تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۹، شماره ۱، فروردین و اردیبهشت ۱۳۹۷ (ص۱۵۸-۱۴۵) DOI: 10.22059/ijswr.2017.230511.667654

بررسی توانایی جذب و انتقال سرب در سه رقم کلم

سمانه عبداللهی*[1]، احمد گلچین[2]

۱- دانشجوی دکتری گروه خاکشناسی،دانشگاه زنجان

۲- استاد گروه خاکشناسی، دانشگاه زنجان

(تاریخ دریافت: ۱۴/ ۱/ ۱۳۹۶- تاریخ بازنگری: ۲۸/ ۳/ ۱۳۹۶- تاریخ تصویب: ۳۱/ ۵/ ۱۳۹۶)

چکیده

به منظور بررسی توانایی جذب و انتقال سرب در سه رقم کلم یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در شرایط گلخانه به اجرا درآمد. تیمارها شامل شش سطح آلودگی خاک به سرب (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک از منبع نیترات سرب [$Pb(NO_3)_2$]) 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 داده‌ها نشان داد که تیمارها اثر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد ($P<0.01$) بر عملکرد تر و خشک، سطح برگ و شاخص کلروفیل برگ هر سه رقم کلم داشتند. با افزایش غلظت سرب خاک، انباشت سرب در ریشه، ساقه و سر کلم در رقم‌های مختلف به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در کلم زینتی و کلم بروکلی انباشت سرب در ریشه>ساقه>سر کلم بود در حالی‌که در کلم برگ انباشت در سر کلم>ساقه>ریشه بود. بیش‌ترین مقدار سرب جذب شده متعلق به کلم برگ (۲/۶۴ میلی‌گرم در گلدان) بود و کلم بروکلی (۱/۸۵ میلی‌گرم در گلدان) و کلم زینتی (۰/۸۶ میلی‌گرم در گلدان) به ترتیب در مقام‌های بعدی قرار گرفتند. فاکتور انتقال برای رقم‌های کلم زینتی و کلم بروکلی کم‌تر از یک و برای رقم کلم برگ بیش‌تر از یک بود اما فاکتور تجمع زیستی برای هر سه رقم کلم (زینتی، بروکلی و برگ) کم‌تر از یک بود. بر اساس استاندارد (FAO/WHO) مشاهده شد که کم‌ترین و بیش‌ترین غلظت سرب در هر سه رقم مورد مطالعه بیش‌تر از مقدار مجاز آن است. لذا با در نظر گرفتن این موضوع برای کاهش احتمال انتقال سرب به زنجیره غذایی لازم است در صورت کشت ارقام کلم بروکلی و کلم برگ در زمین‌های آلوده به فلزات سنگین قبل از عرضه این محصولات به بازار، غلظت این فلزات در بخش خوراکی آن‌ها اندازه‌گیری شود.

واژه‌های کلیدی: براسیکا، فاکتور انتقال، فاکتور تجمع زیستی، گیاه‌پالایی.

مقدمه

آلودگی خاک و زوال محیط زیست به‌عنوان یک مشکل جدی و چالش برانگیز، مخاطراتی را برای انسان به‌وجود آورده است. افزایش جمعیت، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع طبیعی و فرسایش خاک، آلودگی بخش‌های بزرگی از کره زمین را در طول قرن گذشته باعث شده‌اند. چنین وضعی، آگاهی و احساس مسئولیت را در کشورهای توسعه یافته برانگیخته است (Alloway, 1995; Jalil *et al*, 1994). از مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین آلاینده‌ها که ورودشان به محیط زیست باعث بروز بیماری‌های مختلف در انسان می‌شود، فلزات سنگین[1] هستند که به دلیل ماندگاری بسیار بالا در محیط و عدم تجزیه توسط زیست جانداران خاک و امکان ورود به چرخه غذایی[2] انسان از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (Papa *et al*., 2010). از جمله فلزات سنگین می‌توان به سرب، روی، مس، نیکل و کادمیوم اشاره نمود که در چند دهه اخیر از نظر زیست محیطی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند (Mirsal, 2008).

سرب یکی از فلزات سنگین و آلاینده‌های مهم زیست‌بوم خشکی است که علاوه بر فرایندهای طبیعی از طریق فعالیت‌های انسانی (دود خروجی از اتومبیل‌ها، فعالیت کارخانه‌ها، تولید باطری، مصرف آفت‌کش‌ها و غیره) نیز تولید می‌شود. سرب به دلیل انباشت زیاد در بخش‌های سطحی خاک به راحتی در دسترس گیاهان قرار می‌گیرد و با جذب از طریق ریشه‌ها موجب تغییر در برخی فرایندهای متابولیکی گیاه و اختلال در رشد و نمو آن‌ها می‌شود (Parsadoost *et al*., 2007). از سوی دیگر سرب فلزی است سمی که به اعصاب آسیب رسانده و موجب بیماری‌های خونی و عفونی مختلف می‌شود (Amini *et al*., 2005). غلظت بحرانی سرب کل در خاک بین ۱۰۰ تا ۴۰۰

* نویسنده مسئول: Samaneh.abdollahi87@yahoo.com

1. Heavy metals
2. Food chain

میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک گزارش شده است (Alloway, 1995; Attanayake *et al*., 2014; Defoe *et al*., 2014). گیاهان توانایی زیادی در جذب سرب از طریق ریشه‌های خود دارند در حالی‌که انتقال سرب به بخش‌های هوایی گیاهان بسیار محدود انجام می‌شود (Lane and Martin, 1977; Patra *et al*. 2004). از جمله اثرات منفی سرب بر رشد گیاهان می‌توان به اثر آن در کاهش ارتفاع گیاه، کاهش سطح برگ، کاهش زیست‌توده ریشه و بخش‌های هوایی، کاهش عملکرد و کاهش غلظت کلروفیل اشاره کرد (Sharma and Dubey, 2005).

روش‌های موجود برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین پرهزینه بوده و باعث از بین رفتن ساختمان خاک و غیرفعال شدن خاک از لحاظ بیولوژیکی 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 هستند که فلزات سنگین را در بافت‌های خود ذخیره می‌سازند و آثار ناشی از سمیت فلز در این گیاهان زرد شدن، چروکیدگی و پیری زودرس برگ‌ها با توجه به نوع و غلظت فلز در محیط رشد است که به آن‌ها گیاهان شاخص[2] گفته می‌شود. 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 هستند که با استفاده از سازوکار تثبیت گیاهی (Phytostabilization) به‌طور مؤثری از ورود فلز به بخش‌های هوایی خود، علی‌رغم غلظت‌های زیاد فلزات سنگین در خاک، جلوگیری می‌کنند و به گیاهان اجتناب کننده[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 سنگین در ریشه‌های خود باشند. در گیاهان اجتناب کننده، TF کوچک‌تر از یک و BCF بزرگ‌تر از یک است (Joonki *et al*., 2006; Mcfaralane *et al*., 2007). دسته سوم گیاهانی هستند 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).

