه کلم به صورت ریشه>ساقه>برگ بود. یعنی ریشه بالاترین غلظت کادمیوم را در میان اندام‌های گیاه دارا بود. در بالاترین سطح آلودگی خاک به کادمیوم (۱۰۰

www.SID.ir

میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک معادل ۳۰/۸۵ میلی‌گرم کادمیوم قابل جذب بر کیلوگرم خاک)، غلظت کادمیوم ریشه در کلم برگ ۲۸ برابر غلظت کادمیوم برگ، در کلم بروکلی ۱۲ برابر و در کلم زینتی ۴ برابر بود. این اعداد نشانگر آن است که کلم برگ از توانایی بالاتری نسبت به کلم بروکلی و کلم زینتی در انباشت و ذخیره کادمیوم در ریشه خود برخوردار است و کم‌ترین مقدار کادمیوم را به اندام‌های هوایی منتقل می‌کند. این مطلب توسط محققین دیگری نیز بیان شده است. در بررسی غلظت کادمیوم در گل کلم، بالاترین غلظت کادمیوم برگ ۱/۵۷ میکروگرم بر گرم و بالاترین غلظت کادمیوم گل ۰/۴۸ میکروگرم بر گرم اندازه‌گیری شد. نتایج همچنین نشان داد که در گل کلم، فلزات سنگین از جمله کادمیوم در ریشه بیشتر از برگ و در برگ بیشتر از سر کلم تجمع می‌کنند و کمترین مقدار به بخش خوراکی کلم وارد می‌شود (Khanal *et al*., 2014). توزیع کادمیوم در گیاه برنج به‌صورت ریشه>شاخه>دانه گزارش شده است و در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک کم‌ترین مقدار انباشت در گیاه مشاهده گردید (Herath *et al*., 2014). همچنین ۸۵-۷۰ درصد کادمیوم جذب شده توسط گیاهان مختلف در ریشه باقی می‌ماند و انتقال آن به بخش‌های هوایی گیاه به مقدار کمی صورت می‌گیرد (Wu, 1990).

مقادیر مجاز غلظت فلزات در بافت‌های گیاهی کلم براساس استاندارد (FAO/WHO) برای عنصر کادمیوم ۰/۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک می‌باشد (Codex Alimentarius Commission, 2001). غلظت کادمیوم در برگ کلم زینتی به جز تیمار شاهد (بدون کادمیوم) در تمام سطوح کادمیوم خاک بیش‌تر از حد مجاز بود. در کلم بروکلی غلظت کادمیوم در برگ در تیمارهای شاهد و ۵ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک (معادل ۱/۶۵ میلی‌گرم کادمیوم قابل جذب بر کیلوگرم خاک) زیر حد تشخیص دستگاه جذب اتمی بود ولی در بقیه سطوح بیش‌تر از حد مجاز به دست آمد. در کلم برگ در تیمارهای شاهد، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک (معادل ۱/۶۵ و ۳/۲۳ میلی‌گرم کادمیوم قابل جذب بر کیلوگرم خاک) غلظت کادمیوم در برگ زیر حد تشخیص دستگاه جذب اتمی ولی در سایر تیمارها بیش‌تر از حد مجاز بود. این امر نشان می‌دهد که کلم برگ و بروکلی از قدرت زیادی برای نگهداری کادمیوم در ریشه خود برخوردارند و می‌توان از آن‌ها برای کشت و کار در خاک‌های با آلودگی کم به کادمیوم بهره برد.

پژوهشگران مختلف غلظت‌های متفاوتی از این عنصر را در گیاه کلم گزارش کرده‌اند. در مطالعه‌ای غلظت کادمیوم در گیاه کلم ۳/۳۹۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گزارش شده است (Meena *et al*., 2011). در تحقیق دیگری بیشترین غلظت کادمیوم در کلم زینتی ۰/۸۴ میکروگرم بر گرم وزن خشک گزارش شد (Osma *et al*., 2012). با بررسی میزان فلزات سنگین در شش نوع کلم (کلم بروکلی، کلم پیچ، گل کلم، کلم قرمز، کلم سفید و کلم چینی) غلظت کادمیوم به ترتیب ۰/۶، ۰/۵۱، ۰/۳۲، ۰/۸۸ و ۰/۴۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک به دست آمد. نتایج نشان داد کلم بروکلی و کلم سفید بیشترین توانایی در جذب کادمیوم در بین شش نوع کلم را دارا بودند (Czech *et al*., 2012). در بررسی تجمع فلزات سنگین در بخش‌های خوراکی برخی از گیاهان زراعی رشد کرده در خاک‌های آتشفشانی از جمله کلم پیچ، غلظت کادمیوم در بخش‌های خوراکی کلم پیچ ۰/۱۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک و فاکتور انتقال برای این عنصر ۰/۴۵۷ محاسبه شد. غلظت پایین این عنصر در گیاه به خواص فیزیکی و شیمیایی خاک نسبت داده شد که از انتقال کادمیوم از خاک به گیاه جلوگیری نموده است (Saglam, 2013). مطالعات دیگری نشان داد با افزایش غلظت کادمیوم در خاک، مقدار کادمیوم جذب شده در ریشه، ساقه و برگ افزایش یافت. هم‌چنین غلظت کادمیوم در ریشه نسبت به برگ به‌طور قابل توجهی بیش‌تر بود (Shariat *et al*., 2010; Haghighi *et al*.,2010).

