

بررسی ضریب انتقال کادمیوم، روی، مس و سرب از خاک به گیاه سیب‌زمینی تحت تأثیر کاربرد فاضلاب

نصرالدین پارسا فر و صفر معروفی^{*۱}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۲/۸)

چکیده

این تحقیق در شرایط گلخانه‌ای و در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار و پنج تیمار شامل فاضلاب خام (T_1)، فاضلاب تصفیه شده (T_2)، ترکیب فاضلاب خام و آب معمولی به نسبت ۵۰ درصد (T_3)، ترکیب فاضلاب تصفیه شده و آب معمولی به نسبت ۵۰ درصد (T_4) و آب معمولی (T_5) انجام شد. لایسیمترها در مهر ماه ۱۳۸۸ ساخته و با یک خاک دو لایه پر شدند. لایه بالایی (۳۰ سانتی‌متر) و لایه پایینی (۴۰ سانتی‌متر) به ترتیب لوم شنی و لوم رسی شنی بودند. نتایج نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری بر ضریب انتقال عناصر سنگین از خاک به اندام هوایی (به جزء کادمیوم) و غده‌های سیب‌زمینی (به جزء روی و مس) در سطح یک درصد معنی‌دار می‌باشد. بیشترین و کمترین ضریب انتقال عناصر سنگین به ترتیب در تیمارهای T_5 و T_1 دیده شد. ضریب انتقال کادمیوم به اندام‌های هوایی کمتر از غده‌ها بود. ضریب انتقال عناصر به غده‌ها در مورد روی، مس و سرب کمتر از اندام‌های هوایی مشاهده گردید. هم‌چنین بیشترین ضریب انتقال از خاک به اندام هوایی به ترتیب مربوط به کادمیوم (۰/۳۳۱ تا ۰/۴۶۳)، روی (۰/۲۳۰ تا ۰/۳۸۳)، مس (۰/۱۷۳ تا ۰/۳۸۶) و سرب (۰/۰۰۳ تا ۰/۰۵۷) بوده و در خصوص غده‌های سیب‌زمینی بیشترین مقدار (به جزء تیمار T_5) به ترتیب مربوط به کادمیوم (۰/۴۳۹ تا ۰/۵۷۲)، مس (۰/۰۸۱ تا ۰/۱۳۸)، روی (۰/۱۷۰ تا ۰/۲۱۷) و سرب (۰ تا ۰/۰۱۷) دیده شد. کاربرد ترکیب فاضلاب با آب در آبیاری کوتاه مدت می‌تواند امکان‌پذیر باشد اما یک برنامه پایش فلزات سنگین ضروری است.

واژه‌های کلیدی: خاک، سیب‌زمینی، ضریب انتقال، عناصر سنگین، فاضلاب، کشت لایسیمتری

۱. گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: marofi@basu.ac.ir

مقدمه

هرگاه آب با کیفیت خوب کمیاب باشد، آب با کیفیت پایین (Water marginal quality) مورد توجه قرار می‌گیرد. از آنجا که استفاده از فاضلاب شهری در آبیاری از لحاظ بهداشتی با خطرهایی همراه است، به عنوان یک منبع آب با کیفیت پایین شناخته می‌شود. بهره‌برداری از آب با کیفیت پایین، پیچیده و مشکل‌تر از آب با کیفیت خوب است و نیازمند مدیریت اجرایی پیچیده و روش‌های کنترل و نظارت دقیق‌تر است (۸). یکی از مشکلات احتمالی کاربرد پساب فاضلاب در آبیاری تأثیر احتمالی آن بر ویژگی‌های شیمیایی خاک است. چنانچه غلظت برخی عناصر موجود در پساب از میزان استاندارد بیشتر باشد، غلظت این عناصر در خاک نیز به تدریج افزایش یافته و از حد آستانه تحمل گیاه فراتر خواهد رفت. در عین حال ممکن است موجب آلودگی آب‌های زیرزمینی و بروز مشکلات زیست محیطی شوند (۲۳).

سیب‌زمینی گیاهی یکساله است که بعد از گندم، برنج، ذرت و جو به عنوان مهم‌ترین محصول جهان طبقه‌بندی شده است (۱۱) و از نظر تعداد کشورهای تولید کننده در مقام دوم بعد از ذرت قرار دارد (۶). در سال زارعی ۸۸-۱۳۸۷ استان همدان با ۱۶/۶۳ درصد اراضی و با ۲۱/۷۲ درصد از تولید سیب‌زمینی کشور، مقام اول را در این موارد به خود اختصاص داده است (۲). فارکویت و همکاران (۱۷) بیان کردند که در داکار سنگال، بیش از ۶۰ درصد سبزیجات مصرفی در شهر، با استفاده از مخلوط آب زیرزمینی و فاضلاب تصفیه نشده رشد داده شده‌اند. اسمیت و نصر (۲۸) گزارش کردند که یک دهم یا بیشتر جمعیت جهان، غذایی که با فاضلاب آبیاری شده است را مصرف می‌کنند، در استفاده از فاضلاب، ظاهراً مسائل روانی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده است.

تجمع فلزات سنگین در گیاه می‌تواند براساس متوسط ضریب انتقال فلز مورد بررسی قرار گیرد. ضریب انتقال عبارت است از مقدار غلظت فلز در گیاه به مقدار غلظت همان فلز در خاک، ضریب انتقال به نوع فلز سنگین، خاک، دما، pH، ماده آلی

خاک و نوع گیاه بستگی دارد (۱۹). در زمینه تأثیر فاضلاب بر خاک و گیاه مطالعاتی در سطح دنیا صورت گرفته است که از جمله فیتزپاتریک و همکاران (۱۳) به این نتیجه رسیدند که گونه‌های گیاهی مختلف واکنش یکسانی به آبیاری با فاضلاب تصفیه شده نشان نمی‌دهند. کلاپ و همکاران (۱۶) نتیجه گرفتند که تأثیر پساب در مقایسه با کاربرد کود شیمیایی به صورت نیترات آمونیوم از نظر تأمین نیاز گیاه کاملاً قابل رقابت می‌باشد. عرفانی آگاه (۹) نتیجه‌گیری نمود که غلظت عناصر سنگین در کلیه اندام‌های گیاهان کاهو و گوجه فرنگی در کلیه تیمارهای فاضلاب نسبت به تیمار شاهد افزایش داشته است.