فاکتور تجمع زیستی به مهم‌ترین ویژگی‌های گیاهی در گیاه‌پالایی از قبیل جذب فلزات، تحرک آن‌ها به بخش‌های هوایی گیاه و ذخیره‌سازی در زیست‌توده بخش‌های هوایی گیاه اشاره دارد (McGrath and Zhao, 2003). Pachura *et al*., (2016) فراهمی فلزات سنگین در گیاهان را بر اساس فاکتور انتقال و فاکتور تجمع زیستی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد فاکتور انتقال برای فلزات روی و کادمیوم بالاتر از سرب بود. هم‌چنین فلز روی حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد، کادمیوم حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد و سرب بسیار پایین‌تر (در حداکثر مقدار) حدود ۱۰ درصد به بخش‌های هوایی گیاه انتقال یافتند. Balabanova *et al*., (2015) در مطالعه‌ای فاکتور انتقال را برای سرب و کادمیوم بیش‌تر از یک گزارش کردند. آن‌ها هم‌چنین بیان کردند بیش‌ترین مقدار فاکتور تجمع زیستی در بین فلزات سنگین آرسنیک، کادمیوم، مس، نیکل، سرب و روی متعلق به کادمیوم بود. Ndeda and Manohar, (2014) با بررسی فاکتور تجمع زیستی و فاکتور انتقال فلزات سنگین گزارش کردند کادمیوم بالاترین فاکتور تجمع زیستی را در بین فلزات سنگین دارد و در سایر فلزات به ترتیب مس> سرب > نیکل است. هم‌چنین سرب کم‌ترین مقدار فاکتور انتقال را در بین سایر فلزات سنگین داشت. Rezvani and Zaefarian, (2011) فاکتور تجمع زیستی و فاکتور انتقال سرب و کادمیوم را در گیاه *Aeluropus littoralis* بررسی کردند. آن‌ها فاکتور تجمع زیستی سرب را کم‌تر از یک و فاکتور انتقال سرب را بیش‌تر از یک گزارش کردند.

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).

1. Phytoremedation
2. Metal indicator
3. Translocation Factor
4. BioConcentration Factor
5. Metal excluders
6. Metal accumulator
7. Brassicaceae

گیاهان این خانواده محدوده متفاوتی از تنش شوری و عناصر سمی را تحمل می‌کنند (Boyd and Barbour 1986; Megdiche *et al*., 2007). از جمله عناصر سمی که برخی از گیاهان این خانواده قادر به تحمل غلظت‌های بالای آن‌ها هستند می‌توان به کادمیوم، نیکل، سرب، سلنیوم و روی اشاره کرد (Ghaderian *et al*., 2007; Przedpelska and Wierzbicka 2007; Warwick 2011). با توجه به این که گونه *B*rassica 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 توانایی جذب و انتقال سرب در برخی از رقم‌های معروف این گونه شامل کلم پیچ یا کلم برگ[1] (*Brassica oleracea var. capitata* L.)، کلم زینتی[2] (*Brassica oleracea var. acephala* L.) و کلم بروکلی[3] (*Brassica oleracea var. italic*a L.) انجام شد. هم‌چنین تأثیر سرب بر برخی پارامترهای فیزیولوژیکی این رقم‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی توانایی تولید بیوماس و جذب و انتقال سرب در سه رقم کلم یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سال ۱۳۹۴ به‌صورت گلخانه‌ای اجرا شد. تیمارها شامل شش سطح آلودگی خاک به سرب (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک) از منبع نیترات سرب [$Pb(NO_3)_2$] 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. با توجه به این‌که نیترات سرب نسبت به سایر نمک‌های سرب حلالیت بیشتری دارد از این نمک برای آلوده کردن خاک به سرب استفاده گردید و چون از مقادیر مختلف این نمک برای تأمین سرب سطوح مختلف آلودگی استفاده شد، به همین دلیل سطح نیتروژن کلیه تیمارها با افزودن نیترات آمونیوم یکسان گردید. 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 نیترات سرب که در آب مقطر حل شده بود، به منظور به تعادل رسیدن آن‌ها، تمام گلدان‌ها به مدت ده 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 قابل جذب سرب در آن پس از عصاره‌گیری با DTPA اندازه‌گیری گردید (Lindsay and Norwell, 1978). با توجه به این‌که از هفته هشتم به بعد غلظت سرب قابل جذب تغییرات اندکی داشت لذا به نظر رسید که نمونه‌ها بعد از گذشت ده هفته به تعادل نسبی رسیده‌اند، به همین منظور کشت نشاء بعد از گذشت مدت ده هفته خوابانیدن انجام شد.

پس از بررسی چندین خاک از لحاظ بافت و غلظت سرب قابل جذب، خاک مورد استفاده در آزمایش از یک خاک زراعی با کم‌ترین غلظت سرب 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 سرب (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 شامل: آهن، روی، مس و منگنز (Page, 1982)، واکنش خاک (Thomas, 1996)، قابلیت هدایت الکتریکی (Rhoades, 1996)،ماده‌آلی‌خاک (Walkley and Black, 1934)، کربنات کلسیم معادل (Loeppert and Suarez, 1996) و بافت خاک (Bouyoucos, 1962) اندازه‌گیری شدند.

نشاهای ارقام مختلف کلم در آذر ماه 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 اسفند ماه، بخش‌های هوایی و ریشه گیاه از یکدیگر جدا

1. Cabbage
2. Ornamental Cabbage
3. Broccoli

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 سرب 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 سانتی‌گراد 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 سرب در عصاره حاصل بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم توسط دستگاه جذب اتمی مدل Varian Spectr. AA20 قرائت شد.

فاکتور انتقال (TF) یا میزان انتقال آلاینده سرب 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 آلاینده سرب 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 سرب کل زیست‌توده از حاصل‌ضرب غلظت عنصر سرب 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.

نتایج و بحث

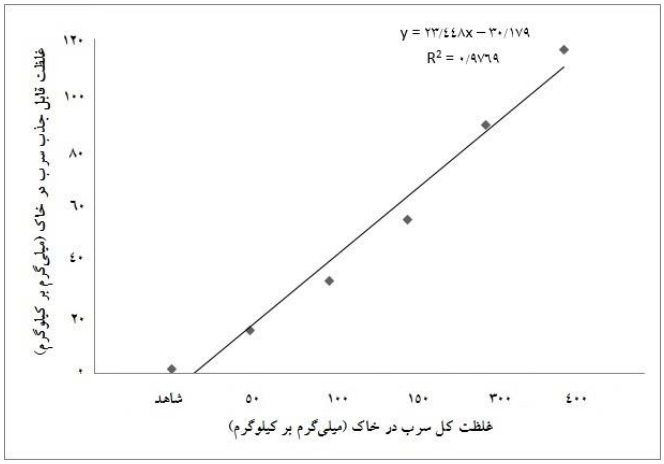
خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش قبل از اعمال تیمارها در جدول (۱) و غلظت قابل جذب سرب خاک بعد از گذشت ده هفته خوابانیدن در جدول (۲) ارائه شده است. رابطه خطی بین غلظت کل سرب و غلظت قابل جذب آن در خاک در شکل (۱) به‌خوبی مشاهده می‌شود.

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

صفت	مقدار	واحد	صفت	مقدار	واحد
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	سرب قابل جذب	۱/۴۶	میلی‌گرم بر کیلوگرم
اسیدیته خاک	۷/۷۷	-			

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

غلظت کل سرب (مقادیر اسپری شده)	غلظت قابل جذب سرب (بعد از گذشت ده هفته و قبل از کشت)
شاهد	۱/۴۶
۵۰	۱۵/۲۱
۱۰۰	۳۳/۱۰
۱۵۰	۵۵/۴۶
۳۰۰	۸۹/۶۳
۴۰۰	۱۱۶/۴۷



شکل ۱- همبستگی بین غلظت کل و غلظت قابل جذب سرب در خاک بعد از دوره خوابانیدن

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

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر غلظت سرب خاک، نوع رقم کلم و اثر متقابل آن‌ها بر برخی از صفات مورد مطالعه