جذب کادمیوم کل زیست‌توده در ارقام مختلف کلم

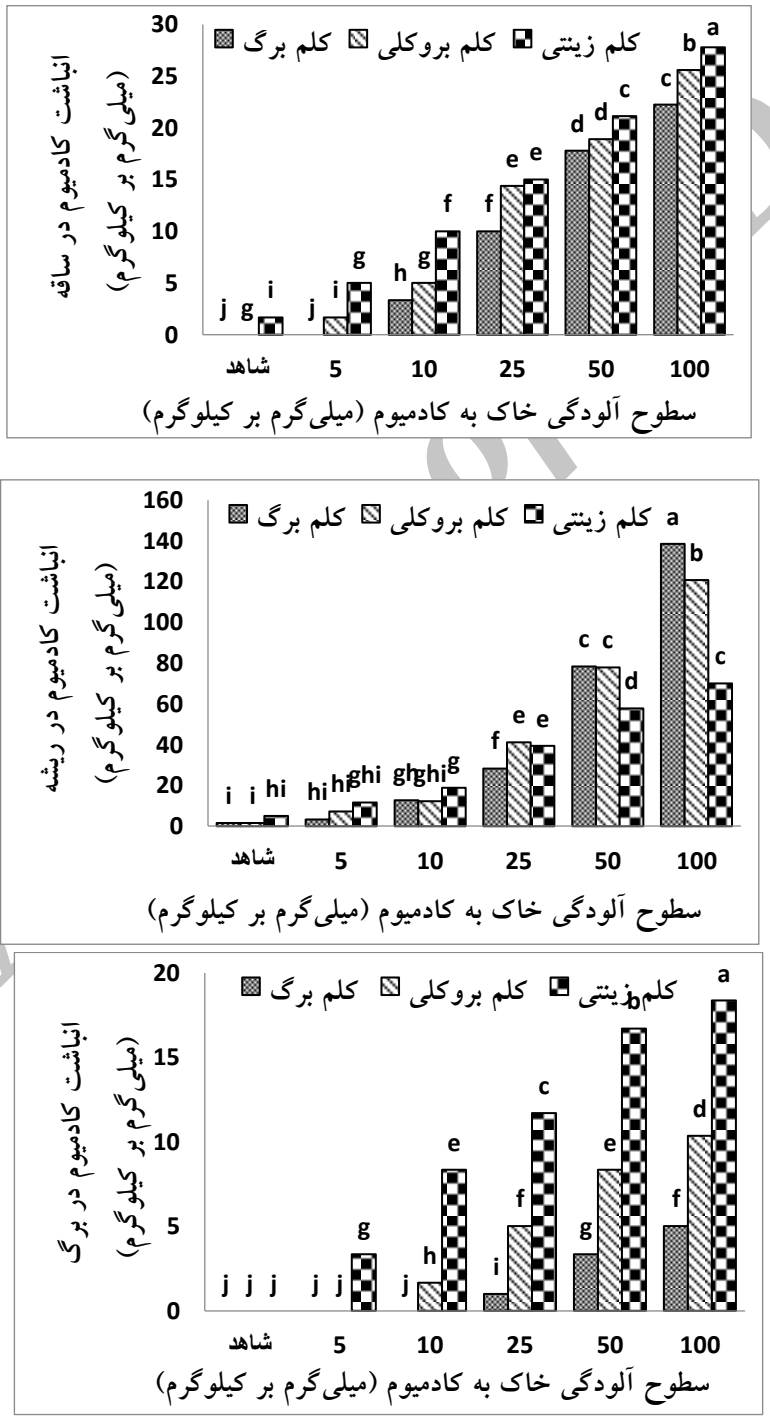
مقایسه میانگین‌های جذب کادمیوم در رقم‌های مختلف کلم نشان داد که بیش‌ترین مقدار کادمیوم جذب شده (۱/۴۵ میلی‌گرم در گلدان) در کلم برگ وجود داشت و سپس کلم بروکلی (۰/۷۹ میلی‌گرم در گلدان) و کلم زینتی (۰/۳۵ میلی‌گرم در گلدان) به ترتیب در مکان‌های بعدی قرار گرفتند (جدول ۸). هم‌چنین در هر سه رقم کلم بیش‌ترین مقدار جذب در بالاترین سطح آلودگی خاک به کادمیوم (۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک) معادل ۳۰/۸۵ میلی‌گرم کادمیوم قابل جذب بر کیلوگرم خاک و کم‌ترین مقدار آن در تیمار شاهد (بدون کادمیوم) صورت گرفت. یعنی با افزایش سطح کادمیوم خاک مقدار کادمیوم جذب شده توسط هر سه رقم کلم به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۵). با توجه به این‌که مقدار جذب از حاصل‌ضرب غلظت عنصر در وزن زیست‌توده خشک بخش‌های مختلف گیاه محاسبه می‌شود، می‌توان گفت که جذب بالای کادمیوم در کلم برگ به علت زیست‌توده زیادی است که این رقم نسبت به دو رقم دیگر تولید کرده است.

