جذب کادمیوم توسط سه گیاه شاهی، کاهو و گوجه‌فرنگی در خاک آلوده به کادمیوم

جهانگیر عابدی کوپایی[1*]، نگین متین[2] و محسن جواهری طهرانی[1]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۷/۲۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۱)

چکیده

افزایش نیاز آبی و تقاضای بیشتر آب به منظور آبیاری در بخش کشاورزی، سبب افزایش روزافزون استفاده مجدد از پساب‌های تصفیه شده یا خام شهری و صنعتی در بسیاری از کشورهای جهان شده است. فلزات سنگین موجود در این‌گونه آب‌های نامتعارف یکی از منابع آلودگی آب، خاک و گیاه به‌شمار می‌روند. سمیت فلزات سنگین در گیاهان سبب بروز اختلالاتی در گیاه شده که در نهایت ممکن است سبب کاهش رشد گیاه گردد. ضمناً، تجمع فلزات سنگین در گیاهان خطراتی را برای انسان‌ها و حیواناتی که این گیاهان را مصرف می‌کنند به‌همراه دارد. در این پژوهش، آلوده شدن سه گیاه شاهی، کاهو و گوجه‌فرنگی به عنصر کادمیوم موجود در خاک، از طریق جذب در اندام گیاهی مورد بررسی قرار گرفت. در این طرح آزمایشی که به‌صورت کاملاً تصادفی انجام گرفت، برای هر گیاه دو تیمار، خاک شاهد و دیگری خاک حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم و پنج تکرار برای هر تیمار در نظر گرفته شد. پس از مراحل کاشت، داشت و برداشت و آماده‌سازی نمونه‌ها، میزان جذب کادمیوم در ریشه‌ها و اندام هوایی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که میانگین جذب کادمیوم توسط هر سه گیاه اختلاف معنی‌داری با شاهد دارد. بیشترین مقدار جذب مربوط به گوجه‌فرنگی و کمترین جذب مربوط به کاهو می‌باشد. میزان ضریب انتقال کادمیوم از خاک به سه گیاه شاهی، کاهو و گوجه‌فرنگی به ترتیب ۱/۳، ۰/۳۳ و ۰/۶۵ به‌دست آمد. هرچند میزان ضریب انتقال کادمیوم به کاهو به نسبت دو گیاه دیگر کمتر است، اما میزان مصرف سرانه کاهو برای هر نفر بسیار بیشتر از شاهی است، که در مدیریتَ آبیاری با پساب آلوده باید این نکته درنظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری با پساب، آلودگی خاک، ضریب انتقال

مقدمه

آلودگی محیط‌زیست به فلزات سنگین به‌عنوان یک مشکل جهانی در حال گسترش، مطرح می‌باشد. فلزات سنگین به دلیل غیرقابل تجزیه بودن و آثار زیانبار فیزیولوژیک بر جانداران، حتی در غلظت‌های کم، اهمیت ویژه‌ای در آلودگی محیط‌زیست دارند (۱۶ و ۱۷). به‌دلیل تنوع زیاد در استفاده از فلزات سنگین، آلودگی خاک به‌وسیله این عناصر نیز ممکن است از راه‌های متنوعی صورت پذیرد. از نظر تاریخی، آلودگی خاک به‌وسیله استخراج معادن و کارخانه‌های ذوب این‌گونه فلزات شروع شده، و باعث بروز مشکلات زیست‌محیطی بسیار جدی در مناطق مجاور این معادن گردیده است. وجود فلزات سنگین در کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها، علف‌کش‌ها و حشره‌کش‌ها (که برای افزایش تولید محصولات کشاورزی به‌کار می‌روند)، پساب‌های صنعتی و لجن فاضلاب‌ها نگرانی‌های زیادی از نظر ذخیره آنها در خاک به وجود آورده است. افزون بر این، با افزایش نیاز به آب آبیاری و همچنین کمبود منابع آب، پساب‌های صنعتی و خانگی به‌عنوان منابعی عمده اهمیت یافته‌اند. همچنین، در پژوهش‌های زیادی مشخص شده که لجن فاضلاب به عنوان کود، یکی از منابع ورود فلزات سنگین به محیط آب و خاک به‌حساب می‌آید (۱۴ و ۳۰).

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: koupai@cc.iut.ac.ir

با افزایش شهرنشینی و رشد روزافزون جمعیت در کشورهای در حال توسعه، مسئله کمبود آب، مخصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشکی نظیر ایران، جدی‌تر و مشکل‌سازتر شده است. افزایش جمعیت سبب مصرف آب بیشتر در بخش‌های خانگی، تجاری و صنعتی و در نتیجه تولید حجم بیشتری از پساب شده است. به‌همین دلیل، استفاده مجدد از پساب به عنوان یکی از راه‌حل‌های اصلی رفع تنگناهای کمبود آب، جهت افزایش سطح زیر کشت و تأمین غذا در کشورهای در حال توسعه مطرح می‌باشد (۶، ۱۳، ۲۰، ۳۲ و ۳۶). تقریباً در اغلب کشورهای در حال توسعه، گزینه دیگری جز استفاده از پساب در آبیاری وجود ندارد. به‌طوری که حتی ممکن است جهت تأمین مواد مغذی در خاک و همچنین ارزان‌تر بودن آب مصرفی، از پساب رقیق نشده در آبیاری نیز استفاده کنند (۱۸).