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات									
		عملکرد تر	عملکرد خشک	سطح برگ	شاخص کلروفیل برگ	ریشه	انباشت سرب ساقه	سر (بخش خوراکی)	جذب کل زیست توده	فاکتور انتقال	فاکتور تجمع زیستی
		گرم در گلدان		سانتی‌مترمربع	-	میلی‌گرم بر کیلوگرم			میلی‌گرم در گلدان		
نوع رقم کلم	۲	۱۷۸۳۵۰/۳۱**	۱۰۵۵/۸۰**	۵۱۳۵۳۴/۹۹**	۱۴۳۲۲/۴۱**	۵۷۱۸/۱۲**	۲۹۳۳/۷۳**	۱۳۵۷۳/۰۴**	۸/۵۸**	۱۴/۵۱**	۰/۱۷**
سطوح آلودگی خاک	۵	۳۳۴۰/۸۲**	۶۱/۰۹**	۴۱۴۲/۸۸**	۹۰۱/۰۸**	۹۲۲۴/۷۶**	۱۱۲۷۸/۴۵**	۷۶۶۱/۵۴**	۴/۲۹**	۱/۱۵**	۰/۴۴**
نوع رقم کلم × سطوح آلودگی خاک	۱۰	۲۸۱/۶۸**	۱۱/۶۷**	۱۳۶/۸۵**	۲۵۱/۳۸**	۷۰۲/۲۱**	۲۱۹/۷۲**	۶۹۱/۳۶**	۰/۴۳**	۰/۴۵**	۰/۰۲**
خطا	۳۶	۵/۵۸	۰/۷۹	۶/۹۷	۱/۱۳	۱/۶۱	۰/۸۳	۲/۴۵	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۱
درصد ضریب تغییرات	-	۱/۲۴	۴/۹۵	۰/۷۶	۲/۸۱	۲/۳۵	۱/۶۷	۳/۶۱	۱/۳۳	۵/۶۸	۳/۶۵

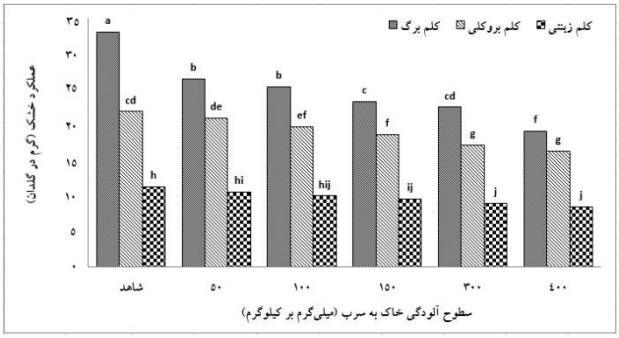
** و * به ترتیب در سطح ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار و ns اختلاف معنی‌دار نیست.

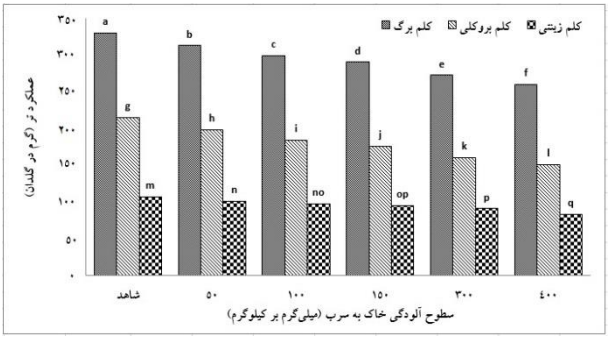
عملکرد تر و خشک

با مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل سطوح مختلف سرب و نوع رقم بر عملکرد تر و خشک گیاه کلم مشاهده گردید که در تیمار شاهد (بدون سرب) بیش‌ترین میزان عملکرد تر و خشک مربوط به کلم برگ (به ترتیب ۳۳۰/۵۰ و ۳۳/۱۱ گرم در گلدان) و کم‌ترین میزان عملکرد تر و خشک مربوط به کلم زینتی (به ترتیب ۸۳/۰۲ و ۸/۴۳ گرم در گلدان) می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۲) نیز مشاهده می‌گردد با افزایش سطوح آلودگی خاک به سرب عملکرد تر و خشک گیاه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. به طوری که عملکردهای تر و خشک در تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک در کلم زینتی به ترتیب ۲۲/۴۰ و ۲۵/۰۲ درصد، در کلم بروکلی به ترتیب ۲۹/۶۸ و ۲۵/۴۸ درصد و در کلم برگ به ترتیب ۲۱/۳۵ و ۴۲/۲۸ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافتند. بنابراین می‌توان گفت که میزان کاهش زیست‌توده با افزایش غلظت سرب خاک در کلم زینتی کم‌تر بوده است و این رقم از مقاومت بیش‌تری نسبت به دو رقم دیگر برخوردار است.

Sharma and Dubey (2005) بیان کردند تنش فلزات

سنگین از جمله عوامل محدود کنندهٔ رشد ریشه است. 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 قسمت‌های مختلف گیاه و از جمله کاهش زی‌توده و سطح برگ می‌شود (Sharma and Dubey, 2005). کاهش رشد ریشه و بخش هوایی تحت تنش سرب می‌تواند به دلیل تجمع زیاد سرب در ریشه، لیگنینی شدن دیواره سلولی تحت تأثیر فلز سنگین (Almeida *et al*., 2007)، تأثیر مستقیم فلز سنگین بر هسته سلولی (Dauda *et al*., 2009) و برهم‌کنش فلزات سنگین با گروه‌های سولفیدریل غشا سلول‌ها و غیرفعال کردن آن‌ها (Khudsar *et al*., 2000) باشد. Sinha *et al*., (2006) گزارش کردند با افزایش سطح سرب در خاک عملکرد و اندازه سر کلم کاهش یافت. Karimi *et al*., (2013) کاهش زیست‌توده ریشه و ساقه و محتوای کلروفیل برگ‌های گیاه کنگرفرنگی را با افزایش غلظت سرب در محلول غذایی گزارش کرده‌اند.





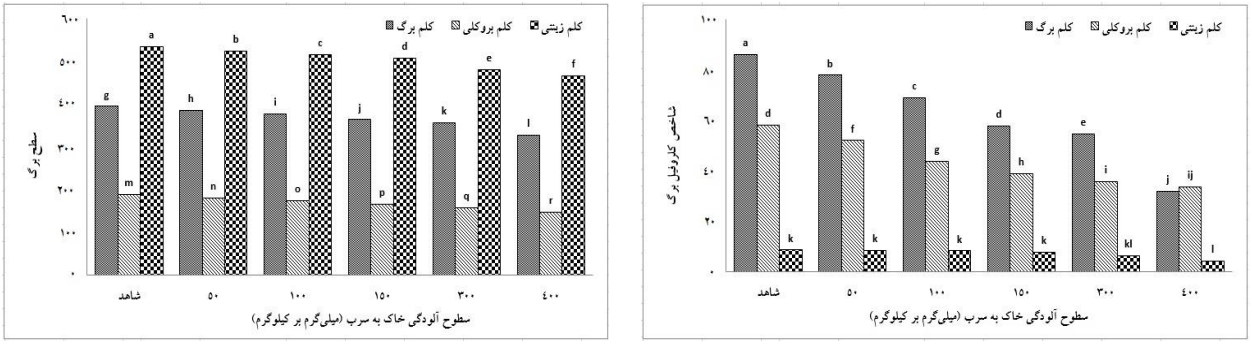
شکل ۲- اثر متقابل سطوح مختلف سرب خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و نوع رقم بر عملکرد تر و خشک گیاه کلم.

سطح برگ بوته 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 نشان داد که بیش‌ترین مقدار سطح برگ بوته (۵۳۳/۹۰ سانتی‌متر مربع) مربوط به کلم زینتی و تیمار شاهد و کم‌ترین مقدار سطح برگ بوته (۱۴۷/۰۳ سانتی‌متر مربع) مربوط به کلم بروکلی و تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک بود. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود در هر سه رقم کلم با افزایش سطح آلودگی خاک به سرب سطح برگ بوته کاهش یافت. به‌طوری که سطح برگ بوته در تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک در سه رقم کلم (زینتی، بروکلی و برگ) به ترتیب ۱۲/۵۹، ۲۱/۸۴ و ۱۶/۹۲ درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون سرب) کاهش یافت. نتایج مشابهی در کاهش سطح برگ گیاه آفتابگردان (Kastori *et al*., 1998)، کلم (Sinha *et al*., 2006)، کرچک (Romeiro *et al*., 2006)، گوجه‌فرنگی (Akinci *et al*., 2010) و ذرت (Tafvizi and Motesharezadeh, 2014) تحت تنش سرب گزارش شده است.