سبزی‌های برگی بویژه کاهو، اسفناج، کرفس و کلم کادمیوم را به مقدار زیادی تجمع می‌دهند. نتایج آزمایشات بر

Archive of SID

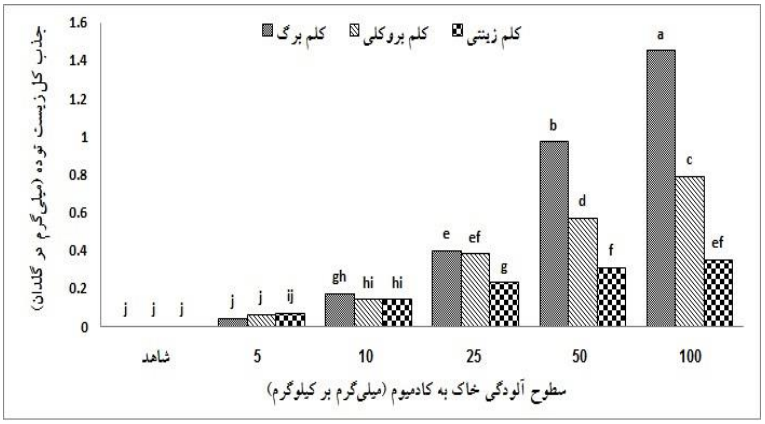
www.SID.ir

روی کلم، هویج و کاهو نشان داد که رابطه مثبت و معنی‌داری بین افزایش کادمیوم محیط ریشه و افزایش تجمع آن در گیاه وجود داشت (Alloway, 1995). در مطالعه‌ای غلظت کادمیوم در گل‌کلم و کلم از زیر حد تشخیص تا ۱/۱ میکروگرم بر گرم وزن خشک و به‌طور میانگین ۰/۰۷۵ میکروگرم بر گرم وزن خشک گزارش شده است (Abbas *et al*., 2010). در تحقیق دیگری غلظت کادمیوم در گل کلم ۰/۰۵۶ تا ۰/۶۱۸ میکروگرم بر گرم وزن خشک و در کلم ۰/۰۴ تا ۰/۴۳۷ میکروگرم بر گرم وزن خشک به دست آمد (Al-Chaarani *et al*., 2009). افزایش غلظت کادمیوم در گیاه با افزایش غلظت آن در خاک در مطالعات دیگری نیز گزارش شده است (Ouzounıdou *et al*., 1997; Koleli *et al*., 2004; Yildiz, 2005; Al-Chaarani *et al*., 2009; Sohrabi Yourtchi and Bayat, 2013).



شکل ۴- اثر متقابل سطوح مختلف کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و نوع رقم بر انباشت کادمیوم در ریشه، ساقه و برگ در گیاه کلم

www.SID.ir

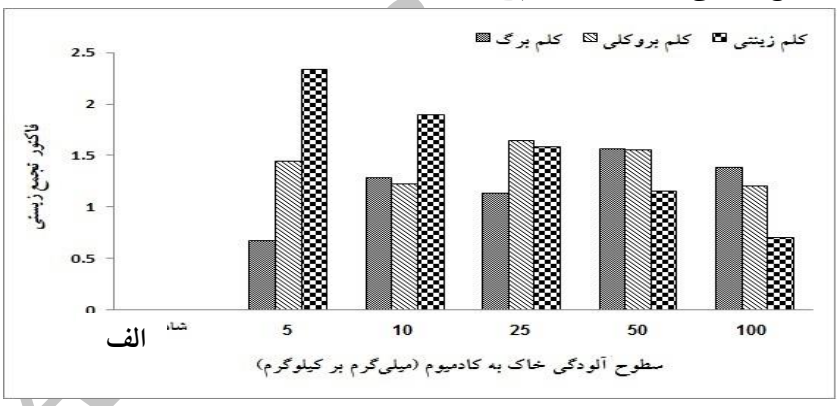


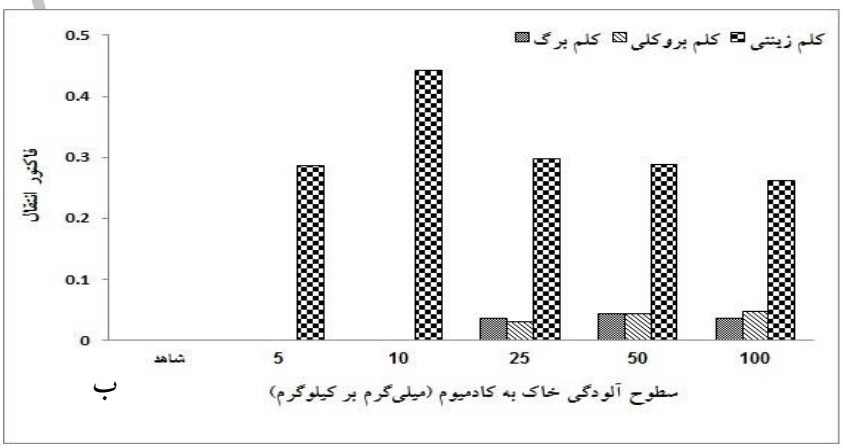
شکل ۵- اثر متقابل سطوح مختلف کادمیوم خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و نوع رقم بر میزان جذب کادمیوم کل زیست‌توده در گیاه کلم

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

غلظت فلزات در اندام‌های هوایی شاخص خوبی برای زیست فراهمی فلزات نیست و برای فهم این مطلب بهتر است از رابطه بین فلزات در ریشه و ذخیره موجود در توده خاک استفاده شود (Chaignon *et al*., 2002; Feng *et al*., 2005; Fang *et al*., 2007). با توجه به شکل (۶) و مقایسه فاکتور انتقال (TF) و فاکتور تجمع زیستی (BCF) در هر سه رقم مورد مطالعه مشخص گردید در تمام سطوح آلودگی خاک به کادمیوم فاکتور انتقال برای هر سه رقم کلم برگ، کلم بروکلی و کلم زینتی کم‌تر از یک بود. نتایج مشابهی توسط پژوهشگران دیگری ارائه شده است (Maria *et al*., 2013; Hellen and Othman, 2014).