زمانی که کادمیوم وارد بدن می‌شود، در کلیه و کبد، اندام‌های تولید مثل، سیستم‌های عصبی، تنفسی، گوارش و ماهیچه‌های قلب تجمع یافته و هنگامی که مقدار آن از حد معینی تجاوز کند، به واسطه اثر درازمدت، عوارض ناشی از آن به‌صورت بیماری‌های گوناگون نمایان می‌شود. این اثرها در کودکان از شدت بیشتر و عوارض حادتری برخوردار است (۸، ۲۹ و ۳۸). کادمیوم، اغلب با متالوتنین ترکیب شده و در کرتکس کلیه انباشته می‌شود. بد کار کردن کلیه نخستین علامت مسمومیت به کادمیوم است. تجمع بیش از mg/g ۲۰۰ (وزن تر) کادمیوم در کرتکس کلیه، سمی و خطرناک است (۲۰). اثر بیوشیمیایی کادمیوم شامل شکسته شدن اکسیدهای فسفر، تداخل در فعالیت آنزیم‌ها و همچنین توانایی در واکنش با اسیدهای نوکلئیک (۱۱) و بروز ناهنجاری‌های کروموزومی و سرطان‌زایی در ریه می‌باشد (۸ و ۲۹). خوردن سبزی‌های حاوی کادمیوم توسط انسان‌ها و حیوانات سبب بروز برخی بیماری‌ها مانند نفخ ریه، نفخ نایژه، سرطان و فشار خون بالا می‌شود (۲۱ و ۲۲). جذب مداوم کادمیوم ممکن است با کاهش جذب یون توسط روده، سبب کم‌خونی شود. بعلاوه، جذب کادمیوم ممکن است باعث بروز بیماری ایتای- ایتای شود (۲۰). طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO)، مقدار مجاز جذب هفتگی کادمیوم mg/g ۷ از وزن بدن می‌باشد. مقدار مجاز کادمیوم در لجن فاضلاب برای استفاده کشاورزی mg/kg ۸۵ خاک و حداکثر mg/kg ۳۹ متوسط ماهانه می‌باشد (۱۷). همچنین، مقدار کل کادمیوم در هر ایکر (acre) زمین نباید از ۱/۹ کیلوگرم تجاوز کند (۱۸). متوسط جذب روزانه کادمیوم در رژیم غذایی، ۳۰- ۱۵ میلی‌گرم در انگلستان و بیشترین مقدار برابر ۹۲ میلی‌گرم در آمریکا تخمین زده شده است (۲۳). مقدار مجاز کادمیوم در پساب برای استفاده در کشاورزی، توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران برابر mg/L ۰/۰۱ اعلام شده است (۳۴، ۱۴). مقدار مجاز کادمیوم در گیاه برای مصرف انسان حدود mg/L ۰/۵ و برای مصرف حیوانات ۱۰ تا ۲۰ میلی‌گرم در لیتر گزارش شده است (۲۷).

پساب‌های صنعتی اغلب حاوی مقادیر زیادی فلزات، شبه‌فلزات و ترکیبات فرار و یا نیمه‌فرار هستند. در حالی که پساب خانگی اغلب به‌دلیل وجود پاتوژن‌ها مضر هستند (۱۸). مهم‌ترین فلزات سنگین موجود در فاضلاب‌ها شامل کادمیوم، روی، مس، سرب، نیکل، کروم، قلع وآرسنیک می‌باشند (۱۷). استفاده بدون برنامه‌ریزی از پساب‌ها ممکن است مشکلات زیست‌محیطی زیادی را به بار آورد. شور شدن خاک‌ها، تخریب ساختمان خاک، تجمع فلزات سنگین در خاک و گیاه، مسمومیت گیاه و کاهش عملکرد آنها، شیوع بیماری‌ها و آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی نمونه‌هایی از این‌گونه پیامدها می‌باشند (۲۴). در مطالعه انجام شده در ایالت راجستان هند، مقادیر جذب روزانه فلزات (Daily intake of metals, DIM) در سبزی‌های تحت آبیاری با پساب زیاد و نزدیک به مقدار بحرانی بود. به‌همین دلیل، محققین شدیداً توصیه کردند که مردمی که در این ناحیه زندگی می‌کنند برای جلوگیری از ورود بیش از حد فلزات سنگین به بدنشان، از مصرف مقادیر زیاد اسفناج خودداری

کنند (۱۸).

مطالعات نشان می‌دهد که به‌طور میانگین بیش از ۶ متر مکعب در ثانیه فاضلاب و رواناب سطحی تهران، از طریق مسیل‌ها و کانال‌های فاضلاب با دریافت آلاینده‌های مختلف شهری و صنعتی، صرف آبیاری اراضی جنوب تهران می‌شود. نتایج پژوهش‌های ترابیان و مهجوری (۳) نشان می‌دهد که دامنه آلودگی اراضی زراعی جنوب تهران به کادمیوم ۰/۱۰۱ تا ۷/۵۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و در گونه‌های زراعی ۰/۳۴ تا ۱/۴۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک محصول می‌باشد که بیش از حد مجاز برای مصارف انسانی است. استفاده از فاضلاب در اراضی زراعی قزوین باعث افزایش غلظت سرب، مس، کادمیوم و روی به مقدار چندین برابر حد مجاز شده است. این حالت برای بخش مهمی از اراضی کشور، به‌ویژه اراضی حاشیه‌ای شهرهای بزرگ، به‌وجود آمده و در حال گسترش می‌باشد. بررسی آلودگی اراضی زراعی کشور نشان می‌دهد که مقدار کادمیوم و سرب در بخشی از اراضی آلوده استان‌های گیلان، زنجان، اصفهان و چهارمحال بختیاری به ترتیب معادل ۱/۹ تا ۱۸۰/۵ و ۸۹/۴ تا ۲۶۱/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است (۱۲).

در تحقیقی، تأثیر کاربرد پساب صنعتی ذوب آهن اصفهان بر اراضی کشاورزی و گیاه مو از نظر زیست‌محیطی بررسی شد. نتایج نشان داد که پساب واحد مورد بررسی از نظر برخی پارامترها شامل کلراید، سولفات و غلظت کبالت، کروم و کادمیوم برای تخلیه به آب‌های سطحی، چاه جاذب و آب آبیاری، محدود کننده بود. همچنین، غلظت قابل جذب عناصر سنگین در خاک‌های تحت آبیاری با پساب صنعتی بیش از خاک شاهد بود. غلظت کل مس، منگنز، روی و کادمیوم در دامنه غلظت بحرانی این عناصر قرار داشت. در برگ درخت مو، غلظت منگنز فراتر از حد معمول این عنصر در گیاه بود. اما در میوه انگور، کلیه عناصر دارای غلظت معمول بودند. در کلیه نمونه‌های گیاهی مورد مطالعه در اراضی کشاورزی اطراف واحدهای صنعتی مورد بررسی، غلظت عنصر آهن در نمونه‌های شسته نشده بیشتر از نمونه‌های شسته شده بود (۷). بررسی‌های انجام شده روی محصولات کشاورزی اطراف رودخانه خشک شیراز نشان داد که مقدار فلزاتی نظیر منگنز، آرسنیک و کروم شش ظرفیتی در محصولات مختلف آبیاری شده با پساب‌های جاری در مسیر رودخانه زیاد است (۵). در مطالعه کفیل‌زاده و همکاران (۱۰)، آب رودخانه خشک شیراز در برخی ایستگاه‌ها جهت مصارف آشامیدنی، آبیاری و حیات آبزیان مناسب نبود. همچنین، برخی از محصولات کشاورزی اطراف رودخانه حاوی مقادیری فلزات سنگین بودند که مقدار مس در کلیه گیاهان، و در برخی موارد آهن، بیش از حد مجاز بود.