فتوسنتز مهم‌ترین و اساسی‌ترین فرایند بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی گیاه است. با بررسی میانگین شاخص کلروفیل برگ مشخص گردید که بیش‌ترین مقدار شاخص کلروفیل برگ (۸۶/۱۳) مربوط به کلم برگ و تیمار شاهد (بدون سرب) و کم‌ترین مقدار آن (۴/۲۹) مربوط به کلم زینتی و تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک بود. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود با افزایش سطح آلودگی خاک به سرب مقدار شاخص کلروفیل برگ در هر سه رقم کلم به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. به‌طوری‌که شاخص کلروفیل برگ در تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک در سه رقم کلم (زینتی، بروکلی و برگ) به ترتیب ۵۰/۲۹، ۴۰/۰۴ و ۶۳/۰۵ درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون سرب) کاهش یافت.

به نظر می‌رسد دلیل کاهش شاخص کلروفیل برگ در اثر آلودگی سرب، کاهش بیوسنتز کلروفیل از طریق کاهش غلظت عناصر ضروری منیزیم و آهن در برگ‌ها و ایجاد کمپلکس با پروتئین‌های فتوسنتزی و افزایش فعالیت کلروفیلاز جهت تجزیه کلروفیل باشد. هم‌چنین سرب می‌تواند جایگزین منیزیم در مولکول کلروفیل شود که این جایگزینی سبب کاهش دریافت نور به‌وسیله کلروفیل و در نتیجه کاهش فتوسنتز گردد (Sharma and Dubey, 2005).



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

غلظت سرب در ریشه، ساقه و سر کلم

بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت سرب ریشه در کلم زینتی به‌ترتیب به میزان ۱۰۵/۲۱ و ۵/۰۹، در کلم بروکلی به ترتیب به میزان ۱۱۰/۷۷ و ۴/۸۲ و در کلم برگ به ترتیب به میزان ۴۶/۲۰ و ۴/۰۷ میلی‌گرم در کیلوگرم اندازه‌گیری گردید. بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت سرب ساقه در کلم زینتی به ترتیب به میزان ۷۰/۱۴ و ۳/۶۲، در کلم بروکلی به ترتیب به میزان ۱۰۰/۸۷ و ۳/۲۸ و در کلم برگ به ترتیب به میزان ۹۹/۶۴ و ۱/۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم به دست آمد. بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت سرب سر در کلم زینتی به ترتیب به میزان ۶۲/۳۵ و ۱/۴۰ در سر کلم بروکلی (بخش خوراکی) به ترتیب به میزان ۴۹/۰۴ و صفر (زیر حد تشخیص دستگاه) و در سر کلم برگ (بخش خوراکی) به ترتیب به میزان ۱۰۹/۱۱ و ۱/۵۲ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده گردید. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود بیش‌ترین غلظت سرب ریشه، ساقه و سر در هر سه رقم کلم در بالاترین سطح آلودگی خاک به سرب (۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک) و کم‌ترین مقدار آن در تیمار شاهد (بدون سرب) اندازه‌گیری گردید. در هر سه رقم کلم با افزایش سطح سرب خاک، غلظت سرب ریشه، ساقه و سر نیز به‌طور معنی‌داری افزایش یافت.

با مقایسه میانگین‌های غلظت‌های سرب ریشه، ساقه و سر در رقم‌های مختلف کلم مشاهده شد غلظت سرب در اندام‌های مختلف کلم زینتی و کلم بروکلی به صورت زیر بود:

ریشه>ساقه>سر کلم

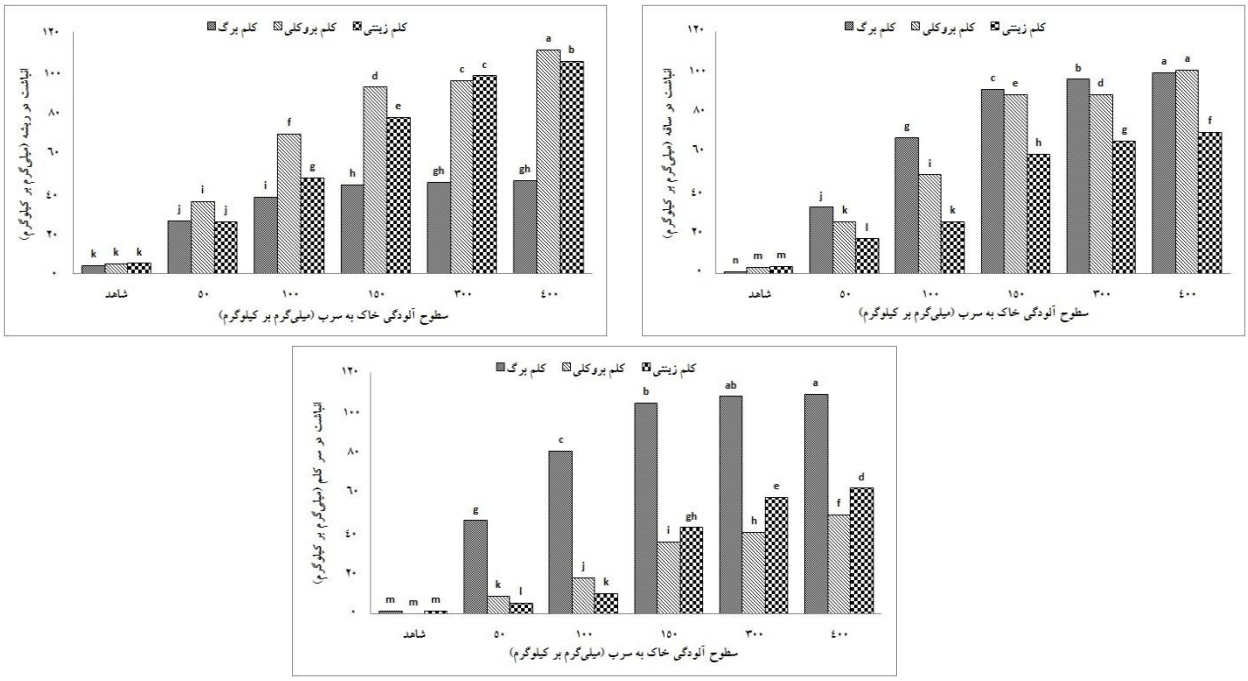
یعنی بیش‌ترین غلظت سرب در ریشه صورت گرفته است و با حرکت به سمت سر (بخش خوراکی) از غلظت سرب کاسته شده است. این امر نشان دهنده توانایی قابل توجه بخش ریشه در ذخیره و انباشت سرب و مقاومت گیاه در انتقال سرب از ریشه به اندام‌های هوایی است.(Sinha *et al*., (2006 نیز غلظت بیش‌تر سرب در ریشه کلم را نسبت به شاخساره گزارش کرده‌اند. آن‌ها دلیل این امر را رقابت مستقیم بین سرب و سایر عناصر ضروری برای مکان‌های جذب مشابه بیان کردند. محققین راه‌های متعددی را برای محدود کردن انتقال سرب از ریشه به اندام‌های هوایی بیان کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به: جلوگیری از تحرک سرب از طریق پکتین‌های دارای بار منفی در دیواره سلولی (Arias *et al*., 2010)، رسوب کردن سرب در فضاهای بین سلولی به صورت نمک‌های نامحلول سرب (Meyers *et al*., 2008)، تجمع سرب در غشای پلاسمایی (Jiang and Liu, 2010)، دفع سرب از طریق پروتئین‌های انتقال دهنده سلول‌های پوست ریشه به بیرون از سلول اشاره نمود (Maestri *et al*., 2010). بالاتر بودن غلظت سرب در ریشه نسبت به اندام‌های هوایی توسط محققین دیگری نیز بیان شده است. مطالعات انجام شده توسط Soltani *et al*., (2006) نشان داد گیاه براسیکا قادر است حدود ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک سرب را در اندام هوایی انباشته کند و میزان انباشت سرب در ریشه‌ها حدود ۱۰ برابر بخش هوایی آن می‌باشد. Karimi *et al*., (2013) بیان کردند در گیاه کنگر فرنگی با افزایش غلظت سرب در محیط، میزان انباشت سرب در ریشه و ساقه افزایش یافت ولی میزان انباشت سرب در ریشه‌ها بیشتر از ساقه‌ها بود. Tafvizi and Motesharezadeh, (2014) گزارش کردند با افزایش غلظت سرب در خاک، غلظت سرب در ریشه و اندام‌های هوایی ارقام مختلف ذرت به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. هم‌چنین غلظت سرب در ریشه بیش‌تر از اندام هوایی بود. نتایج Toolabi *et al*., (2014) در بررسی تجمع فلزات سنگین در بخش هوایی و ریشه تربچه نشان داد که ریشه تربچه نسبت به بخش هوایی آن، مقادیر بیش‌تری فلزات سنگین را در خود انباشته کرده بود. در بررسی غلظت عنصر سرب در گل کلم، بالاترین غلظت سرب در برگ کلم ۵/۳۶ میکروگرم بر گرم و در گل کلم ۰/۵۹ میکروگرم بر گرم اندازه‌گیری شد. این نتایج نشان می‌دهد که عنصر سرب در گل کلم به ترتیب در ریشه بیشتر از برگ و در برگ بیشتر از سر کلم تجمع می‌کند و کمترین مقدار