فاکتور تجمع زیستی برای هر سه رقم کلم بیش‌تر از یک بود. با توجه به این‌که TF<1 و BCF>1 است و با لحاظ نمودن این مطلب که غلظت کادمیوم در هر سه رقم مورد بررسی در ریشه بیش‌تر از اندام‌های هوایی می‌باشد، می‌توان آن‌ها را جزء گیاهان اجتناب کننده نسبت به عنصر کادمیوم طبقه‌بندی کرد.



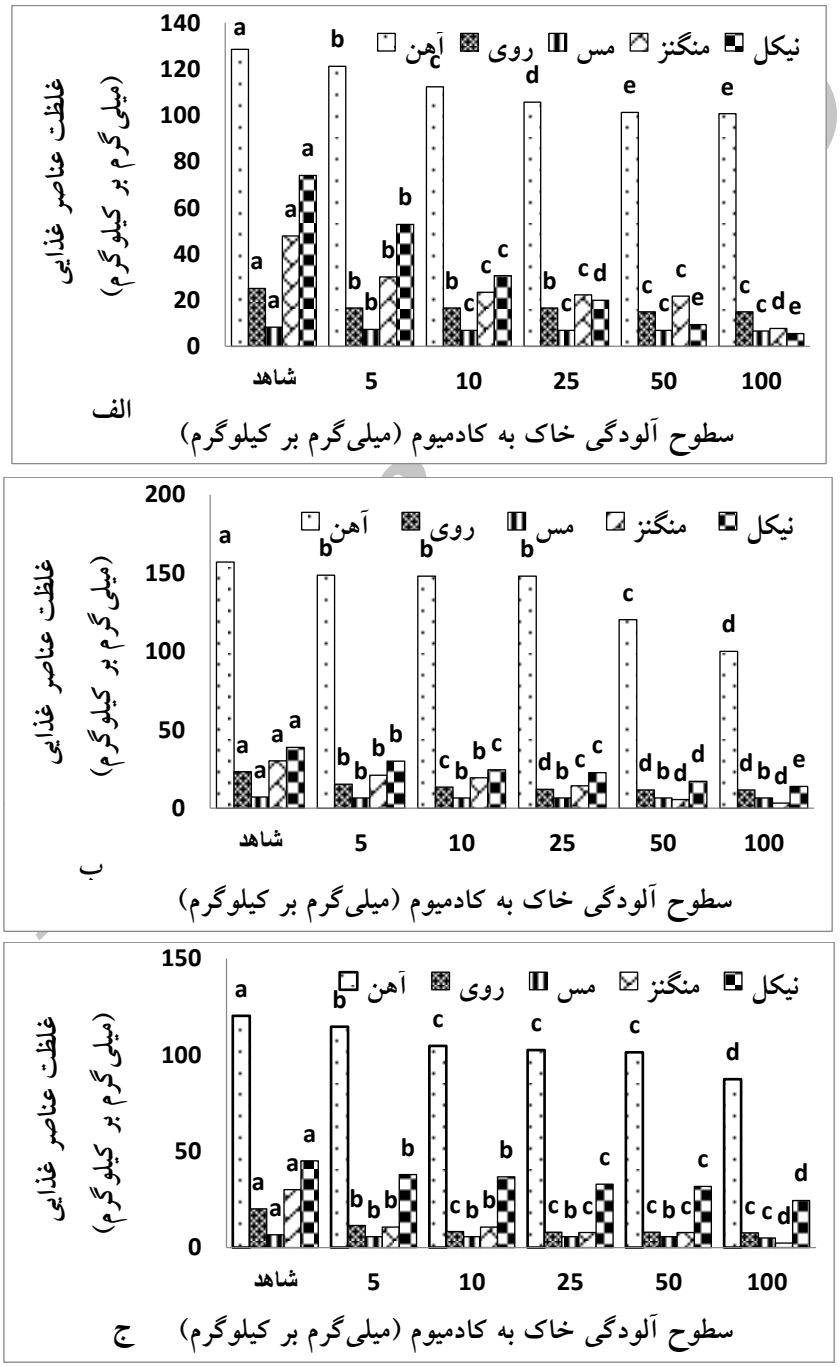


شکل ۶- فاکتور انتقال (از ریشه به اندام هوایی گیاه) (الف) و فاکتور تجمع زیستی (انتقال از خاک به گیاه) (ب) برای سه رقم مختلف کلم در سطوح مختلف آلودگی خاک به کادمیوم.