بعضی از فلزات سنگین از جمله Co، Cr، Cu، Fe، Mn، Mo، Ni و Zn در مقادیر کم برای رشد و حیات گیاهان یا جانوران ضروری می‌باشند. اما برخی دیگر مانند Cd، Pb و Hg برای موجودات زنده سمی هستند (۱۸). اثر سمیت عناصری مثل سرب و کادمیوم ناشی از رقابت آنها با عناصر ضروری سبک‌تر در رفتار بیوشیمیایی و جذب به وسیله گیاه است، که در نتیجه جای آنها را در وظایف بیوشیمیایی می‌گیرند. به‌عنوان مثال، کادمیوم می‌تواند جذب و وظایف متابولیسمی شبیه روی داشته باشد. سبزی‌ها در برابر عناصر سنگین بیش از گندمیان و چمن‌ها از خود حساسیت نشان می‌دهند. برخی از گیاهان می‌توانند غلظت‌های زیاد برخی از عناصر سنگین مانند آرسنیک، مس و کادمیوم را تحمل کنند (۵۰ تا ۵۰۰ برابر بیشتر از میانگین جذب گیاه) و در بافت‌های خود ذخیره کنند (۲۳ و ۲۸).

فلزات سنگین به‌صورت خالص در خاک ممکن است هیچ‌گونه تأثیر مستقیمی بر رشد و نمو گیاهی نداشته باشند. ولی شکل‌هایی از این عناصر که در دسترس گیاه می‌باشند و از طریق محلول خاک جذب گیاه می‌شوند بر رشد و نمو گیاه تأثیر می‌گذارند (۹).

در مطالعه‌ای دیگر، اثر کاربرد پساب را با تیمارهای مختلف شامل پساب معمولی، پساب با غلظت فلزات سنگین ۵ برابر و غلظت ۱۰ برابر، روی چند گونه گیاهی بررسی نمودند (۱۴).

نتایج این تحقیق نشان داد که بیومس کل گیاه با افزایش غلظت عناصر در پساب کاهش می‌یابد. به‌طوری که غلظت زیاد فلزات سنگین، تولید گیاهی را، به‌ویژه در برگ‌ها و ساقه‌ها، کاهش می‌دهد. برخی تحقیقات نشان داده‌اند که مقدار تجمع فلزات سنگین بسته به نوع فلز، شرایط خاک و گونه گیاهی متفاوت بوده ولی عمدتاً مقدار تجمع در اندام هوایی، به‌ویژه برگ و ساقه، بیشتر از سایر اندام‌ها بوده و در دانه بسیار کمتر از برگ و ساقه می‌باشد (۱۲). اما برخی نیز گزارش کرده‌اند که اغلب فلزات تمایل دارند که در قسمت ریشه گیاهان باقی بمانند (۳۷). به طور کلی، غلظت فلزات سنگین در گیاهان برگی نسبت به دیگر گیاهان غذایی بیشتر است (۱۵).

در میان فلزات سنگین، کادمیوم به دلیل تحرک نسبتاً زیاد در خاک و پتانسیل سمّیت برای جانداران در غلظت‌های کم، دارای خطرات ویژه‌ای است. کادمیوم، فلز سنگین غیرضروری است که هیچ‌گونه مصرف متابولیک ندارد و اگرچه به طور طبیعی در غلظت‌های کم در خاک تجمع می‌یابد، ولی مقادیر زیاد آن در برخی از خاک‌ها گزارش شده است (۱۹). از آنجایی که نیمه‌عمر بیولوژیک این فلز در بدن انسان بین ۱ تا ۳۰ سال می‌باشد، و اینکه در بدن قابل تبدیل به ترکیبات دیگر نیست، لازم است تا آنجا که ممکن است مقدار ورود این عنصر به زنجیره غذایی کاهش داده شود (۸ و ۳۵).

هدف از پژوهش حاضر، بررسی امکان آلوده شدن سه گیاه شاهی، کاهو و گوجه‌فرنگی به عنصر کادمیوم موجود در خاک، از طریق جذب در اندام گیاهی، می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت یک طرح آزمایشی در گلخانه آموزشی و پژوهشی دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد. نمونه‌های خاک مورد استفاده در این طرح از سری‌های خاک غالب منطقه اصفهان انتخاب شد که دارای بافت لوم می‌باشد.

انتخاب گیاه

اگرچه محققین برای گیاه‌پالایی عنصرکادمیوم، گیاهان مختلفی را مورد مطالعه قرار داده‌اند (۳، ۱۰ و ۱۲)، اما سه گیاه شاهی، کاهو و گوجه‌فرنگی که کاشت آنها در ایران پرکاربرد است (۱۳) در پژوهش‌های قبلی مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند.

شاهی یا تره تیزک (*Lepidum sativum*)، گیاهی است یکساله که طول بوته آن شاید به ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر برسد. برگ و ساقه جوان آن در حالت تازه، طعم تند و مطبوع دارد (۴۰).

کاهو (*Lactuca sativa*) گیاهی است که خواص درمانی و مصارف غذایی بسیاری دارد. عصاره این گیاه حاوی انواع ویتامین‌ها (بیشتر در برگ‌های سبز تر)، آهن، املاح معدنی مانند ید، کلسیم، پتاسیم، منیزیم و فسفر و علاوه بر این مقدار زیادی آب و مواد قندی و نیتروژنه است (۱). میزان برداشت از هر هکتار بین ۳۰ تا ۳۵ تن می‌باشد (۱۳). نظر به این که قسمت خوراکی دو گیاه شاهی و کاهو، برگ‌های آنها می‌باشد و با توجه به گزارش‌های قبلی که حاکی از بیش‌انباشتگر بودن (Hyperaccumulator) این دو گیاه برای سایر عناصر سنگین می‌باشد (۲۱، ۲۶، ۳۴ و ۳۵)، نیاز است تا این دو گیاه مورد بررسی قرار گیرند تا از خطرهای احتمالی پیشگیری به عمل آید.

گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) گیاه بومی آمریکای جنوبی و مرکزی است. انواع مختلف این گیاه امروزه در سراسر جهان پرورش داده می‌شود. گوجه‌فرنگی سرشار از ویتامین C و لیکوپن است. کشت و پرورش این گیاه به‌طور کلی مساحتی حدود سه میلیون هکتار را به خود اختصاص داده است، که نزدیک یک‌سوم کل مساحت مختص به کشت تره‌بار در جهان است (۳۵). گوجه‌فرنگی به تیره سیب‌زمینیان تعلق دارد و از گیاهان چندساله است. فائو با انتشار جدیدترین آمار خود اعلام کرده که ایران در تولید این محصول مهم کشاورزی در میان هفت کشور نخست دنیا قرار گرفته است (۱۳). محققین مختلفی این گیاه را به عنوان بیش‌انباشتگر برخی از فلزات سنگین همچون روی و سرب معرفی کرده‌اند (۱۱، ۳۰ و ۴۳).

تهیه تیمارها

ابتدا خاک مورد نظر خوب کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری

گذرانده شد تا به صورت یکنواخت درآید. در کف هر گلدان هم به مقدار کافی شن درشت به عنوان زهکش ریخته شد. سپس، به هر گلدان حدود ۳ کیلوگرم خاک خشک منتقل شد.

تیمارها در این طرح عبارت بودند از: خاک حاوی کادمیوم (خاک مخلوط شده با ۱۰۰ mg/L کادمیوم) و شاهد (خاک بدون کادمیوم).

برای هر گیاه دو تیمار و برای هر تیمار ۵ تکرار در نظر گرفته شد. مراحل مختلف آزمایش در کاشت و داشت و برداشت و اندازه‌گیری کادمیوم به شرح زیر می‌باشد:

کاشت: پس از آماده شدن گلدان‌ها، تعداد ۱۰ بذر از هر گیاه در گلدان مورد نظر به صورت یکنواخت کاشته شد و هر ۳ تا ۴ روز آبیاری انجام شد.

داشت: در طول مراحل رشد، به طور مکرر از گلدان‌ها بازدید شده و گیاهان نامرغوب از نظر رشد تنک شدند و برای یکسانی شرایط جذب گیاهان، حاشیه گلدان‌ها هم حذف شد. همچنین، به‌منظور دست یافتن به شرایط رشد محیطی یکنواخت، هر هفته جای گلدان‌ها تعویض شد.

برداشت: بعد از گذشت ۴۰ روز که گیاهان به رشد مناسب رسیدند، با دقت کافی با ریشه کامل از خاک برداشت شدند. سپس، ریشه‌ها شسته شده و در نهایت با احتساب گیاهان تنک شده، حذف شده و آسیب دیده به‌خاطر برداشت و ریشه‌شویی، ۴ گیاه از هر گلدان در نظر گرفته شد. پس از آن، اندام هوایی و ریشه‌ها از یکدیگر جدا شده و پس از توزین درون پاکت‌های مخصوص قرار گرفته، و پاکت‌ها به مدت ۴۸ ساعت درون گرمخانه با دمای ۷۲ درجه سلسیوس قرار گرفتند. بعد از خشک شدن، ساقه‌ها و ریشه‌های هر پاکت با هاون کاملاً سائیده شده تا به صورت نرم و پودر درآیند.

اندازه‌گیری غلظت کادمیوم

از هر نمونه ساقه، ۰/۵ گرم و از هر نمونه ریشه ۰/۲ گرم را در داخل ظروف خاصی ریخته و سپس مقدار ۳۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۴ نرمال به ساقه و ۲۰ میلی‌لیتر به ریشه افزوده شد و به مدت ۲ ساعت در حمام آب گرم با دمای ۸۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند تا عصاره‌گیری به طور مناسب انجام گیرد. مواد هضم شده به کمک کاغذ صافی واتمن ۴۲ نمونه‌ها صاف شده و سپس ظروف حاوی ساقه‌ها و ریشه‌ها به ترتیب به حجم ۵۰ میلی‌لیتر و ۲۵ میلی‌لیتر رسانیده شد. در این مرحله، عصاره آماده برای ارائه به دستگاه طیف سنج جذب اتمی پرکین المر (مدل A Analyst ۷۰۰) بود تا توسط این دستگاه، میزان کادمیوم هر نمونه به‌طور جداگانه اندازه‌گیری شود. داده‌های به‌دست آمده از آزمایش به کمک نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل شد.

نتایج و بحث

در جداول ۱ تا ۳ میزان غلظت موجود عنصر کادمیوم در اندام گیاهی هر یک از گیاهان مشخص شده است. با توجه به مشاهدات گلخانه‌ای، گیاهان شاهد رشد بهتری نسبت به سایر گیاهان داشته‌اند. در واقع، افزوده شدن کادمیوم به خاک گلدان‌ها مانع از رشد طبیعی گیاهان مورد مطالعه شد. این نتیجه با گزارش تران و همکاران (۴۱)، یانگ و همکاران (۴۲) و زی و همکاران مطابقت دارد.

نتایج نشان می‌دهد که غلظت کادمیوم در گیاهان مورد مطالعه به طور معنی‌داری افزوده شده است. به عبارت دیگر، هر سه گیاه، کادمیوم را در اندام‌هایشان ذخیره کرده‌اند. اختلاف میانگین غلظت کادمیوم هر سه گیاه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار است. این موضوع نشان دهنده پتانسیل زیاد جهت جذب کادمیوم توسط هر سه گیاه از خاک آلوده است. در جداول ۴ تا ۶، نتایج تجزیه واریانس مربوط به هر گیاه نمایش داده شده است.

پس از مشخص شدن پتانسیل سه گیاه مذکور جهت جذب فلز سنگین کادمیوم، مقایسه میانگین‌ها از طریق آزمون LSD در سطح اطمینان ۱٪ انجام شد تا اختلاف بین گونه‌ها مشخص شود. پس از انجام این آزمون آماری مشخص شد که هر سه گونه گیاهی باهم تفاوت دارند. با مقایسه میانگین جذب در

جدول ۱. میزان غلظت کادمیوم (mg/kg) در اندام هوایی و ریشه شاهی

خاک شاهد				خاک آلوده به کادمیوم			
تکرار	ریشه	اندام هوایی	کل	تکرار	ریشه	اندام هوایی	کل
O_1	۱/۱۷	۴/۱	۴/۲۷	T_1	۱۰	۱۱۱	۱۲۱
O_2	۰/۲۳	۴/۴	۴/۶۳	T_2	۱۰	۱۳۶	۱۴۶
O_3	۰/۲۷	۳/۵	۳/۷۷	T_3	۱۵	۹۷	۱۱۲
O_4	۰/۱۵	۳/۱	۳/۲۵	T_4	۱۵	۱۵۶	۱۷۱
O_5	۰/۱۸	۴/۹	۵/۰۸	T_5	۱۵	۱۷۱	۱۸۶
میانگین غلظت	۰/۲c	۴ab	۴/۲a	میانگین غلظت	۱۳c	۱۳۴/۲b	۱۴۷/۲a

میانگین‌های با حروف همانند اختلاف معنی‌دار ندارند.