این عنصر در بخش خوراکی کلم وارد می‌شود (Khanal *et al.*, 2014).

این در حالی است که در کلم برگ عکس این قضیه اتفاق افتاده است:

سر کلم>ساقه>ریشه

یعنی بیش‌ترین غلظت سرب در سر کلم (بخش خوراکی) مشاهده شد (شکل ۴).



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

با مقایسه غلظت‌های سرب به دست آمده از این تحقیق در سر کلم (بخش خوراکی) ارقام مورد بررسی با غلظت مجاز سرب در گیاه کلم براساس استاندارد (FAO/WHO) که ۰/۳ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم وزن خشک می‌باشد، مشاهده شد کم‌ترین و بیش‌ترین غلظت سرب در هر سه رقم مورد مطالعه (بجز تیمار شاهد برای رقم کلم بروکلی که غلظت سرب زیر حد تشخیص دستگاه بود) بیش‌تر از مقدار مجاز است. دلیل بالا بودن غلظت سرب در تیمار شاهد را می‌توان غلظت سرب قابل جذب خاک مورد استفاده در آزمایش دانست که دارای ۱/۴۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب قابل جذب بود.

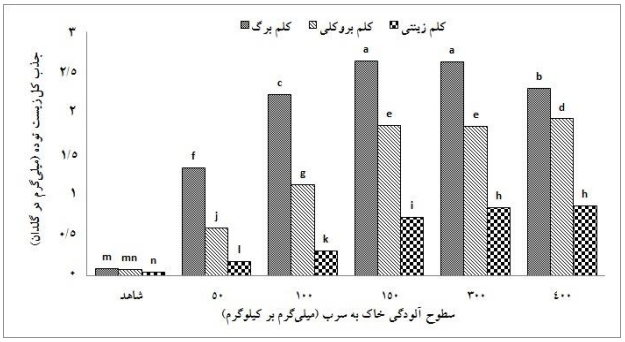
هم‌چنین مشاهده شد در بالاترین سطح آلودگی خاک به سرب (۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک) غلظت سرب در سر کلم زینتی ۹۷/۷۵ درصد، در سر کلم بروکلی ۱۰۰ درصد و در سر کلم برگ ۹۸/۶۱ درصد نسبت به گیاهان مشابه خود در تیمار شاهد افزایش یافتند. این نتایج بیانگر آن است که هر سه رقم کلم (زینتی، بروکلی و برگ) قادر بودند در خاک آلوده به ۴۰۰ میلی‌گرم سرب کل یا ۱۱۶/۴۷ میلی‌گرم سرب قابل جذب حدود صد برابر گیاهان مشابه خود در خاک شاهد سرب در اندام هوایی خود ذخیره کنند بدون این‌که آسیبی به گیاه برسد. این نتایج نشان دهنده توانایی بالای رقم‌های مورد بررسی در جذب و انتقال سرب است. Wierzbicka (1995) بیان کرد در بسیاری از گیاهان سرب می‌تواند صدها برابر بیش از حد مجاز ارایه شده در گیاه تجمع یابد که با نتایج به دست آمده از این مطالعه مطابقت دارد.

پژوهشگران مختلف غلظت‌های متفاوتی از این عنصر را در گیاه کلم گزارش کرده‌اند. در تحقیقی بر روی سه رقم کلم پیچ، بالاترین غلظت سرب جذب شده در بخش هوایی ۳۴/۶، ۳۸/۳ و ۴۰ نانوگرم بر گرم وزن خشک گزارش گردید که بسیار پایین‌تر از غلظت‌های گزراش شده در این ارقام است (Chollet and Brock, 2008). در مطالعه دیگری غلظت سرب در گیاه گل کلم ۶/۱۸۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گزارش شده است (Meena *et al.*, 2011). Osma *et al.*, (2012) بیشترین غلظت سرب در کلم زینتی را ۷۲/۴۸ میکروگرم بر گرم وزن خشک گزارش کردند. در مطالعه‌ای غلظت سرب در کلم بروکلی، کلم پیچ، گل‌کلم، کلم سفید، کلم قرمز و کلم چینی به ترتیب ۰/۵، ۰/۳، ۰/۳۴، ۰/۲۸، ۰/۶ و ۰/۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه گزارش شد که بیش از غلظت مجاز سرب در گیاه کلم بود (Czech *et al.*, 2012). Mohajer *et al.*, (2014) در بررسی غلظت سرب و کادمیوم در محصولات کشاورزی (کاهو، کلم، پیاز و چغندر) استان اصفهان، حداکثر غلظت سرب در سر

کلم را ۴/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گزارش کردند که بیش‌تر از غلظت مجاز سرب در گیاه کلم بود.

جذب سرب کل زیست‌توده در ارقام مختلف کلم

مقایسه میانگین‌های جذب سرب در رقم‌های مختلف کلم نشان داد که بیش‌ترین مقدار سرب جذب شده (۲/۶۴ میلی‌گرم در گلدان) متعلق به کلم برگ بود. کلم بروکلی با ۱/۸۵ میلی‌گرم در گلدان و کلم زینتی با ۰/۸۶ میلی‌گرم در گلدان جذب سرب در مقام‌های بعدی قرار گرفتند (شکل ۵). هم‌چنین در کلم زینتی بیش‌ترین مقدار جذب سرب توسط گیاه در بالاترین سطوح آلودگی خاک به سرب (۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم سرب کل بر کیلوگرم خاک) و کم‌ترین مقدار آن در تیمار شاهد (بدون سرب) صورت گرفت. در حالی‌که در کلم بروکلی و کلم برگ بیش‌ترین جذب سرب توسط گیاه در سطح آلودگی خاک به ۱۵۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک مشاهده شد که با مقدار جذب گیاه در سطح آلودگی خاک به ۳۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۵). با توجه به این‌که مقدار جذب از حاصل‌ضرب غلظت عنصر در وزن زیست‌توده خشک بخش‌های مختلف گیاه محاسبه می‌شود، می‌توان گفت که کاهش جذب سرب در کلم بروکلی و کلم برگ در تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک به علت کاهش ۲۵/۴۸ درصدی عملکرد خشک کلم بروکلی و ۴۲/۲۸ درصدی عملکرد خشک کلم برگ در این تیمار نسبت به تیمار شاهد است. یعنی با وجود این‌که غلظت سرب در بخش‌های مختلف این گیاهان در تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک بالاترین مقدار را دارد ولی به علت کاهش زیست‌توده گیاه، مقدار جذب نسبت به تیمارهای ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک کاهش یافته است. براساس نتایج به دست آمده از این پژوهش می‌توان گفت که ارقام کلم بروکلی و کلم برگ تا سطح آلودگی خاک به ۱۵۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک حداکثر جذب سرب را داشته‌اند. به‌طوری که در غلظت‌های کم‌تر از ۱۵۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک به دلیل غلظت کم سرب در بخش‌های مختلف گیاه و در غلظت‌های بیش‌تر از ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک به دلیل کاهش زیست‌توده گیاه جذب سرب توسط ارقام کلم بروکلی و کلم برگ کاهش یافته است. هم‌چنین با توجه این‌که رقم کلم زینتی حداقل کاهش زیست‌توده (۲۵/۰۲ درصد نسبت به تیمار شاهد) را نسبت به دو رقم دیگر در سطح آلودگی ۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک داشته است و حداکثر مقدار جذب سرب در این رقم در تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک به دست آمده است. لذا می‌توان گفت کلم زینتی از مقاومت بیش‌تری به غلظت‌های بالای سرب نسبت به دو رقم دیگر برخوردار است و می‌توان از آن در خاک‌های آلوده به غلظت‌های بالاتر از ۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک نیز به عنوان گیاه زینتی استفاده کرد.