www.SID.ir

تأثیر سطوح مختلف کادمیوم در خاک بر غلظت برخی عناصر غذایی در گیاه

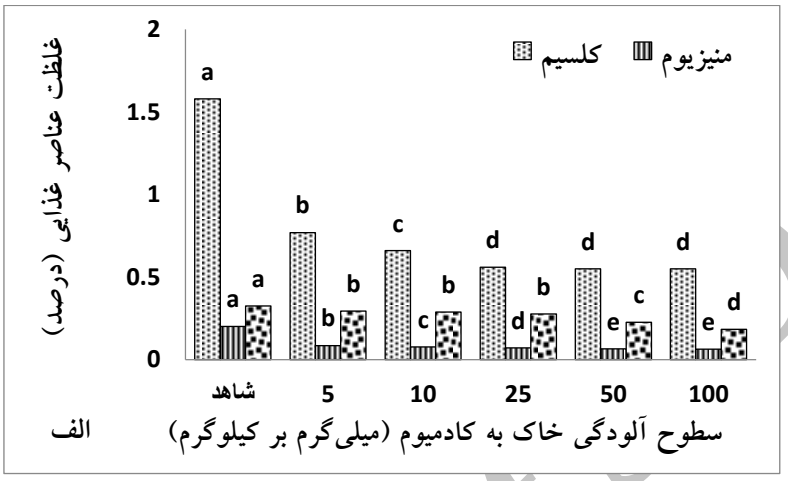
مقایسه میانگین‌های غلظت عناصر غذایی در رقم‌های مختلف کلم نشان داد که غلظت آهن و نیکل در هر سه رقم کلم (زینتی، بروکلی و برگ) با افزایش سطح کادمیوم در خاک به‌طور معنی‌داری ($P<0.01$) کاهش یافتند. این روند کاهشی در عناصر روی و منگنز هم دیده شد؛ اما در مورد مس در رقم‌های کلم بروکلی و کلم زینتی تفاوت معنی‌داری بین سطوح ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک مشاهده نشد ولی تمام سطوح با شاهد تفاوت معنی‌داری داشتند (شکل ۷). این امر نشان می‌دهد با اولین سطح آلودگی کادمیوم در خاک بیش‌ترین کاهش در جذب عنصر مس از خاک توسط گیاه رخ داده است.

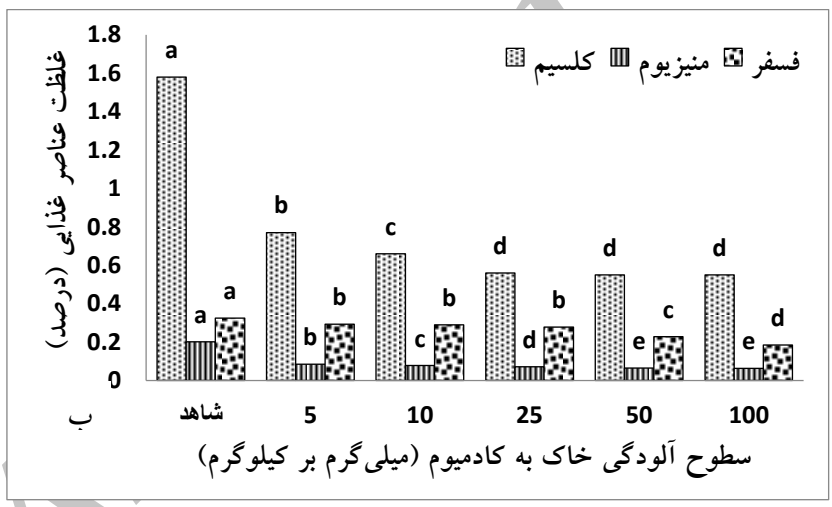


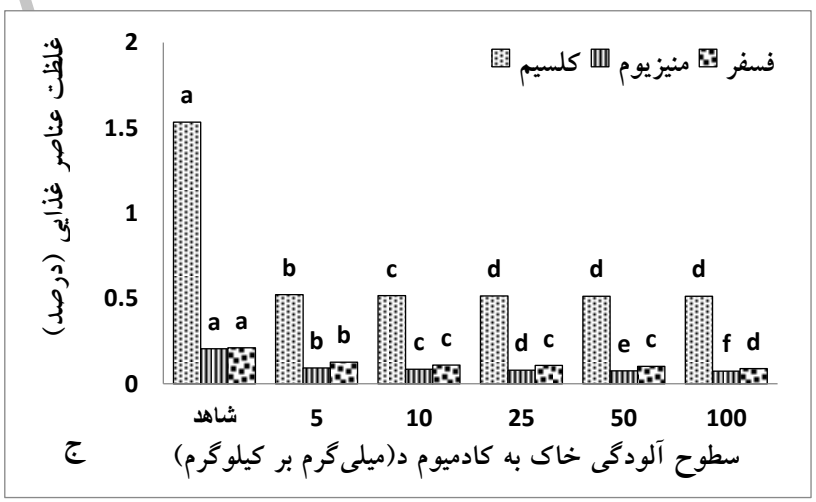
شکل ۷- تأثیر سطوح آلودگی خاک به کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم) بر غلظت عناصر کم مصرف (آهن، روی، مس، منگنز) و نیکل در سر کلم زینتی (الف)، کلم بروکلی (ب) و کلم برگ (ج).

www.SID.ir

مقایسه میانگین‌های غلظت عناصر کلسیم، منیزیم و فسفر در رقم‌های مختلف کلم نیز نشان داد با افزایش سطح کادمیوم در خاک غلظت این عناصر به‌طور معنی‌داری ($P<0.01$) کاهش می‌یابند (شکل ۸). این امر بیانگر تأثیر شدید کادمیوم بر جذب این عناصر از خاک توسط گیاه است. محققان دیگری نیز بیان کردند آلودگی خاک به فلزات سنگین می‌تواند تثبیت فسفر در خاک را افزایش داده و جذب فسفر توسط گیاه را کاهش دهد (Li *et al*., 2004; Zhang *et al*., 2004).