جدول ۲. میزان غلظت کادمیوم (mg/kg) در اندام هوایی و ریشه کاهو

خاک شاهد				خاک آلوده به کادمیوم			
تکرار	ریشه	اندام هوایی	کل	تکرار	ریشه	اندام هوایی	کل
O_1	۱/۸	۰/۵	۲/۳	T_1	۴۰	۱۴	۵۴
O_2	۱/۷	۰/۷	۳/۲	T_2	۳۵	۱۲	۴۷
O_3	۱/۹	۰/۶	۲/۳	T_3	۴۴	۱۲	۵۶
O_4	۱/۲	۰/۵۵	۲/۴۵	T_4	۳۰	۱۴	۴۴
O_5	۲/۵	۰/۶۵	۲/۷۵	T_5	۵۸	۱۶	۷۴
میانگین غلظت	۲b	۰/۶c	۲/۶a	میانگین غلظت	۴۱/۴b	۱۳/۶c	۵۵a

میانگین‌های با حروف همانند اختلاف معنی‌دار ندارند.

جدول ۳. میزان غلظت کادمیوم (mg/kg) در اندام هوایی و ریشه گوجه‌فرنگی

خاک شاهد				خاک آلوده به کادمیوم			
تکرار	ریشه	اندام هوایی	کل	تکرار	ریشه	اندام هوایی	کل
O_1	۳/۵	۱/۷	۵/۲	T_1	۱۱۸	۱۳۰	۲۴۸
O_2	۴/۲	۲/۵	۶/۷	T_2	۱۹۴	۱۰۶	۳۰۰
O_3	۳/۶	۲/۳	۵/۹	T_3	۱۷۲	۱۳۶	۳۰۸
O_4	۴/۵	۱/۶	۶/۱	T_4	۱۴۰	۹۰	۲۳۰
O_5	۴/۲	۱/۹	۶/۱	T_5	۱۱۸	۶۲	۱۸۰
میانگین غلظت	۴ab	۲bc	۶a	میانگین غلظت	۱۴۸/۴b	۱۰۱/۸c	۲۵۱/۲a

میانگین‌های با حروف همانند، اختلاف معنی‌دار ندارند.

ریشه، بیشترین مقدار جذب مربوط به گوجه‌فرنگی، و با مقایسه میانگین جذب در اندام هوایی، شاهی بیشترین جذب را داراست. در مجموع، ریشه و اندام هوایی گوجه‌فرنگی بیشترین مقدار جذب کادمیوم را نشان داد . در جدول ۷ آزمون‌های آماری و در شکل‌های ۱ تا ۳ میزان میانگین جذب در ریشه، اندام هوایی و در مجموع هرسه گیاه نشان داده شده است.

دامنه غلظت مسمومیت برای کادمیوم ۳۰-۵ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد (۴). باتوجه به جداول ۱ تا ۳، غلظت کادمیوم

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس برای گیاه شاهی و شاهد آن

منابع تغییرات	درجه آزادی	SS	MS	F
تیمار	۱	۵۱۱۲۲/۵	۵۱۱۲۲/۵	۱۰۲/۲۲**
خطا	۸	۴۰۰۰/۸	۵۰۰/۱	
کل	۹	۵۵۱۲۳/۳		

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس برای گیاه کاهو و شاهد آن

منابع تغییرات	درجه آزادی	SS	MS	F
تیمار	۱	۶۸۶۴/۴	۶۸۶۴/۴	۱۰۰/۱**
خطا	۸	۵۴۸/۶	۶۸/۶	
کل	۹	۷۴۱۳		

جدول ۶. نتایج تجزیه واریانس برای گیاه گوجه‌فرنگی و شاهد آن

منابع تغییرات	درجه آزادی	SS	MS	F
تیمار	۱	۱۵۲۷۶۹/۶	۱۵۲۷۶۹/۶	۱۰۹/۹**
خطا	۸	۱۱۱۱۷/۹۶	۱۳۸۹/۷	
کل	۹	۱۶۳۸۸۷/۵۶		

جدول ۷. مقایسه میانگین‌های جذب کادمیوم توسط گیاهان مورد مطالعه

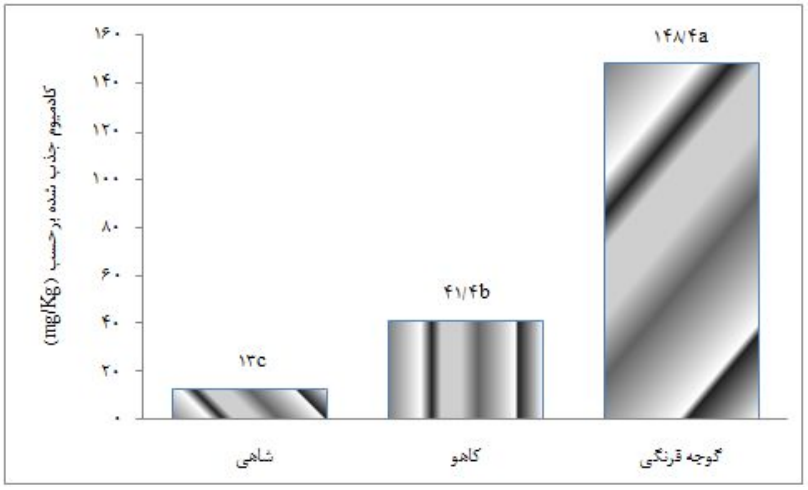
	تیمار		
	شاهی	کاهو	گوجه‌فرنگی
میانگین کل جذب کادمیوم	۱۴۷/۲b	۵۵ c	۲۵۳/۲a

میانگین‌های با حروف همانند، اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ ندارند.