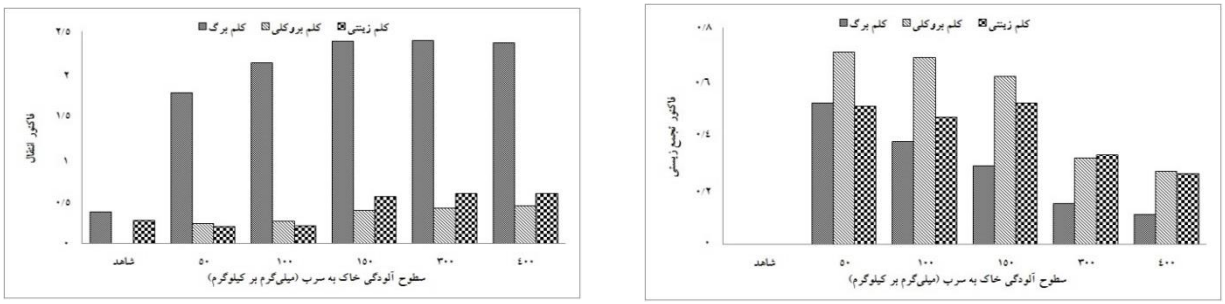
شکل ۵- اثر متقابل سطوح مختلف سرب خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و نوع رقم بر میزان جذب سرب کل زیست‌توده در گیاه کلم

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

با توجه به شکل (۶) و مقایسه فاکتور انتقال (TF) و فاکتور تجمع زیستی (BCF) در هر سه رقم مورد مطالعه مشخص گردید که فاکتور انتقال برای رقم‌های کلم زینتی و کلم بروکلی کم‌تر از یک و برای رقم کلم برگ بیش‌تر از یک بود. بالا بودن فاکتور انتقال سرب می‌تواند نشانگر توانایی بالای گیاه در انتقال سرب از ریشه به بخش‌های هوایی باشد (Wierzbicka, 1995; Feng *et al*., 2005; Fang *et al*., 2007). در حالی‌که گیاهان معدودی قادر به انتقال سرب از ریشه به بخش‌های هوایی خود هستند و به‌طور عمده سرب را در سلول‌های ریشه ذخیره می‌کنند (Tiwari *et al*., 2008; Mellem *et al*., 2009; Ndeda and Manohar, 2014; Tafvizi and Motesharezadeh, 2014; Pachura *et al*., 2016).

فاکتور تجمع زیستی که از تقسیم غلظت سرب ریشه به غلظت کل سرب خاک محاسبه شد برای هر سه رقم کلم کم‌تر

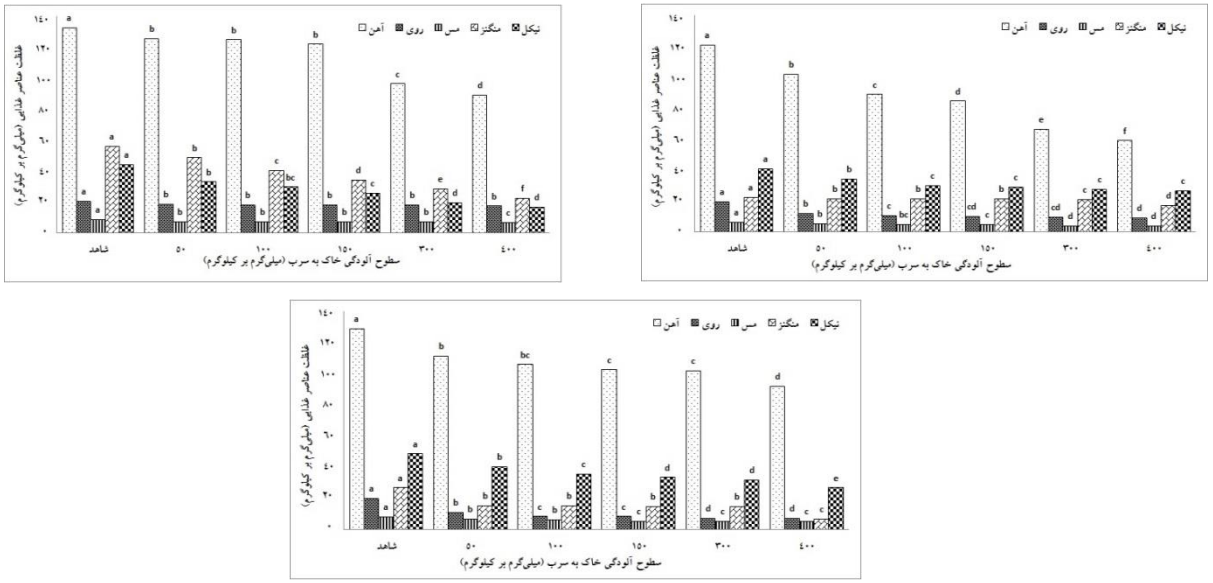
از یک بود. البته با توجه به این‌که غلظت سرب قابل جذب بعد از ده هفته خوابانیدن و قبل از کشت اندازه‌گیری شده بود چنانچه غلظت سرب ریشه به این غلظت (سرب قابل جذب قبل از کشت) تقسیم می‌شد فاکتور تجمع زیستی بالاتر از یک به دست می‌آمد.



شکل ۶- مقایسه فاکتور انتقال ارقام مختلف کلم (انتقال از ریشه به برگ) (الف) و تجمع زیستی سرب (انتقال از خاک به ریشه) (ب) در سطوح مختلف آلودگی خاک به سرب.