شکل ۸- تأثیر سطوح آلودگی خاک به کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم) بر غلظت عناصر پر مصرف (کلسیم، منیزیم، فسفر) در سر کلم زینتی (الف)، کلم بروکلی (ب) و کلم برگ (ج).

www.SID.ir

نتیجه‌گیری کلی

براساس نتایج به دست آمده در این پژوهش با افزایش غلظت کادمیوم خاک زیست‌توده هر سه رقم کلم (زینتی، بروکلی و برگ) به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند. به‌طوری که در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک (معادل ۳۰/۸۵ میلی‌گرم کادمیوم قابل جذب بر کیلوگرم خاک) زیست‌توده کلم زینتی ۱۸/۸۴ درصد، کلم بروکلی ۲۰/۴۴ درصد و کلم برگ ۲۳/۷۵ درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون کادمیوم) کاهش داشتند. بر این اساس می‌توان گفت کلم زینتی مقاومت بیش‌تری به غلظت‌های بالای کادمیوم خاک دارد و کم‌ترین میزان کاهش زیست‌توده را در بالاترین سطح آلودگی خاک به کادمیوم از خود نشان داد. لذا می‌توان از این گیاه زینتی در فضای سبز شهرها، محوطه کارخانجات و مکان‌های آلوده به عنصر کادمیوم استفاده کرد تا بتواند بخش قابل‌توجهی از آلاینده کادمیوم را از خاک جذب کرده و در پالایش خاک‌های آلوده به این عنصر نقش مهمی ایفا کند.

هم‌چنین با افزایش غلظت کادمیوم خاک غلظت کادمیوم در ریشه، ساقه و برگ و هم‌چنین مقدار کادمیوم جذب‌شده توسط هر سه رقم کلم افزایش یافت و غلظت کادمیوم در ریشه بیش‌تر از ساقه و برگ بود. به‌طوری که غلظت کادمیوم ریشه در کلم برگ ۲۸ برابر غلظت کادمیوم برگ، در کلم بروکلی ۱۲ برابر و در کلم زینتی ۴ برابر بود. با توجه به این‌که فاکتور انتقال محاسبه شده برای هر سه رقم کلم کم‌تر از یک و فاکتور تجمع زیستی بیش‌تر از یک بود می‌توان هر سه رقم کلم برگ، کلم بروکلی و کلم زینتی را جزء گیاهان اجتناب کننده عنصر کادمیوم طبقه‌بندی کرد.

REFRENCES

Abbas, M., Parveen, Z., Iqbal, M., Riazuddin, M., Iqbal, S., Ahmed, M. and Bhutto, R. (2010). Monitoring of toxic metals (cadmium, lead, arsenic and mercury) in vegetables of Sindh, Pakistan. Kathmandu University Journal of Science. *Engineering and Technology*. 6: 60-65.

Al-Chaarani, N., El-Nakat, J. H., Obeid, P. J. and Aouad, S. (2009). Measurement of levels of heavy metal contamination in vegetables grown and sold in selected areas in Lebanon. *Jordan Journal of Chemistry*. 4: 303-315.

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.

Alloway, B. J. (1995). Heavy metals in soils, 2nd ed. Blackie Academic and professional. London, England. pp 38-303.

Al-Shehbaz, I. A., Beilstein, M. A. and Kellogg, E. A. (2006). Systematics and phylogeny of the Brassicaceae (*Cruciferae*): an overview. *Plant Systematics and Evolution*. 259: 89-120.

Anderson, C., Brooks, R., Chiarucci, A. and Lacoste, C. (1999). Phytomining for nickel, thallium and gold. *Journal of Geochemical Exploration*. 67: 407-415.

Azevedo, H., Glória Pinto, C. G., Fernandes, J., Loureiro, S. and Santos, C. (2005). Cadmium effects on sunflower growth and photosynthesis. *Journal of Plant Nutrition*. 28: 2211-2220.

Bolan, N. S., Adriano, B. C. and Mani, P. A. (2003). Immobilization and phytoavailibility of cadmium in variable charge soils. II. Effect of lime addition. *Plant and Soil*. 251: 187-198.

Bouyoucos, C. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agronomy Journal*. 54: 464-465p.

Boyd, R. S. and Barbour, M. G. (1986). Relative salt tolerance of Cakile edentula (*Brassicaceae*) from lacustrine and marine beaches. *American Journal of Botany*. 73: 236–241.

Bremner, J. M. (1996). Nitrogen-total. In: Sparks, D. L. *et al*., Method of soil analysis. Published by Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA. pp 1085-1122.

Chaignon, V., Lartiges, B. S., Samrani, A. and Mustin, C. (2002). Evolution of size distribution and transfer of mineral particles between flocs in activated sludges: an insight into floc exchange dynamics. *Water Research*. 36: 676-684.

Chang, Z. M. and Wu, X. H. (2005). Difference comparison of three alfalfa varieties resistant to cadmium pollution. *Pratacult Science*. 22(12), 20-23.

Chen, X., Wang, J., Chi, Y., Zhao, M. Q. and Chi, G. Y. (2011). Effects of cadmium on growth and photosynthetic activities in pakchoi and mustard. *Botanical*. 52: 41-46.