نتایج آلهم و همکاران (۱۵) نشان داد که جایجایی بخشی از فلزات سنگین از خاک به میوه گوجه فرنگی به دلیل حضور این فلزات در پساب تصفیه شده رخ داده است، با این حال، غلظت فلزات سنگین در میوه گوجه فرنگی پایین‌تر از مقدار ارائه شده توسط استاندارد اردن می‌باشند. کالاوروزیوتیس و همکاران (۲۰) در تحقیقی گلخانه‌ای در کشور یونان نتیجه گرفتند که استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه شده شهری برای آبیاری دو گیاه کلم گل و کلم بروکسل به طور معنی‌دار محتوی روی و کادمیوم را افزایش داده است. نتایج کیزیل‌اگلو و همکاران (۲۱) در بررسی اثر آبیاری فاضلاب تصفیه شده و تصفیه نشده نشان داد که آبیاری با فاضلاب آهن، منگنز، روی، مس، سرب، نیکل و کادمیوم کلم گل و کلم قرمز را افزایش داد.

علیزاده و همکاران (۱۰) در بررسی مقدار تجمع فلزات سنگین در گیاهان علوفه‌ای تحت آبیاری با فاضلاب نتیجه گرفتند که مقدار تجمع در بوته ذرت آبیاری شده با فاضلاب ۱/۵ برابر بوته ذرت آبیاری شده با آب چاه است. به غیر از منگنز و روی تجمع سایر عناصر در بوته ذرت بیش از حد مجاز و در بلال و دانه ذرت مقادیر نیکل، کروم، سرب، روی کمتر از حد مجاز و منگنز و کادمیم بیشتر از حد مجاز درون گیاه دیده شد. مرادمند و بیگی هرچگانی (۱۳) در بررسی اثر آبیاری با پساب تصفیه شده شهری بر توزیع سرب در اندام

موثر، از لایسیمتر استفاده گردید. تعداد ۱۵ عدد لایسیمتر استوانه‌ای فلزی حجمی (عایق‌بندی شده) با ظرفیت ۲۲۰ لیتر (قطر ۶۰ و ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر) استفاده شد. علت انتخاب سیب‌زمینی به دلیل اهمیت آن در استان همدان و سطح وسیع زیر کشت آن در این استان و کشور می‌باشد، بدین منظور این گیاه انتخاب گردید. جهت زه‌کشی آب موجود در قسمت پایین لایسیمترها، از یک سیستم زه‌کشی ویژه‌ای استفاده شد و زه‌آب‌ها در محفظه مخصوصی که بدین منظور تعبیه شده بود، جمع‌آوری گردید. در شکل ۱ شمای کلی از لایسیمتر و در شکل ۲ تصویر واقعی از لایسیمتر مورد استفاده حاوی گیاه نشان داده شده است. پس از طراحی، ساخت و استقرار لایسیمترها در محل مورد نظر، جهت حصول به شرایطی واقعی خاک، پر نمودن آنها در طی چند مرحله و به تدریج توأم با آبیاری صورت گرفت، تا تراکم خاک لایسیمترها در حد شرایط طبیعی خاک‌های منطقه صورت گیرد. به منظور ایجاد شرایط یکنواخت در خاک مورد نظر و جداسازی ذرات درشت دانه آن، از الک با قطر روزنه‌های یک سانتی‌متر استفاده شد (۵). ضمناً با توجه به خاک‌های منطقه، از یک خاک دو لایه که لایه فوقانی (۰-۳۰ سانتی‌متر) با بافت لومی شنی و لایه زیرین (۳۰-۷۰ سانتی‌متر) با بافت لوم رسی شنی بود، استفاده شد. در نهایت کلیه لایسیمترها تا ارتفاع تقریبی ۱۰ سانتی‌متر پایین‌تر از قسمت فوقانی خود، بر اساس جرم مخصوص ظاهری (که برابر ۱/۴۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود) از دو لایه مذکور خاک پر شدند. در جدول ۱ بافت و درصد ذرات تشکیل‌دهنده خاک، در دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۷۰ سانتی‌متری ارائه شده است. شایان ذکر است که بافت خاک مورد استفاده به روش هیدرومتری تعیین گردید.

پس از پر شدن لایسیمترها در مهر ماه ۱۳۸۸، جهت جلوگیری از شستشوی خاک، عملیات آبیاری به روش آبیاری سطحی و با استفاده از یک آبپاش دستی در شرایط بدون کشت گیاه، بطور منظم و پیوسته (هفتگی) در طی یک بازه زمانی پنج ماهه صورت گرفت تا شرایط طبیعی و ایجاد مجاری رخنه و