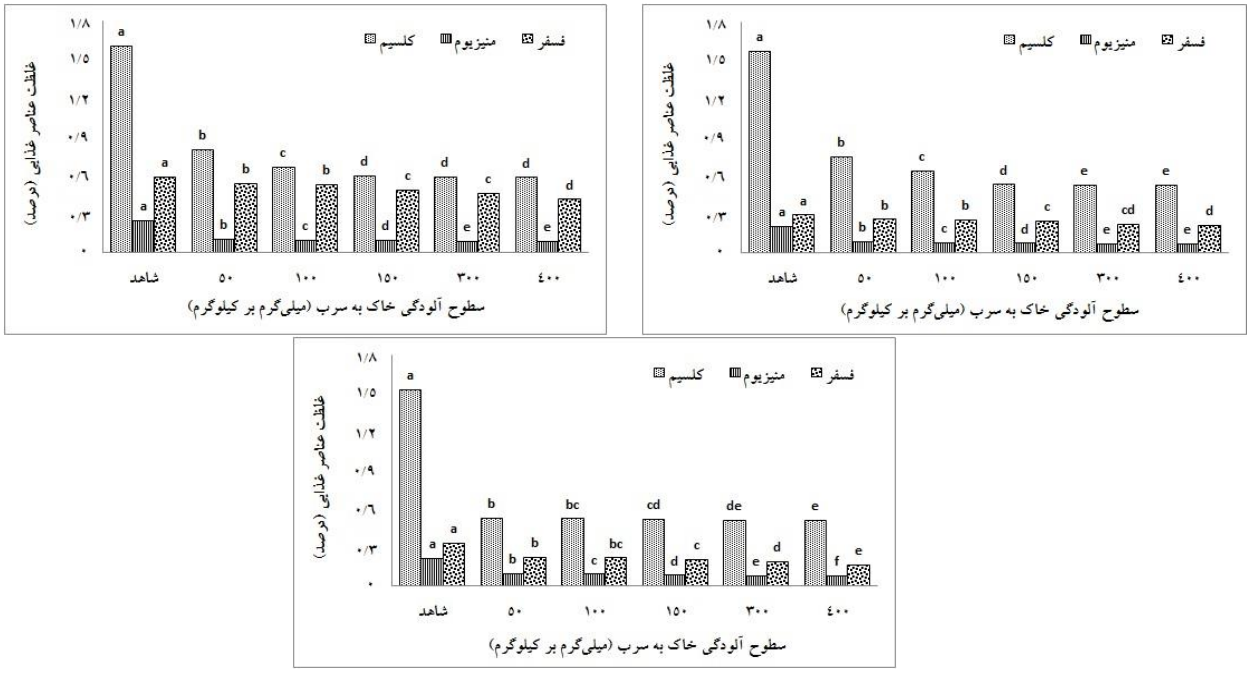
تأثیر سطوح مختلف سرب خاک بر غلظت برخی عناصر غذایی سر ارقام مختلف کلم

مقایسه میانگین‌های غلظت عناصر غذایی ارقام مختلف کلم نشان داد که غلظت‌های عناصر آهن، روی، مس، منگنز و نیکل با افزایش سطح سرب خاک کاهش یافتند (شکل ۷). ولی در کلم زینتی بین سطوح آلودگی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک اختلاف معنی‌داری از لحاظ غلظت آهن، روی و مس سر کلم مشاهده نشد و یا در کلم برگ تفاوت معنی‌داری در غلظت منگنز سر کلم بین سطوح آلودگی ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک مشاهده نشد. ولی غلظت همه عناصر در تمام سطوح آلودگی خاک به سرب با شاهد تفاوت معنی‌داری داشتند. این امر نشان می‌دهد در اولین سطح آلودگی خاک به سرب بیش‌ترین کاهش در جذب این عناصر از خاک توسط گیاه رخ داده است. Sharma and Dubey (2005) گزارش کردند که غلظت‌های بالای سرب در خاک باعث عدم تعادل عناصر غذایی در گیاه می‌گردد. به‌طوری‌که سرب مانع از ورود کاتیون‌ها (پتاسیم، کلسیم، منیزیم، منگنز، روی، مس و آهن) و آنیون‌ها (نیترات) به درون ریشه و انتقال آن به بخش‌های هوایی گیاه می‌شود.(2006) Sinha *et al.*, گزارش کردند که با افزایش غلظت سرب خاک از ۰/۱ به ۱ میلی‌مولار (از منبع نیترات سرب)، غلظت سرب و روی در بخش‌های مختلف کلم افزایش یافت در حالی‌که غلظت فسفر، آهن، منگنز و مس کاهش یافت. Tafvizi and Motesharezadeh, (2014) بیان کردند افزایش غلظت سرب در خاک موجب کاهش غلظت آهن و منگنز در بخش هوایی ارقام مختلف ذرت و افزایش غلظت آن‌ها در ریشه گردید.



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

مقایسه میانگین‌های غلظت عناصر کلسیم، منیزیم و فسفر در سر رقم‌های مختلف کلم نیز نشان داد با افزایش سطح سرب خاک غلظت‌های این عناصر به‌طور معنی‌داری ($P<0.01$) کاهش یافتند (شکل ۸). این امر بیانگر تأثیر شدید سرب بر جذب این عناصر از خاک توسط گیاه است. از اثرات سمی سرب می‌توان به کاهش غلظت عناصر ضروری منیزیم و آهن در برگ‌ها اشاره کرد. هم‌چنین سرب می‌تواند جایگزین اتم منیزیم در مولکول کلروفیل شود که این جایگزینی سبب کاهش دریافت نور و کاهش فتوسنتز می‌گردد (Sharma and Dubey, 2005). محققان دیگری نیز بیان کردند آلودگی خاک به فلزات سنگین می‌تواند تثبیت فسفر در خاک (مانند تشکیل فسفات سرب نامحلول 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 سرب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) بر غلظت عناصر پر مصرف در سر کلم زینتی (الف)، کلم بروکلی (ب) و کلم برگ (ج).

نتیجه‌گیری

براساس نتایج به دست آمده از این پژوهش مشاهده گردید که با افزایش غلظت سرب کل خاک ویژگی‌های فیزیولوژیکی (عملکرد تر و خشک، سطح برگ و شاخص کلروفیل برگ) هر سه رقم کلم (زینتی، بروکلی و برگ) به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند. مقایسه غلظت سرب بخش‌های خوراکی رقم‌های مختلف کلم با مقدار مجاز آن حاکی از بالا بودن غلظت سرب در گیاه داشت. به‌طوری‌که در تیمار شاهد با غلظت ۱/۴۶ میلی‌گرم سرب قابل جذب بر کیلوگرم خاک نیز غلظت سرب در بخش خوراکی کلم برگ بالاتر از مقدار مجاز آن بود. لذا با در نظر گرفتن این موضوع که کلم بروکلی و کلم برگ مصارف خوراکی دارند می‌بایست در صورت کشت در زمین‌های آلوده به فلزات سنگین قبل از عرضه به بازار مصرف، غلظت این فلزات در بخش خوراکی آن‌ها اندازه‌گیری شود. هم‌چنین نتایج نشان داد رقم کلم برگ توانایی قابل توجهی در انتقال سرب به بخش هوایی خود دارد و فاکتور انتقال برای این رقم بیش‌تر از یک است. پس می‌توان از این رقم با توجه به زیست توده زیادی که تولید می‌کند برای پالایش خاک‌های آلوده به سرب استفاده کرد. اما با توجه به حداقل کاهش عملکرد و سطح برگ کلم زینتی در تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک نسبت به تیمار شاهد می‌توان گفت کلم زینتی در مقایسه با دو رقم دیگر مقاومت بیش‌تری به غلظت‌های بالای سرب خاک دارد و می‌توان از آن در فضای سبز کارخانجات و مکان‌های آلوده به عنصر سرب به عنوان گیاه زینتی استفاده نمود.

REFERENCES

Akinci, I. E., Akinci, S. And Yilmaz, K. (2010). Response of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) to lead toxicity: Growth, element uptake, chlorophyll and water content. *African Journal of Agricultural Research*. 5(6): 416-423.

Allen, S. E., Grimshaw, H. M. and Rowland, A. P. (1986). Chemical Analysis. In: "*Methods in Plant Ecology*", (Ed.): 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.

Amini, M., Afyuni, M., Khademi, H., Abbaspour, K. C. and Schulin, R. (2005). Mapping risk of cadmium and lead contamination to human health in soils of central Iran. *Science of the Environment*. 347: 64-77.

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

Arias, J. A., Peralta-Videa, J. R., Ellzey, J. T., Ren, M., Viveros, M. N. and Gardea-Torresdey, J. L. (2010). Effects of Glomus deserticola inoculation on Prosopis: enhancing chromium and lead uptake and translocation as confirmed by X-ray mapping, ICP-OES and TEM techniques. *Environmental and Experimental Botany*. 68(2):139-148.

Attanayake, C. P., Hettiarachchi, G. M., Harms, A., Presley, D., Martin, S. and Pierzynski, G. M. (2014). Field evaluations on soil plant transfer of lead from an urban garden soil. *Journal of Environmental Quality*. 43(2): 475-87.