Claussen, W. (2002). Growth, water use efficiency, and proline content of hydroponically grown tomato plants as affected by nitrogen source and nutrient concentration. *Plant Soil*. 247: 199-209.

Codex Alimentarius Commission (FAO/WHO) (2001). Food additives and contaminants. Geneva: Joint FAO/WHO Food Standards Program.

Czech, A., Pawlik, M. and Rusinek, E. (2012). Contents of heavy metals, nitrates and nitrites in Cabbage. *Polish Journal of Environmental Studies*. 21(2), 321-329.

Fang, J., Wen, B., Shan, X., Lin, J. 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: 209-217.

Archive of SID

www.SID.ir

Feng, M. H., Shan, X. Sh., Zhang, Sh., and Wen, B. (2005). A comparison of the rhizosphere based method with DTPA, EDTA, CaCl2, and NaNO3 extraction methods for prediction of bioavailability of metals in soil to barley. *Environmental Pollution*. 137: 231-240.

Fusconi, A., Gallo, C. and Camusso, W. (2007). Effect of cadmium on root apical meristems of *Pisum sativum* L.: cell viability, cell proliferation and microtubule pattern as suitable makers for assessment of stress pollution. *Mutation Research* - Genetic *Toxicology* and *Environmental Mutagenesis*. 632: 9-19.

Haghighi, M., Kafi, M., Taghavi, T. S., Kashi, A. K. and Savabeghi, Gh. R. (2010). Effect of Humic Acid on N, P and Stress Indicators of Lettuce Polluted by Cadmium. *Water and soil science of Journal*. 20(1), 87-98. (In Farsi)

Hellen, L. E. and Othman, O. C. (2014). Levels of selected heavy metals in soil, tomatoes and selected vegetables from Lushoto district-Tanzania. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*. 2(6), 313-319

Helmke, P. H. and Spark D. L. (1996). Potassium. In Sparks, D.L. et al., Method of soil analysis. Published by: Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA. pp. 551-574.

Herath, H. M. D. A. K., Bandara, D. C., Weerasinghe, P. A., Iqba, M. C. M. and Wijayawardhana, H. C. D. (2014). Effect of Cadmium on Growth Parameters and Plant Accumulation in Different Rice (*Oryza sativa* L.) Varieties in Sri Lanka. *Tropical Agricultural Research*. 25(4), 532 – 542.

Jalil, A., Selles, F. and Clark, J. M. (1994). Effect of Cd on growth and uptake of Cd and other elements by durum wheat. *Journal of Plant Nutritio*n. 17: 1839-1858.

Jiang, H. M., Yang, J. C. and Zhang, J. F. (2007). Effects of external phosphorus on the ultrastructure and the chlorophyll content of maize under cadmium and zinc stress. *Environment Pollution*. 147: 750-756.

Joonki, Y., Xinde, C., Qixing, Z. and Lena, Q. (2006). Accumulatuin of Pb, Cu and Zn in native plants growing on a contaminated Fliria site. *Science of the total Environment*. 368: 456-464.

Kabata-Pendias, A. (2011). Trace Elements in Soils and Plants. 4th ed. Boca Raton, Florida: CRC Press.

Khanal, B. R., Shah, S. C., Sah, S. K., Shriwastav, C. P. and Acharya, B. S. (2014). Heavy metals accumulation in cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. Botrytis) grown in brewery sludge amended sandy loam soil. *International Journal of Agricultural Science and Technology*. 2(3), 87-92.

Koleli, N., Eker, S. and Cakmak, I. (2004). Effect of zinc fertilization on cadmium toxicity in dururn and bread wheat grown in Zn deficient soil. *Environment Pollution*. 131: 453-459.

Kupper, h., Zhao, F. and McGhrath, S. (1999). Cellular compartmentaion of zinc in leaves of the hyperaccumulator Thlaspi caerulescens. *Plant Physiology*. 119: 305-311.

Li, F., Li, M. Y., Pan, X. H. and Xu, Y. F. (2004). Biochemical and physiological characteristics in seedlings roots of different rice cultivars under low phosphorus stress. *Chinese Journal of Rice Science*. 18(1), 48-52.

Li, M. S., Luo, Y. P. and Su, Z. Y. (2007). Heavy metal concentrations in soils and plant accumulation in a restored manganese mineland in Guangxi, South China. *Environmental Pollution*. 147: 168-175.

Lindsay, W. L. and Norvel, W. A. (1978). Development of a DTPA soil tests for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal*. 42: 421-428.

Liu, D., Hu, K., Ma, J. Qiu, W. Wang, X. and Zhang, S. (2011). Effects of cadmium on the growth and physiological characteristics of sorghum plants. *African Journal of Biotechnology*. 10(70), 15770-15776.

Liu, L., Hongchun, S., Jing, C., Yongjiang, Z., Dongxiao, L. and Cundong, L. (2014). Effects of cadmium (Cd) on seedling growth traits and photosynthesis parameters in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Plant Omics Journal*. 7(4), 284-290.

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. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part3-Chemical Methods. Soil Science Society of America Inc., Madison, WI, USA, pp. 437-474.

Maria, S., Puschenreiter, M. and Rivelli, A. R. (2013). Cadmium accumulation and physiological responseof sunflower plants to Cd during the vegetative growing cycle. *Plant Soil Environment*. 59(6), 254-261.

Mcfaralane, G. R., Koller, C. E. and Blomberg, S. P. (2007). Accumulation and partitioning of heavy metals in mangroves: A synthesis of field-based studies. *Chemosphere*. 69: 1454-1464.