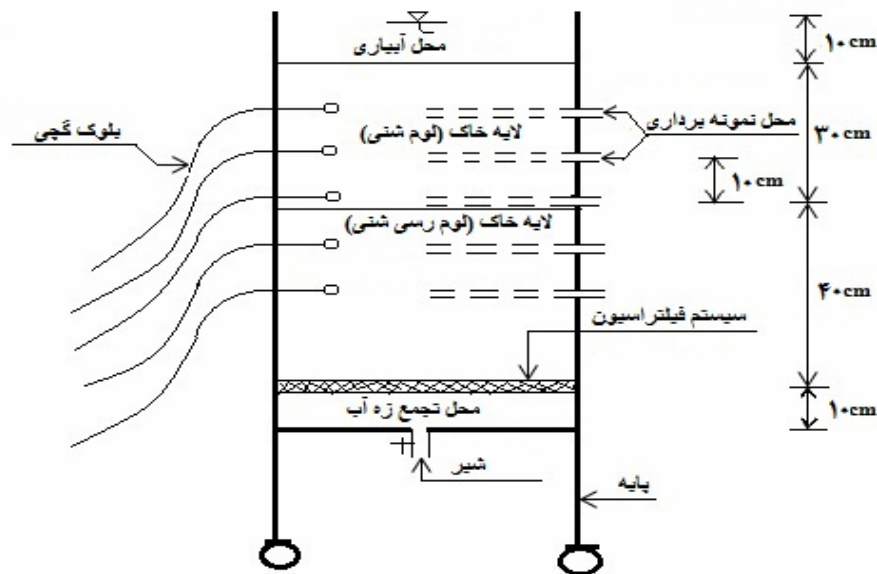
فلفل سبز و خاک نتیجه گرفتند که علی‌رغم غلظت کمتر از حد مجاز عناصر سنگین در پساب تصفیه شده شهری شهرکرد، غلظت عناصر سنگین در خاک و گیاه نسبت به شاهد افزایش نشان داده است. که بیانگر تجمع عناصر سنگین در خاک و گیاه با گذشت زمان است. کلی و همکاران (۲۲) با بررسی اثر آبیاری با فاضلاب تصفیه شده نشان دادند که تحرک و جذب سطحی فلزات سنگین وابسته به محتوی (مقدار) فلزی فاضلاب تصفیه شده، حرکات کرین آلی، درصد بخش رس و زمان آبیاری است. آبیاری با فاضلاب تصفیه شده می‌تواند شوری و محتوی فلزات سنگین خاک را افزایش دهد.

جمع‌بندی تحقیقات قبلی در زمینه انتقال عناصر سنگین از آب و خاک آلوده به محصولات زراعی نشان می‌دهد که پژوهش‌های قبلی انجام شده عمدتاً در زمینه سبزیجات و صیفی‌جات بوده و در زمینه محصولات غده‌ای و بررسی وضعیت انتقال عناصر سنگین از خاک به اندام‌های مختلف این گیاهان در اثر کاربرد فاضلاب‌ها پژوهش‌های اندکی صورت گرفته است. لذا در این پژوهش سعی شد که تیمارهای مورد استفاده حتی‌المقدور از گستردگی بیشتری برخوردار باشند. بنابراین علاوه بر فاضلاب تصفیه شده، فاضلاب خام، ترکیب این فاضلاب‌ها با آب معمولی نیز در نظر گرفته شد. هم‌چنین علی‌رغم انجام تحقیقات مختلف در زمینه اثرات فاضلاب‌ها بر خصوصیات خاک و گیاه، اطلاع دقیقی از مقدار انتقال عناصر سنگین از خاک به محصولات غده‌ای، به ویژه مقدار انتقال در بخش‌های مختلف خوراکی و غیر خوراکی این محصولات در دست نیست. لذا در این راستا پژوهش حاضر با هدف بررسی تاثیر تیمارهای مختلف فاضلاب بر میزان ضریب انتقال عناصر کادمیوم، روی، مس و سرب از خاک به اندام‌های هوایی و غده سیب‌زمینی در شرایط لایسیمتری اجرا شد.

مواد و روش‌ها

۱- آماده‌سازی بستر کشت

در این پژوهش به منظور کنترل هر چه مطلوب‌تر کلیه عوامل



شکل ۱. شمایی از لایسیمتر و لایه‌های خاک به کار رفته در تحقیق



شکل ۲. لایسیمتر استفاده شده در تحقیق حاضر به همراه گیاه کشت شده در آن

جدول ۱. درصد ذرات تشکیل دهنده خاک.

رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	عمق خاک (سانتی‌متر)	بافت خاک
۱۸/۹۷	۲۰/۲۶	۶۰/۷۷	۳۰-۰	لوم شنی
۲۵/۵۲	۲۱/۹۲	۵۲/۵۶	۷۰-۳۰	لوم رسی شنی

آبیاری، فاضلاب تصفیه‌خانه شهر سرکان (به‌صورت خام و تصفیه شده و به‌طور جداگانه از فاصله ۸۵ کیلومتری همدان) به محل اجرای تحقیق (گلخانه دانشکده کشاورزی) حمل گردید و بلافاصله عملیات آبیاری صورت گرفت. حجم آب

ترجیحی در خاک صورت گردید. پس از کشت گیاه در اسفند ۱۳۸۸ عملیات آبیاری لایسیمترها با توجه به شرایط رطوبتی خاک توسط بلوک‌های گچی کنترل شد و به‌طور متوسط هر ۱۱ روز یکبار انجام گرفت. به همین منظور، برای هر دوره

۰/۰۵ (نرمال) استفاده شد.

نمونه‌های غده و اندام‌های هوایی سیب‌زمینی جمع‌آوری شده و با آب معمولی و آب مقطر آب‌شویی گردیدند و در درجه حرارت محیط آزمایشگاه به تدریج خشک شدند. سپس نمونه‌ها وزن شده و در دمای ۷۰-۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت خشک شدند (غده‌ها بصورت خورد شده خشک شدند). نمونه‌های خشک شده ابتدا توزین و سپس به وسیله آسیاب برقی پودر و برای عصاره‌گیری از نمونه‌ها از روش خاکستر استفاده گردید. بدین ترتیب که مقدار یک گرم از پودر حاصل دقیقاً وزن و مدت یک شبانه روز در ظرف چینی در کوره در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده و سپس خاکستر تهیه شده در ۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۲۰ درصد حل و با کاغذ صافی واتمن ۴۲ فیلتر شد و عصاره جمع‌آوری شده و عناصر سنگین اندازه‌گیری شدند. برای تعیین غلظت عناصر سنگین در خاک و گیاه از روش اسپکتروفتومتری جذب اتمی (با شعله) استفاده شد (۱۰).