Bailey, C. D., Koch, M. A., Mayer, M., Mummenhoff, K., Okane, S. L. and Warwick, S. I. (2006). A global nrDNA ITS phylogeny of the Brassicaceae. *Molecular Biology and Evolution*. 23: 2142-2160.

Balabanova, B., Stafilov, T. and Bačeva, K. (2015). Bioavailability and bioaccumulation characterization of essential and heavy metals contents in R. *acetosa*, S. *oleracea* and U. *dioica* from copper polluted and referent areas. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 13(2): 1-13.

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).

Chollet, A. L. and Brock, J. W. (2008). Evaluation of lead content of Kale (*Brassica oleraceae*) commercially-available in Buncombe County, North Carolina. *Journal of the North Carolina Academy of Science*. 124(1): 23-25.

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.

Dauda, M. K., Variatha, M. K., Shafaqat, A., Najeeba, U., Jamilb, M., Hayat, Y., Dawooda, M., Khand, M. I., Zaffar, M., Cheemad, S. A., Tonga, X. H. and Zhua, S. (2009). Cadmium-induced ultramorphological and physiological changes in leaves of two transgenic cotton cultivars and their wild relative. *Journal of Hazardous Materials*. 168: 614-625.

Defoe, P. P., Hettiarachchi, G. M., Benedict, C. and Martin, S. (2014). Safety of gardening on lead- and arsenic contaminated brownfields. *Journal of Environmental Quality*. 43(6): 2064-2078.

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.

Feng, M. H., Shan, X. Sh., Zhang, Sh., and Wen, B. (2005). A comparison of the rhizosphere based method with DTPA, EDTA, $CaCl_2$, and NaNO3 extraction methods for prediction of bioavailability of metals in soil to barley. *Environmental Pollution*. 137: 231-240.

Ghaderian, Y. S. M., Mohtadi, A., Rahiminejad, R., Reeves, R. D. and Baker, A. J. M. (2007). Hyper accumulation of nickel by two *Alyssum* species; from the serpentine soils of Iran. *Plant Soil*. 293: 91-97.

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).

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 Nutrition*. 17: 1839-1858.

Jiang, W. and Liu, D. (2010). Pb-induced cellular defense system in the root meristematic cells of *Allium sativum* L. BMC *Plant Biology*. 10: 40-40.

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.

Karimi, N., Khanahmadi, M. and Moradi, B. (2013). The effects of lead on some physiological parameters of Artichoke. *Journal of Plant Production Research*. 20(1): 49-62. (In Farsi)

Kastori, R., Plesnicar, M., Sakac, Z., Pankovic, D. and Arsenijevic-Maksimovic, I. (1998). Effect of lead excess on sunflower growth and photosynthesis. *Journal of Plant Nutrition*. 21: 75-85.

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.

Khudsar, T., Uzzafar, M., Soh, W. Y. and Iqbal, M. (2000). Morphological and anatomical variations of Cajanus cajan (Linn. Huth) raised in cadmium-rich soil. *Journal of Plant Biology*. 43: 149-157.

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

Lane, S. D. and Martin, E. S. (1977). A histochemical investigation of lead uptake in Raphanus sativus. *New Phytologist*. 79: 281-286.

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.

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).

Maestri, E., Marmiroli, M., Visioli, G. and Marmiroli, N. (2010). Metal tolerance and hyperaccumulation: costs and trade-offs between traits and environment. *Environmental and Experimental Botany*. 68(1): 1-13.

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. P. and Zhao, F. J. (2003). Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology*. 14: 277–282.

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.

Mellem, J. J., Baijnath, H. and Odhav, B. (2009). Translocation and accumulation of Cr, Hg, As, Pb, Cu and Ni by Amaranthus dubius (Amaranthaceae) from contaminated sites. *Journal of Environmental Science and Health*. 44: 568-575.

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.

Meyers, D., Auchterlonie, G. J., Webb, R. I. and Wood, B. (2008). Uptake and localization of lead in the root system of Brassica juncea. *Environmental Pollution*. 53(2): 323-332.

Mirsal, I. A. (2008). Soil pollution origin, monitoring & remediation, 2th, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 312p.

Mohajer, R., Salehi, MH. And Mohammadi, J. 2014. Lead and cadmium concentration in agricultural crops (*lettuce*, *cabbage*, *Beetroot* and *Onion*) of Isfahan Province, Iran. *Iranian Journal of Health and Environment*. 7(1): 1-10. (In Farsi)

Ndeda, L. A. and Manohar, S. (2014). Bio Concentration Factor and Translocation Ability of Heavy Metals within Different Habitats of Hydrophytes in Nairobi Dam, Kenya. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*. 8(5): 42-45.

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

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.

Pachura, P., Ociepa-Kubicka, A. and Skowron-Grabowska, B. (2016). Assessment of the availability of heavy metals to plants based on the translocation index and the bioaccumulation factor. *Journal of Desalination and Water Treatment*. 57(3): 1469-1477.

Page, A. L. (1982). Methods of soil analysis, Part 2-Chemical and microbiological properties. *Soil Science Society of America*.

Papa, S., Bartoli, G., Pellegrino, A. and Fioretto, A. (2010). Microbial activities and trace element contents in an urban soil. *Environmental Monitoring and Assessment*. 165: 193-203.

Parsadoost, F., Bahreininejad, B., Safarisanjani, A. and Kaboli, M. (2007). Phytoremediation of lead with native rangeland plants in Irankooh polluted soils. *Pajuhesh and Sazandegi*. 75: 54-63.

Patra, M., Bhowmik, N., Bandopadhyay, B. and Sharma, A. (2004). Comparison of mercury, lead, and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance. *Environmental and Experimental Botany*. 52:199–223.

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.

Rezvani, M. and Zaefarian, F. (2011). Bioaccumulation and translocation factors of cadmium and lead in Aeluropus littoralis. *Astralian Journal of Agricultural Engineering*. 2(4): 114-119.

Rhoades, J. D. (1996). Salinity: electrical conductivity and and total dissolved solids. Method of soil analysis, parss: *chemical methods*. Madison. Wisconsin, USA. (pp. 417-436).

Romeiro, S., Lagoa, A. M., Furlani, P. R., Abreu, C. A., Abreu, M. F. and Erismann, N. M. (2006). Lead uptake and tolerance of de *Ricinus communis* L. *Brazilian Journal* of *Plant Physiology*. 18: 483-489.

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

Sinha, P., Dube, B., Srivastava, P. and Chatterjee, C. (2006). Alteration in uptake and translocation of essential nutrients in *cabbage* by excess lead. *Chemosphere*. 65(4): 651-656.

Soltani, F., Ghorbanli, M. and Manouchehri-kalantari, K. H. (2006). Effect of cadmium on photosynthetic pigments, sugars and malondealdehyde content in *Brassica napus* L. Iran. *Journal of Biological*. 2: 136-145. (In Farsi)

Tafvizi, M. and Motesharezadeh, B. (2014). Effects of Lead on Iron, Manganese, and Zinc Concentrations in Different Varieties of Maize (*Zea mays*). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 45:1853-1865.

Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. (pp. 475-490). 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.

Tiwari, S., Kumari, B. and Singh, S. N. (2008). Evaluation of metal mobility/immobility in fly ash induced by bacterial strains isolated from the rhizospheric zone of Typha latifolia growing on fly ash dumps. *Bioresource Technology*. 99: 1305-1310.

Toolabi, Z., Rahimi, GH. and Marofi, S. (2014). Accumulation of heavy metals in root and aerial part of radish (*Raphanus Sativus*) grown in amended soils with sewage sludge. *Journal of Water and Soil conservation*. 21(2): 209-226. (In Farsi)

Walkley, A. and I. A. Black. (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 (ed.) 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.

Wierzbicka, M. (1995). How lead loses its toxicity to plants. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 64: 81-90.

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.

Zhang, E. H., Zhang, X. H. and Wang, H. Z. (2004). Adaptable effects of phosphorus stress on different genotypes of faba-bean. *Acta Ecologica Sinica*. 24(8): 1589-1593.