McGrath, S., Zhao, F. and Lombi, E. (2002). Phytoremedition of metals, metalloids and radionuclides. *Advances in Agronomy*. 75: 1-56.

Meena, O., Garg, A., Kumar, Y. and Pandey, R. (2011). Electro analytical procedure for determination of heavy metals in *Brassica oleraceae* ver. Botrytis. *International Journal of ChemTech Research*. 3(3), 1596-1603.

Megdiche, W, Ben-Amor N. and Bebez, A. (2007). Salt tolerance of the annual halophyte Cakile maritima as affected by the provenance and the developmental stage. *Acta Physiologiae Plantarum*. 29: 375-384.

Memon, A., Aktoprakligil, D., Ozdemir, A. and Vertii, A. (2001). Heavy metal accumulation and detoxification mechanisms in plants. *Turkish Journal of Botany*. 25: 111-121.

Olowoyo, J. O., Heerden, E., Fischer, J. L. and Baker,

Archive of SID

www.SID.ir

C. (2010). Trace metals in soil and leaves of Jacaranda mimosifolia in Tshwane area, South Africa. *Atmospheric Environment*. 44: 1826-1830.

Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S. and Dean, L. A. (1954). Estimation of available phosphorous in soil by extraction with sodium bicarbonate. United States Department of Agriculture. United States Goverment. Print Office, Washington, D. C.

Omale, J. and Emmanuel, U. C. (2011). Comparative studies on the protein and mineral composition of some selected Negerian vegetables. *African Journal of Food Science*. 5(1), 22- 25.

Osma, E., Serin, M., Leblebic, Z. and Aksoy, A. (2012). Heavy metals accumulation in some vegetables and soils in Istanbul. *Ekoloji*. 21: 82.1-8.

Oti, W. J. O. and Nwabue, F. I. (2013). Heavy metals effect due to contamination of vegetables from Enyigba lead mine in Ebonyi state, Nigeria. *Environment and Pollution*. 2(1), 19-26.

Ouzounıdou, G., Moustakas, M. and Eleftheriou, E. P. (1997). Physiological and ultrastructural effects of cadmium on wheat (*Triticum aestivum* L.) leaves. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 32: 154-60.

Page, A. L. (1982). Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties. *Soil Science Society of America*. SSSA Book Series 5. R. W. Weaver, J. S. Angle, and P. S. Bottomley (ed). Madison, Wisconsin, USA. 41-44.

Przedpelska, E. and Wierzbicka, M. (2007). *Arabidopsis arenosa* (*Brassicaceae*) from lead-zinc waste heap in southern Poland – a plant with high tolerance to heavy metals. *Plant Soil*. 299: 43-53.

Qian, H., Li, J., Sun, L., Chen, W., Sheng, G. D., Liu, W. and Fu, Z. (2009). Combined effect of copper and cadmium on *Chlorella vulgaris* growth and photosynthesis-related gene transcription. *Aquat Toxicol*. 94: 56-61.

Qin, T. C., Ruan, J. and Wang, L. J. (2000). Effects of cadmium on plant photosynthesis. *Environmental Science and Technology*. 13: 33-35.

Rhoades, J. D. (1982). Cation exchange capacity. in A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney (ed), Methods of soil analysis, part 2. Chemical and microbiological properties. *American Society of Agronomy*, Madison, Wisconsin, USA. 149-158.

Saglam, C. (2013). Heavy metal accumulation in the edible parts of some cultivated plants and media samples from a volcanic region in Southern Turkey. *Ekoloji*. 22: 86.1-8.

Shariat, a., Assareh, M. H. and Ghamari-Zare, A. (2010). Effects of cadmium on some physiological characteristics of *Eucalyptus occidentalis*. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*. 14(53), 145-154. (In Farsi)

Sharma, P. and Dubey, R. S. H. (2005). Lead toxicity in Plants. *Plant Physiology*. 17: 35-52.

Sohrabi Yourtchi, M. and Bayat, H. R. (2013). Effect of cadmium toxicity on growth, cadmium accumulation and macronutrient content of durum wheat (Dena CV.). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. 6(15), 1099-1103.

Walkley, A. and Black, I. A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37: 29-38.

Warwick, S. I. (2011). Brassicaceae in agriculture. In: Schmidt R, Bancroft I (eds) Genetics and genomics of the *Brassicaceae*. Plant genetics and genomics: crops and models, Springer, New York. 9: 33-65.

Wenzel, W. W. (2009). Rhizosphere processes and management in plant-assisted bioremediation (phytoremediation) of soils. *Plant Soil*. 321: 385-408.

Wu, L. (1990). Colonisation and establishment of plants in contaminated sites. In: Shaw A. J. (ed.): Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects. CRC Press, Boca Raton. pp 269-284.

Xue, Z. C., Gao, H. Y. and Zhang, L. T. (2013). Effects of cadmium on growth, photosynthetic rate and chlorophyll content in leaves of soybean seedlings. *Biologia Plantarum*. 57: 585-590.

Yan-de, J., Zhen-li, H. and Xiao, Y. (2007). Role of soil rhizobacteria in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Zhejiang University Science*. 8(3), 197-207.

Yildiz, N. (2005). Response of tomato and corn plants to increasing Cd levels in nutrient culture. *Pakistan Journal of Botany*. 37(3), 593-599.

Archive of SID

www.SID.ir