۳- تحلیل نتایج

در تحقیق حاضر به منظور مقایسه ضریب انتقال عناصر کادمیوم، روی، مس و سرب از خاک، به اندام سیب‌زمینی (در تیمارهای آبیاری)، مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون دانکن و در محیط نرم‌افزار SAS 9.1 صورت گرفت. هم‌چنین معنی‌داری در سطح پنج درصد ($P < 0.05$) در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

۱- غلظت عناصر سنگین در فاضلاب خام و تصفیه شده

در جدول ۲ غلظت عناصر سنگین در فاضلاب خام و پساب تصفیه شده همراه با مقادیر مجاز آنها (با توجه به استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست ایران و سازمان فائو) ارائه گردیده است (۲۵). همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود که در فاضلاب تصفیه شده کلیه عناصر در حد مجاز بودند. در فاضلاب خام نیز تمامی عناصر سنگین (به جزء کادمیوم) در حد مجاز قرار دارند.

استفاده‌شده در هر مرحله در حدود ۳۰ الی ۳۵ لیتر بود و در مجموع هشت آبیاری برای همه تیمارها صورت گرفت. این پژوهش به صورت طرح کاملاً تصادفی با پنج تیمار آبیاری و سه تکرار (در شرایط کشت گلخانه‌ای) به اجرا درآمد. جهت اجرای این تحقیق پنج تیمار آبیاری شامل: فاضلاب خام (T_1)، فاضلاب تصفیه شده (T_2)، ترکیب ۵۰ درصد فاضلاب خام و آب معمولی (T_3)، ترکیب ۵۰ درصد فاضلاب تصفیه شده و آب معمولی (T_4) و آب معمولی (T_5) به کار گرفته شد. در اسفند ۱۳۸۸ غده‌های سیب‌زمینی (رقم مارفونا) به فاصله مساوی از هم و در عمق ۱۰ سانتی‌متری در هر لایسمتر کشت گردیدند. بدین منظور، غده‌ها چند روز قبل از کشت در یک محیط گرم و بدون نور مستقیم خورشید نگهداری شدند تا جوانه زده و آماده کشت شوند. پس از کشت و انجام مرحله رشد، در هفته اول تیر ماه ۱۳۸۹ غده‌های سیب‌زمینی برداشت گردیدند.

۲- اندازه‌گیری عناصر سنگین در خاک و گیاه

به منظور تعیین میزان واقعی جذب عناصر سنگین توسط اندام سیب‌زمینی، ضریب انتقال عناصر محاسبه گردید. ضریب انتقال عبارت است از نسبت غلظت فلز در گیاه به غلظت همان فلز در خاک (۲۶ و ۲۷). برای تعیین هر ضریب انتقال، باید به این نکته توجه داشت که حتماً هر نوع گیاه با نمونه خاک مربوط به خود در نظر گرفته شود. و از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد.

$$TF = Mpc/Msc \quad [1]$$

که در آن TF فاکتور یا ضریب انتقال، Mpc غلظت فلز در گیاه (Msc, g/gu) غلظت فلز در خاک (mg/kg) می‌باشد.

به منظور محاسبه ضریب انتقال کادمیوم، روی، سرب و مس، نمونه‌های خاک هر تیمار از عمق ۰-۲۰ سانتی‌متری جمع‌آوری و در آزمایشگاه در محل سرپوشیده و در هوای آزاد خشک شدند. نمونه‌ها پس از خرد شدن مکانیکی از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند و سپس پنج گرم از آن در ظرف پلی اتیلنی ریخته و برای تهیه عصاره خاک از مخلوط دو اسید (اسید سولفوریک ۰/۰۲۵ نرمال و اسید کلریدریک

۲- ضریب انتقال عناصر از خاک به اندام‌های هوایی

سیب‌زمینی

الف) کادمیوم

نتایج به دست آمده نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری بر ضریب انتقال کادمیوم از خاک به اندام‌های هوایی سیب‌زمینی غیر معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین ضریب انتقال از خاک به اندام‌های هوایی در تیمار T_1 و کمترین در تیمار T_5 مشاهده گردید. ترتیب بزرگی میزان ضریب انتقال کادمیوم به اندام‌های هوایی، در تیمارهای آبیاری به صورت $T_1 > T_2 > T_4 > T_3 > T_5$ بوده و اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای T_5 و T_1 و بین تیمارهای T_2 و T_5 در سطح پنج درصد در مورد ضریب انتقال کادمیوم از خاک به اندام‌های هوایی مشاهده گردید (جدول ۴).

ب) سرب

اثر تیمارهای آبیاری بر ضریب انتقال سرب از خاک به اندام‌های هوایی سیب‌زمینی معنی‌دار (در سطح یک درصد) بوده و بیشترین ضریب انتقال سرب از خاک به اندام‌های هوایی در تیمار T_1 و کمترین آن در تیمار T_5 مشاهده گردید (جدول ۳). هم‌چنین در این تحقیق اختلاف معنی‌داری (در سطح پنج درصد) بین تیمارهای فاضلاب خام و شاهد از نظر ضریب انتقال سرب از خاک به اندام سیب‌زمینی وجود داشت. ترتیب بزرگی میزان ضریب انتقال فلز سرب از خاک به اندام‌های هوایی در تیمارهای آبیاری به صورت $T_1 > T_3 > T_2 > T_4 > T_5$ مشاهده گردید (جدول ۴).

ج) روی

اثر تیمارها بر ضریب انتقال عنصر روی از خاک به اندام‌های هوایی معنی‌دار (در سطح پنج درصد) بوده است (جدول ۳). بیشترین میزان ضریب انتقال این فلز از خاک به اندام‌های هوایی در تیمار T_1 و کمترین میزان آن در تیمار T_5 مشاهده گردید. هم‌چنین اختلاف معنی‌داری (در سطح پنج

درصد) بین تیمارهای فاضلاب خام و شاهد از نظر ضریب انتقال عنصر روی از خاک به اندام سیب‌زمینی مشاهده گردید. ترتیب بزرگی ضریب انتقال این عنصر از خاک به اندام‌های هوایی در تیمارهای آبیاری به صورت $T_1 > T_3 > T_2 > T_4 > T_5$ مشاهده گردید (جدول ۴).