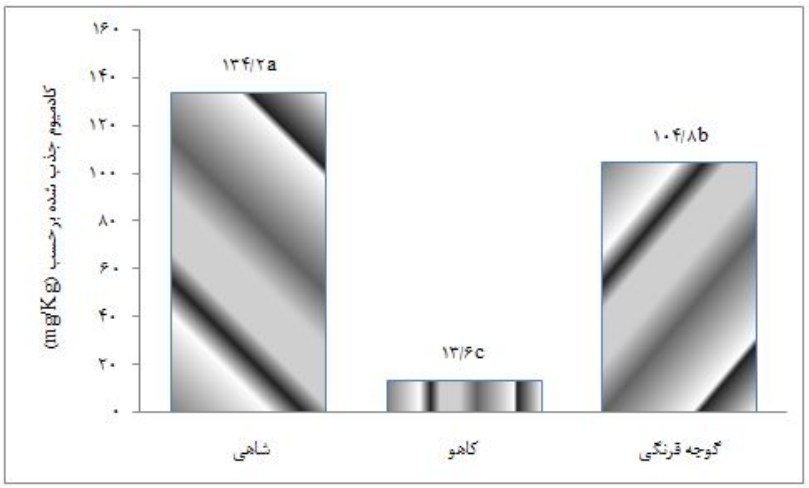
در ریشه هر سه گیاه از حد بالای مسمومیت هم تجاوز کرده است، که نشان‌دهنده زیاد بودن فاکتور غلظت گیاهی برای این سه گیاه است. همچنین، با مقایسه فاکتورهای انتقال به‌دست آمده، عنصر کادمیوم در شاهی و گوجه‌فرنگی بسیار فعال می‌باشد. این نتیجه با گزارش ژانگ و همکاران (۴۳) مطابقت دارد. در این خصوص، ذکر این نکته ضروری است که غلظت خطرناک کادمیوم برای انسان بسیار کمتر از غلظت مسمومیت برای گیاه است (۱۱). در نتیجه، گیاهانی که در مکان‌های آلوده رشد کرده‌اند منابع خطرناکی برای آلودگی مصرف‌کنندگان می‌باشند.

با توجه به جداول ۱ تا ۳، غلظت کادمیوم در ریشه گوجه‌فرنگی و کاهو بیشتر از ساقه بوده است. کادمیوم توسط ریشه جذب می‌شود و به اندام هوایی انتقال می‌یابد. این نتیجه با نتایج میرلز و همکاران (۳۴) و عابدی و همکاران (۱۴) مطابقت دارد. ولی در مورد شاهی، غلظت کادمیوم در ساقه بیشتر از ریشه بوده است که این امر به دلیل بیوماس بیشتر اندام هوایی این گیاه نسبت به ریشه آن بوده است.

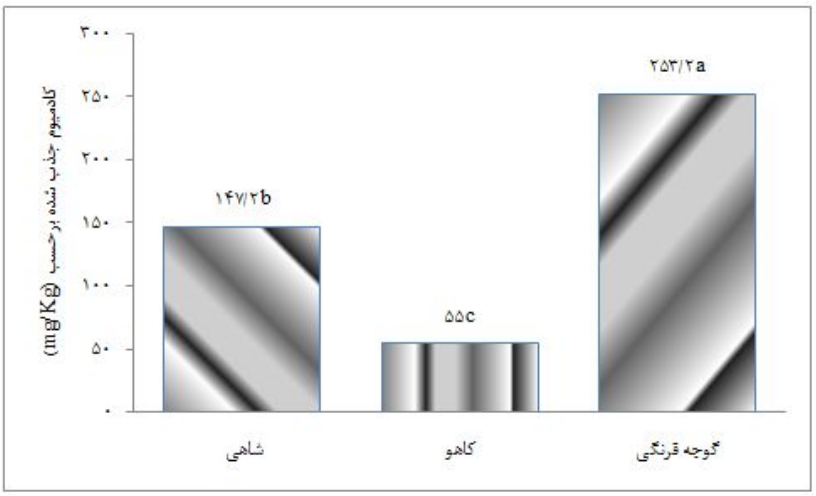
با در نظر گرفتن نتایج این پژوهش، میزان ضریب انتقال (Translocation Factor, TF) و فاکتور غلظت گیاهی (Bio concentration factor, BCF) کادمیوم برای سه گیاه مورد مطالعه محاسبه شد، که در جدول ۸ این نتایج نشان داده شده است. در تحقیقات انجام شده، مقادیر مختلفی برای ضریب



شکل ۱. میانگین جذب کادمیوم در ریشه (mg/kg) سه گیاه مورد مطالعه



شکل ۲. میانگین جذب کادمیوم در ساقه (mg/kg) سه گیاه مورد مطالعه



شکل ۳. مجموع میانگین جذب کادمیوم (mg/kg) در ریشه و ساقه سه گیاه مورد مطالعه

جدول ۸. مقادیر فاکتور غلظت گیاهی و ضریب انتقال کادمیوم برای سه گیاه مورد مطالعه

گیاه	فاکتور غلظت گیاهی			ضریب انتقال
	ریشه	ساقه	مجموع ریشه و ساقه	
شاهی	۰/۰۲۴	۰/۲۴۴	۰ /۲۶۸b	۱/۳a
کاهو	۰/۰۷۵	۰/۰۲۵	۰/۱bc	۰/۳۳bc
گوجه‌فرنگی	۰/۲۷	۰/۱۹	۰/۴۶a	۰/۶۵b

میانگین‌های دارای حروف همانند، اختلاف معنی‌دار ندارند.

جدول ۹. فاکتور انتقال برای سه عنصر روی، سرب و کادمیوم برای برخی از سبزی‌ها (۳۰)

گیاه مورد مطالعه	روی	سرب	کادمیوم
بامیه	۰/۵۵cd	۰/۲۲b	۰/۷۳cde
خیار چمبر	۱/۲a	۰/۲bc	۱/۱b
فلفل سبز	۰/۶۱bc	۰/۰۵de	۰/۸cd
بادمجان	۰/۸۵b	۰/۰۶d	۰/۸۶c
اسفناج	۰/۴de	۰/۳a	۱/۶a

میانگین‌های دارای حروف همانند، اختلاف معنی‌دار ندارند.