ه) مس

بر اساس این نتایج، اثر تیمارهای آبیاری بر ضریب انتقال مس از خاک به اندام‌های هوایی سیب‌زمینی معنی‌دار (در سطح پنج درصد) می‌باشد (جدول ۳). بیشترین میزان ضریب انتقال از خاک به اندام‌های هوایی در تیمار T_1 و کمترین مقدار آن در تیمار T_5 مشاهده گردید. ترتیب بزرگی ضریب انتقال مس از خاک به اندام‌های هوایی به صورت $T_1 > T_3 > T_2 > T_4 > T_5$ مشاهده گردید. اختلاف معنی‌داری (در سطح پنج درصد) بین تیمارهای T_5 و T_1 و هم‌چنین بین تیمارهای T_3 و T_5 در مورد ضریب انتقال مس از خاک به اندام‌های هوایی مشاهده گردید (جدول ۴).

۳- ضریب انتقال عناصر از خاک به غده سیب‌زمینی

الف) کادمیوم

نتایج نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری بر میزان ضریب انتقال کادمیوم از خاک به غده معنی‌دار (در سطح یک درصد) می‌باشد (جدول ۵). بیشترین میزان ضریب انتقال در غده‌های تیمار T_1 و کمترین میزان آن در تیمار T_5 دیده شد. ترتیب بزرگی ضریب انتقال کادمیوم در غده به صورت $T_1 > T_3 > T_2 > T_4 > T_5$ مشاهده گردید. بین تیمار T_1 و سایر تیمارها اختلاف معنی‌دار (در سطح پنج درصد) در ضریب انتقال کادمیوم از خاک به غده‌های سیب‌زمینی مشاهده گردید. هم‌چنین این نتایج نشان داد که ضریب انتقال کادمیوم از خاک به اندام‌های هوایی کمتر از غده‌ها می‌باشد (جدول ۶).

ب) سرب

اثر تیمارهای آبیاری بر ضریب انتقال سرب در غده‌ها معنی‌دار

جدول ۲. عناصر سنگین فاضلاب‌های خام و تصفیه شده (میلی‌گرم در لیتر) و مقایسه آنها با استانداردها

عناصر	نوع فاضلاب		میزان مجاز استاندارد	
	خام	تصفیه شده	سازمان محیط زیست *	فائو **
مس	۰/۰۷۰	۰/۰۵۲	۰/۲	۰/۲
روی	۰/۶۱۵	۰/۳۷۵	۲	۲
کادمیوم	۰/۰۱۴	۰/۰۱۰	۰/۰۵	۰/۰۱
سرب	۰/۰۶۴	۰/۰۳۴	۱	۵

* استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست (برای کشاورزی)، ** بر اساس پסקات (۱۹۹۲).

جدول ۳. تجزیه واریانس ضریب انتقال عناصر سنگین از خاک به اندام‌های هوایی سیب‌زمینی

میانگین مربعات				درجه آزادی	منابع تغییرات
مس	سرب	روی	کادمیوم		
۰/۰۲*	۰/۰۰۱**	۰/۰۱۱*	۰/۰۰۸۱ ^{ns}	۴	تیمار
۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۳۲	۱۰	خطا
۲۴/۲۹	۲۵/۹۷	۱۹/۱۳	۱۳/۵۱		ضریب تغییرات (درصد)

** معنی‌داری در سطح یک درصد، * معنی‌داری در سطح ۵ درصد، ^{ns} غیر معنی‌دار.

جدول ۴. مقایسه میانگین ضریب انتقال عناصر سنگین از خاک به اندام‌های هوایی سیب‌زمینی

تیمار آبیاری					ضریب انتقال
T ₅	T ₄	T ₃	T ₂	T ₁	
۰/۳۳۱ ^b	۰/۴۲۷ ^{ab}	۰/۴۲۲ ^{ab}	۰/۴۵۴ ^a	۰/۴۶۳ ^{a*}	کادمیوم
۰/۲۳۰ ^b	۰/۲۶۱ ^b	۰/۳۲۷ ^{ab}	۰/۲۷۲ ^b	۰/۳۸۳ ^a	روی
۰/۰۰۳ ^c	۰/۰۲۳ ^b	۰/۰۳۷ ^b	۰/۰۳۳ ^b	۰/۰۵۷ ^a	سرب
۰/۱۷۳ ^b	۰/۲۷۰ ^{ab}	۰/۳۴۴ ^a	۰/۲۸۸ ^{ab}	۰/۳۸۶ ^a	مس

میانگین‌هایی که در هر سطر دارای حروف مشترک می‌باشند در سطح ۵٪ آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.

جدول ۵. تجزیه واریانس ضریب انتقال عناصر سنگین از خاک به غده سیب‌زمینی

میانگین مربعات				درجه آزادی	منابع تغییرات
مس	سرب	روی	کادمیوم		
۰/۰۰۱۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۱**	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۷۷**	۴	تیمار
۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۲	۱۰	خطا
۲۲/۲۰	۱۸/۳۷	۱۸/۹۳	۶/۹۲		ضریب تغییرات (درصد)

** معنی‌داری در سطح یک درصد، ^{ns} غیر معنی‌دار

جدول ۶. مقایسه میانگین ضریب انتقال عناصر سنگین از خاک به غده سیب‌زمینی

تیمار آبیاری					ضریب انتقال
T ₅	T ₄	T ₃	T ₂	T ₁	
^b _o /۴۳۹	^b _o /۴۶۵	^b _o /۵۰	^b _o /۴۸۴	^{a*} _o /۵۷۲	کادمیوم
^a _o /۱۷۰	^a _o /۲۰۶	^a _o /۲۱۷	^a _o /۲۰۳	^a _o /۲۱۷	روی
^c _o	^b _o /۰۰۷	^{ab} _o /۰۱۲	^{ab} _o /۰۱۰	^a _o /۰۱۷	سرب
^b _o /۰۸۱	^{ab} _o /۰۱۰۴	^{ab} _o /۰۱۲۹	^{ab} _o /۰۱۱۸	^a _o /۰۱۳۸	مس

* میانگین‌هایی که در هر سطر دارای حروف مشترک می‌باشند در سطح ۵٪ آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.

خاک به غده‌های سیب‌زمینی در تیمارهای آبیاری به صورت $T_5 > T_4 > T_2 > T_3 > T_1$ بوده و اختلاف معنی‌داری (در سطح پنج درصد) بین تیمار T_5 و T_1 در مورد ضریب انتقال مس از خاک به غده‌ها وجود داشت. هم‌چنین نتایج بدست آمده نشان دادند که ضریب انتقال فلز مس از خاک به اندام‌های هوایی بیشتر از غده‌ها بوده است (جدول ۶).

بهمینار (۱) نشان داد که ضریب انتقال عناصر سنگینی نظیر کادمیوم و سرب در اراضی آبیاری شده با فاضلاب، بیشتر از اراضی آبیاری شده با آب معمولی می‌باشد. کبیری‌نژاد و همکاران (۱۲) بر اساس نتایج تجزیه گیاه نشان دادند که لجن فاضلاب شهری (به‌صورت کود مصرفی، به میزان ۵۰ تن در هکتار) اثر معنی‌داری (در سطح یک درصد) بر غلظت سرب و نیکل در اندام‌های هوایی و هم‌چنین شاخص جذب سرب و نیکل در خاک رسی داشت. هم‌چنین کاربرد کود، ضریب انتقال سرب و نیکل را به طور معنی‌داری در خاک رسی افزایش داد.

یارقلی و همکاران (۱۴) نشان دادند که میزان تجمع کادمیوم در اندام‌های هوایی (برگ) بیشتر از اندام‌های زمینی (ریشه و غده) بوده ولی تمرکز آن در پوست گیاه از بقیه قسمت‌های گیاه بیشتر می‌باشد. این نتیجه همسو با نتایج اغلب تحقیقاتی است که کادمیوم را فلزی با تحرک بالا و قابلیت جذب سریع در گیاه معرفی کرده‌اند. بر اساس این پژوهش‌ها، کادمیوم به راحتی از طریق پوست ریشه، جذب شده و سپس وارد بافت‌های چوبی می‌گردد و به اندام‌های فوقانی گیاهان منتقل

(در سطح یک درصد) بوده و بیشترین میزان ضریب انتقال سرب از خاک به غده‌ها در تیمار T_1 و کمترین میزان آن در تیمار T_5 مشاهده گردید (جدول ۵). هم‌چنین در این تحقیق اختلاف معنی‌داری (در سطح پنج درصد) بین تیمارهای فاضلاب خام و شاهد از نظر ضریب انتقال سرب از خاک به غده سیب‌زمینی مشاهده گردید. نتایج نشان داد که ضریب انتقال سرب در اندام‌های هوایی بیشتر از غده‌ها می‌باشد (جدول ۶).

ج) روی

اثر تیمارهای آبیاری بر ضریب انتقال فلز روی در غده‌ها غیر معنی‌دار بوده و بیشترین میزان ضریب انتقال روی از خاک به غده‌ها در تیمار T_1 و کمترین مقدار آن در تیمار T_5 مشاهده گردید (جدول ۵). هم‌چنین در این تحقیق اختلاف معنی‌داری (در سطح پنج درصد) بین تیمارهای فاضلاب خام و شاهد از نظر ضریب انتقال این فلز از خاک به غده سیب‌زمینی دیده شد. نتایج نشان داد که ضریب انتقال روی از خاک به اندام‌های هوایی بیشتر از غده‌ها می‌باشد (جدول ۶).

د) مس

اثر تیمارهای آبیاری بر ضریب انتقال مس از خاک به غده سیب‌زمینی غیر معنی‌دار مشاهده گردید (جدول ۵). بیشترین میزان ضریب انتقال از خاک به غده‌ها در تیمار T_1 و کمترین مقدار آن در تیمار T_5 مشاهده شد. ترتیب ضریب انتقال مس از

نشان داد که ضریب انتقال سرب، کادمیوم، نیکل و کروم به دانه برنج به ترتیب افزایش داشته، اما در اندام‌های هوایی اسفناج، میزان انتقال به ترتیب در کروم، نیکل، سرب و کادمیوم افزایش نشان داده است.

استفاده از فاضلاب جهت آبیاری به دلیل وجود کادمیوم در آن سبب تجمع این عنصر در خاک می‌شود و هر چه میزان این عنصر در خاک بیشتر شود، جذب آن توسط گیاه نیز افزایش می‌یابد که در تحقیق حاضر، به ترتیب کادمیوم و سرب دارای بیشترین و کمترین مقادیر ضریب انتقال بودند. ترابیان و مهجوری (۴) اظهار داشتند که گیاه تربچه کادمیوم را به خوبی جذب می‌کند ولی در جذب سرب و نیکل، ضعیف عمل می‌نماید. کادمیوم یکی از متحرک‌ترین عناصر سنگین می‌باشد که اگر این عنصر در خاک وجود داشته باشد، جذب آن توسط گیاه وجود خواهد داشت. غلظت بیش از حد این عنصر در گیاه موجب ایجاد مسمومیت در انسان می‌گردد و مقدار کم آن نیز ممکن است باعث ایجاد مشکلاتی در استفاده از مواد آلوده به آن گردد (۱ و ۴). بر اساس مطالعه این ضرایب انتقال، می‌توان به رفتار یک گیاه در جذب فلزات سنگین پی برد. که در پژوهش حاضر تمایل سیب‌زمینی در اندام‌های هوایی و غده‌ها به جذب کادمیوم خیلی بیشتر از سایر عناصر بوده است. کمترین تمایل در خصوص جذب سرب مشاهده گردید، به طوری که در تیمار شاهد، میزان آن (از خاک به غده) برابر صفر بود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر تیمارهای آبیاری با فاضلاب شهری بر میزان ضریب انتقال عناصر کادمیوم، روی، سرب و مس از خاک به اندام‌های هوایی و غده سیب‌زمینی مورد بررسی قرار گرفت. بیشترین و کمترین مقادیر ضریب انتقال عناصر سنگین به ترتیب در تیمارهای فاضلاب خام و آب معمولی دیده شد. هم‌چنین نتایج این تحقیق نشان داد که ترکیب فاضلاب با آب معمولی می‌تواند از میزان اثرات زیان‌آور (از قبیل جذب عناصر سنگین در خاک و انتقال این عناصر به گیاه) کاربرد آنها به