انتقال کادمیوم از خاک به گیاه گزارش شده که به چند مورد اشاره می‌گردد. با نمونه‌برداری از سبزی‌های مناطق آلوده ناشی از مصرف پساب‌های صنعتی و شهری و آب رودخانه آلوده به پساب، مشاهده شد که مقدار فاکتور انتقال کادمیوم در اسفناج، گوجه‌فرنگی و گل‌کلم به‌ترتیب برابر ۰/۵۲۳، ۰/۴۴۷ و ۰/۳۰۹ بود (۳۵). در تحقیقی دیگر، برخی از سبزی‌ها شامل تربچه تحت آبیاری با پساب، دارای فاکتور انتقال از خاک به گیاه بالایی (TF>1) برای کادمیوم بودند که نشان‌دهنده تحرک زیاد کادمیوم می‌باشد. در حالی‌که مقدار فاکتور انتقال برای سرب بسیار کم بود (۲۷). اسمیکال و همکاران (۴۰) با بررسی کاهوی کشت شده در خاک آلوده به فلزات سنگین، فاکتور انتقال سه عنصر مس، سرب و روی برای این گیاه را به ترتیب ۰/۱۲، ۰/۰۱ و ۰/۴ گزارش کردند. کاشیف و همکاران (۳۰) با مطالعه جذب فلزات سنگین توسط گروهی از سبزی‌ها، فاکتور انتقال برای سه عنصر روی، سرب و کادمیوم را برای هر یک از سبزی‌ها محاسبه کردند. در جدول ۹، گزیده‌ای از نتایج این محققین آورده شده است.

ژانگ و همکاران (۴۳) با مطالعه روی چهار گونه گیاهی پرکاربرد در مرداب‌ها گزارش کردند که در هر چهار گونه، فاکتور غلظت گیاهی در ریشه‌ها بسیار زیاد است. در واقع، کادمیوم در ابتدا در ریشه ذخیره شده و سپس با ضرایب انتقال متفاوت به دیگر اندام‌های گیاهی منتقل می‌شود. در بین گونه‌های بررسی شده، گونه سوم با نام علمی *Brassica Juncea* بیشترین ضریب انتقال را دارا بود (۴۳).

در این تحقیق نیز ضریب انتقال برای گوجه‌فرنگی ۰/۶۵ به‌دست آمد که با نتایج تحقیق ذکر شده تقریباً برابر است. نکته قابل توجه میزان TF شاهی است که بسیار زیاد است. این نتیجه بیان‌کننده تحرک بسیار زیاد این عنصر در شاهی است که با نظر گوپتا و همکاران (۲۷) و ناصر و همکاران (۳۵) که سبزی‌های خوراکی را مورد مطالعه قرار دادند هم‌خوانی دارد.

نتیجه‌گیری

غلظت خطرناک کادمیوم برای انسان بسیار کمتر از غلظت مسمومیت برای گیاه است. در نتیجه، گیاهانی که در مکان‌های

آلوده رشد کرده‌اند منابع خطرناکی برای آلودگی مصرف‌کنندگان آنها می‌باشند. هرچند میزان ضریب انتقال کاهو به نسبت شاهی و گوجه‌فرنگی کم است، اما میزان مصرف سرانه کاهو برای هر نفر بسیار بیشتر از شاهی است، که در مدیریت آبیاری با پساب آلوده باید این نکته در نظر گرفته شود. بدین ترتیب، پایش میزان فلزات سنگین در مناطقی که با پساب فاضلاب آبیاری می‌شوند از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

منابع مورد استفاده

۱. اکبری، غ.، ن. حریری، ب. فوقی، ر. شاه نظری، ا. لطفی‌فر و س. متقی. ۱۳۸۷. اثر فاضلاب بر تجمع فلزات سنگین و ارزش غذایی تره، پیازچه و کاهو. سومین کنگره ملّی بازیافت و استفاده از منابع آلی تجدید شونده در کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان، اصفهان.

۲. بهمنیار، م. ع. ۱۳۸۶. تأثیر مصرف فاضلاب در آبیاری گیاهان زراعی بر مقدار برخی از عناصر سنگین خاک و گیاهان. محیط شناسی ۴۴: ۱۹- ۲۶.

۳. ترابیان، ع. و م. مهجوری. ۱۳۸۱. بررسی اثر آبیاری با فاضلاب روی جذب فلزات سنگین به وسیله سبزی‌های برگی جنوب تهران. علوم خاک و آب ۱۶(۲): ۴۳-۵۶.

۴. تقی‌پور، م. ۱۳۸۸. تغییرات مکانی برخی فلزات سنگین در خاک‌های سطحی بخشی از استان همدان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۵. جعفرزاده حقیقی، ن. ۱۳۶۹. ردیابی برخی فلزات سنگین در آب، خاک و محصولات کشاورزی مجاور رودخانه فصلی شیراز. سمینار آب و فاضلاب، دانشگاه علوم پزشکی چمران، مرکز بهداشت خوزستان، اهواز.

٦. خانی، ح. و ط. زویا سماوی. ۱۳۸۹. استفاده از پساب تصفیه‌خانه همدان جهت توسعه دیمزار. دومین سمینار ملی جایگاه آب‌های بازیافتی و پساب در مدیریت منابع آب: کاربردها در کشاورزی و فضای سبز، مشهد.

۷. رحمانی، ح. ۱۳۸۷. کیفیت پساب صنعتی شرکت ذوب آهن اصفهان واثرات آن بر اراضی تحت کشت مو. علوم محیطی ۴: ۱۳۵- ۱۴۴.

۸. عرفان‌منش، م. و م. افیونی. ۱۳۸۱. آلودگی محیط زیست: آب، خاک و هوا. انتشارات ارکان، اصفهان.

۹. کدخدائی، م. ۱۳۸۵. بررسی اثر پساب کارخانه ذوب آهن اصفهان روی برخی خصوصیات خاک‌های تحت کشت چند گونه درختی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۱۰. کفیل‌زاده، ف.، م. کارگر و ا. کدیور. ۱۳۸۵. بررسی غلظت کادمیم، روی، مس، آهن و نیکل در رودخانه خشک شیراز و برخی محصولات کشاورزی مجاور. علوم و تکنولوژی محیط زیست ۸(۴): ۶۷-۷۵.

۱۱. گیویان‌راد، م. ه.، ط. صادقی، ک. لاریجانی و س. ا. حسینی. ۱۳۹۰. تعیین فلزات سنگین کادمیوم و سرب در سبزی‌های خوراکی کاهو، نعناع و تره کشت شده در اراضی مختلف جنوب تهران. علوم غذایی و تغذیه ۸(۲): ۳۸-۴۴.

۱۲. یارقلی، ب. ۱۳۸۹. بررسی مقدار جذب و تجمع کادمیم از خاک آلوده به اندام مختلف چهار گونه زراعی (گندم، اسفناج، خیار و هویج). دومین سمینار ملی جایگاه آب‌های بازیافتی و پساب در مدیریت منابع آب: کاربردها در کشاورزی و فضای سبز، مشهد

۱۳. درگاه الکترونیکی جهاد کشاورزی http://www.maj.ir.