می‌شود. علت متفاوت بودن نتایج پژوهش حاضر (در مورد کادمیوم) با نتایج دیگر مطالعات را می‌توان اینگونه توجیه نمود که در این تحقیق، پوست غده‌های سیب‌زمینی به همراه خود غده‌ها، هضم شده و به طور توأم مورد آزمایش قرار گرفتند. همانطور که بیان شد قدرت جذب عنصر کادمیوم توسط پوست محصولات غده‌ای بیشتر از سایر اندام‌ها گزارش شده است. عناصری که برای رشد گیاه ضروری هستند معمولاً در گیاه متحرک بوده، اما عناصر سمی و سنگین جابجائی کمی داشته و در ریشه‌ها تجمع می‌یابند. بنابراین میزان این عناصر در ریشه حداکثر می‌باشد (۲۴). تجمع نسبتاً زیاد عنصر کادمیوم در پوست غده‌های سیب‌زمینی، به دلیل جداسازی پوست از غده (قبل از مصرف)، از اهمیت کمتری می‌تواند برخوردار باشد.

بر اساس نتایج این پژوهش، ضریب انتقال روی، مس و سرب از خاک به اندام‌های هوایی، بیشتر از غده‌ها بوده است. این موضوع با توجه به این‌که فقط غده سیب‌زمینی در وعده‌های غذایی و صنایع مرتبط با فرآورده‌های سیب‌زمینی به مصرف می‌رسد، حائز اهمیت می‌باشد، و لازم است که در مصرف احتمالی اندام‌های هوایی به عنوان علوفه دام مورد توجه قرار گیرد. پارسادوست و همکاران (۳) نیز بیان کردند که مقدار عنصر سرب در اندام‌های هوایی بیشتر از اندام‌های زیرزمینی گیاهان مرتعی و بومی (در خاک‌های آلوده) می‌باشد. هم‌چنین شنبه‌دستجودی و همکاران (۷)، بیشترین مقدار عنصر روی را در اندام هوایی، و کمترین مقدار آن را در اندام‌های زیرزمینی گونه‌های مرتعی در خاک‌های منطقه ایرانکوه را گزارش نمودند.

مقایسه مقدار ضریب انتقال از خاک به اندام‌های هوایی نشان داد که بیشترین میزان آن به ترتیب مربوط به کادمیوم، روی، مس و سرب می‌باشد. در غده‌های سیب‌زمینی، بیشترین میزان ضریب انتقال در تمامی تیمارها (به استثناء تیمار T₅) به ترتیب مربوط به کادمیوم، مس، روی و سرب بوده است. این نتایج مشابه نتایج کار ترابیان و مهجوری (۴) در بررسی جذب عناصر سنگین به وسیله سبزی‌های برگی می‌باشد. بهمنیار (۱)

منظور آبیاری گیاهان خواهد کاست و در درازمدت می‌توان از فاضلاب‌ها بدین صورت به عنوان منابع جدید آب استفاده نمود. زیرا بر اساس نتایج به‌دست آمده، استفاده از فاضلاب خام می‌تواند امکان آلودگی منابع خاک را افزایش دهد. هم‌چنین بر اساس این پژوهش، کادمیوم و سرب به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقادیر ضریب انتقال بودند. مقایسه ضرایب انتقال عناصر بین غده و اندام هوایی سیب‌زمینی نشان داد که مقدار انتقال به اندام‌های هوایی بیشتر می‌باشد (به جزء کادمیوم). به‌طورکلی استفاده از فاضلاب سبب تجمع این عناصر در خاک می‌شود و هر چه میزان این عناصر در خاک بیشتر باشد، جذب آن توسط گیاه نیز افزایش می‌یابد. شایان ذکر هست که گیاهان مختلف رفتارهای متفاوتی در جذب این عناصر از خود نشان می‌دهند و تحقیق حاضر در خصوص سیب‌زمینی که گیاهی غده‌ای می‌باشد صورت گرفته است.