14. Abedi Koupai, J., M. Afyuni, B. Mostafazdeh and M.R. Bagheri. 2001. Influence of treated wastewater and irrigation systems on soil physical properties in Isfahan province. PP. 165-173. *In:* Ragab, R., G. Pearce, J. C. Kim,

S. Nairizi and A. Hamdy (Eds.), Proceeding of International Workshop on Wastewater Reuse Management, 52nd IEC Meeting and 1st Asian Regional Conference of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), Seoul, Korea.

15. Afyuni, M., R. Schulin and J. Abedi Koupai. 2003. Effect of sewage sludge on heavy metals and nitrate transport in calcareous soil. International Conference on Soil and Groundwater Contamination and Clean up in Arid Countries, Sultan Qaboos University, Oman.
16. Akbar Jan, F., M. Ishaq, S. Khan, I. Ihsanullah, I. Ahmad and M. Shakirullah. 2010. A comparative study of human health risks via consumption of food crops grown on wastewater irrigated soil (Peshawar) and relatively clean water irrigated soil (lower Dir). J. Hazard. Mater. 179: 612-621.
17. Alloway, B.J. 1990. Heavy Metals in Soils: Lead. Blackie and Glasgow, Ltd., London, pp. 177-196.
18. Alloway, B.J. 1995. Cadmium. PP. 122-151. *In:* Alloway, B.J. (Ed.), Heavy Metals in Soils, 2nd Ed., Chapman and Hall, Glasgow.
19. Arora, M., B. Kiran, Sh. Rani, A. Rani, B. Kaur and N. Mittal. 2008. Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources, Food Chem. 111: 811-815.
20. Aycicek, M., O. Kaplan and M. Yaman. 2008. Effect of cadmium on germination, seedling growth and metal contents of sunflower (*Helianthus annus* L.). Asian J. Chem. 20(4): 2663-2672.
21. Bowen, H.J.M. 1966. Trace Elements in Biochemistry. 1st edition, Academic Press, London.
22. Braude, G.L., A.M. Nash, W.J. Wolf, R.L. Carr and R.L. Channey. 1980. Cadmium and lead content of soybean products. J. Food Sci. 45: 1187-1189.
23. Dalzell, H.W., A.J. Biddlestone, K.P. Gray and K. Thurairajan. 1987. Soil Management: Compost Production and Use in Tropical and Subtropical Environments. FAO Soils Bulletin, No. 56, 179 p.
24. Duker Schein, J.I. 1999. Cadmium and mercury in emergent Majies from the upper Mississippi River. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 23(109): 723-738.
25. Fatta, D. and N. Kythreotou. 2005. Wastewater as valuable water resource: Concerns, constraints and requirements related to reclamation, recycling and reuse. IWA International Conference on Water Economics, Statistics, and Finance, Greece.
26. Feizi, M. 2001. Effect of treated wastewater on accumulation of heavy metals in plants and soil. International Workshop on Wastewater Reuse Management, ICID-CIID, Seoul, Korea, pp. 137-146.
27. Gupta, S., S. Satpati, S. Nayek and D. Garai. 2010. Effect of wastewater irrigation on vegetables in relation to bioaccumulation of heavy metals and biochemical changes. Environ. Monit. Assess. 165: 169-177.
28. Kabata-Pendias, A. and H. Pendias. 1992. Trace Elements in Soils and Plants. 2nd Ed., CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
29. Kabata-Pendias, A. and H. Pendias. 2001. Trace Elements in Soils and Plants. Third Ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, 413 p.
30. Kashif, S.R., M. Akram, M. Yasee and S. Ali. 2009. Studies on heavy metals status and their uptake by vegetables in adjoining areas of Hudiara drain in Lahore. Soil Environ. 28: 7-12.
31. Lee, T.M., H.Y. Lai and Z.S. Chen. 2004. Effect of chemical amendments on the concentration of cadmium and lead in long-term contaminated soils. Chemosphere 57: 1459-1471.
32. Mapanda, F., E.N. Mangwayana, J. Nyamangara and K.E. Giller. 2005. The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare. Agric. Ecosys. Environ. 107: 151-165.
33. Mireles, A., C. Solis, E. Andrade, M. Lagunas-Solar, C. Pina and R.G. Flocchini. 2004. Heavy metal accumulation in plants and soil irrigated with wastewater from Mexico city. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 219-220: 187-190.
34. Moyo, D.Z. and C. Chimbira. 2009. The Effect of single and mixed treatments of lead and cadmium on soil bioavailability, uptake and yield of *Lactuca sativa* irrigated with sewage effluent under greenhouse conditions. Amer.-Euras. J. Agric. Environ. Sci. 6(5): 526-531.
35. Naser, H.M., N.C. Shil, N.U. Mahmud, M.H. Rashid and K.M. Hossain. 2009. Lead, cadmium and nickel contents of vegetables grown in industrially polluted and non-polluted areas of Bangladesh. Bangladesh J. Agril. Res. 34(4): 545-554.
36. Nourbakhsh, Sh. and A. Ghazanfari Moghaddam. 2001. Effect of heavy metals in soil on growth and edible parts of plants. Fourth Environmental Sanitary Congress, Shahid Saddoughi University,Yazd, Iran, pp. 7-15.
37. Pruvot, C. and F. Douay. 2006. Heavy metals in soil, crops and grass as a source of human exposure in the former mining areas. J. Soil Sed. 6: 215-220.
38. **S**chickler, H. and H. Capsi. 1999. Response of the genus Alyssum. Physiol. Plant. 105: 39-45.
39. Singh, B.R. and E. Steinnes. 1994. Soil and water contamination by heavy metals. PP. 233-271. *In:* Lai, R. and B.Z.

Stewart (Eds.), Soil Processes and Water Quality, Lewis Pub., London.

40. Smical, A.I., V. Hotea, V. Oro, J. Juhasz and E. Pop. 2008. Studies on transfer and bioaccumulation of heavy metals from soil into lettuce. Environ. Eng. Manage. J. 5: 609-615.

41. Tran, T.A. and L.P. Popova. 2013. Functions and toxicity of cadmium in plants: Recent advances and future prospects. Turk. J. Bot. 37: 1-13.

42. Yang, X.E., X.X. Long, H.B. Ye, Z.L. He, D.V. Calvert and P.J. Stoffella. 2004. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* Hance). Plant Soil 259: 181-189.

43. Zhang, Z., Z. Rengel and K. Meney. 2010. Cadmium accumulation and translocation in four emergent wet land species. Water Air Soil Pollut. 212: 239-249.