منابع مورد استفاده

۱. بهمنیار، م. ع. ۱۳۸۶. تأثیر مصرف فاضلاب در آبیاری گیاهان زراعی بر میزان برخی از عناصر سنگین خاک و گیاهان. مجله محیط شناسی ۳۳ (۴۴): ۱۹-۲۶
۲. بی‌نام، ۱۳۸۸. آمارنامه کشاورزی. جلد اول، محصولات زارعی سال زارعی. ۸۸-۱۳۸۷
۳. پارسادوست، ف.، ب. بحرینی‌نژاد، ع. ا. صفری سنجانی و م. م. کابلی. ۱۳۸۶. گیاه پالایی عنصر سرب توسط گیاهان مرتعی و بومی در خاک‌های آلوده منطقه ایران کوه (اصفهان). پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی ۷۷: ۵۴-۶۳.
۴. ترابیان، ع. و م. مهجوری. ۱۳۷۶. بررسی اثر آبیاری با فاضلاب روی جذب فلزات سنگین به‌وسیله سبزی‌های برگی جنوب تهران. مجله علوم آب و خاک (۲): ۱۸۸-۱۹۶
۵. حسین پور، ا.، غ. ح. حق‌نیا، ا. علیزاده و ا. فتوت. ۱۳۸۶. تأثیر آبیاری با فاضلاب خاک و پساب شهری بر برخی خصوصیات شیمیایی خاک در اعماق مختلف در دو شرایط غرقاب پیوسته و متناوب. مجله آبیاری و زه‌کشی ایران (۲): ۷۳-۸۵
۶. رضایی، ع. م. و ا. سلطانی. ۱۳۷۵. زراعت سیب زمینی (ترجمه). انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. ۱۷۹ صفحه.
۷. شنبه‌دستجردی، ف.، م. تدین‌نژاد و ک. شیرانی. ۱۳۸۶. گیاه پالایی خاک‌های آلوده به عنصر روی در منطقه ایرانکوه توسط گونه‌های مرتعی. مجله علوم آب و خاک (۲): ۲۲۹-۲۳۹.
۸. عابدی، م. ج. و پ. نجفی. ۱۳۸۰. استفاده از فاضلاب تصفیه شده در کشاورزی. کمیته ملی آبیاری و زه‌کشی ایران، ۲۴۸ صفحه.
۹. عرفانی آگاه، ع. ۱۳۷۸. بررسی کارایی فاضلاب تصفیه شده خانگی در آبیاری زراعت کاهو و گوجه‌فرنگی، همایش جنبه‌های زیست محیطی استفاده از پساب در آبیاری، وزارت نیرو، کمیته ملی آبیاری و زه‌کشی ایران. صفحات ۶۱-۷۹.
۱۰. علیزاده، م.، ف. فتوحی و ع. ترابیان. ۱۳۸۷. بررسی مقدار تجمع فلزات سنگین در گیاهان علوفه‌ای تحت آبیاری با فاضلاب در جنوب تهران مطالعه موردی: ذرت و یونجه. مجله محیط شناسی ۳۴ (۴۸): ۱۳۷-۱۴۸
۱۱. فتوحی، ق. ۱۳۷۸. رشد و تغذیه گیاهان زراعی (ترجمه). انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. ۳۷۲ صفحه
۱۲. کبیری‌نژاد، ش.، م. هودجی و م. افیونی. ۱۳۸۷. بررسی توانایی زیست پالایی گیاه ذرت در کاهش غلظت سرب و نیکل از خاک تیمار شده با لجن فاضلاب شهری استان اصفهان. یازدهمین همایش ملی بهداشت محیط، ۷-۹ آبان ماه، زاهدان.
۱۳. مرادمند، م. و ح. بیگی هرچگانی. ۱۳۸۷. اثر آبیاری با پساب تصفیه شده شهری بر توزیع سرب در اندام لفل سبز و خاک، دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۱۴. یارقلی، ب.، ع. ا. عظیمی، ا. باغوند، ف. عباسی، ع. لیاقت و غ. ر. اسداله فردی. ۱۳۸۸. بررسی جذب و تجمع کادمیم در اندام‌های

مختلف محصولات غده‌ای در خاک‌های آلوده. فصلنامه آب و فاضلاب اصفهان ۲(۷۲): ۶۰-۷۰.

15. Al-Lahham, O., NM. El Assi and M. Fayyad. 2007. Translocation of heavy metals to tomato (*Solanum lycopersicom* L.) fruit irrigated with treated wastewater. *Scientia Horticulturae* 113: 250-254.
16. Cllap, CE., AJ. Pallazo, WE. Learn, GC. Marten and DR. linden. 1987. Uptake of nutrient by plants irrigated with municipal wastewater of fluent. Army Corps of Engineers, CRREL, Hanover, N.H. 1: 395-404.
17. Faruqui, N., S. Niang and M. Redwood. 2002. Untreated Wastewater Reuse in Market Gardens : A Case-Study of Dakar, Senegal. Paper presented at the International Water Management Institute Workshop on Wastewater reuse in Irrigated Agriculture: Confronting the Livelihood and Environmental Realities, International Water Management Institute, Hyderabad, India.
18. Fitzpatrick, G.E., H. Donselman and N.S. Carter. 1986. Interactive effects of sewage effluent irrigation and supplemental fertilization on container-grown trees. *Hort. Sci.* 21(1): 92-93.
19. Kalavrouziotis, I.K. P. Robolas, P. Koukoulakis and E. Kostakioti. 2012. Effects of municipal reclaimed wastewater on the macro- and micro- elements status of soil and of *Brassica oleracea* var. *Italica*, and *B. oleracea* var. *Gemmifera*. *Agric. Water Manage.* 95: 419 – 426.
20. Kalavrouziotis, I.K., P. Koukoulakis and A.H. Papadopoulos. 2008. Assessment of metal transfer factor under irrigation with treated municipal. Wastewater. *Agric. Water Manage.* 103: 114 - 119.
21. Kiziloglu, FM., M. Turan, U. Sahin, Y. Kuslu and A. Dursun. 2008. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*) and red cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *rubra*) grown on calcareous soil in Turkey. *Agric. Water Manage.* 95: 716 -724.
22. Klay, S., A. Charef, A. Ayed, B. Houman and F. Rezgu. 2010. Effect of irrigation with treated wastewater on geochemical properties (saltiness, C, N and heavy metals) of isohumic soils (Zaouit Sousse perimeter, Oriental Tunisia). *Desalination* 253: 180-187.
23. Martinez, J. 1999. Irrigation with saline water. *Agric. Water Manage.* 40: 213-225.
24. Mireles, A., C. Solís, E. Andrade, M. Lagunas-Solar, C. Piña and R.G. Flocchini. 2004. Heavy metal accumulation in plants and soil irrigated with wastewater from Mexico City. *Nuclear Instit. and Methods in Physics Res. B.* 219-220: 187-190.
25. Pescod, MB. 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. FAO Irrigation and Drainage. Paper no. 47.113p.
26. Ross, S.M. 1994. Toxic Metals in Soil-Plant System. John Wiley and Sons Inc., England.
27. Sajwan, K.S., W.H. Ornes, TV. Youngblood and AK. Alva. 1996. Uptake of soil applied cadmium, nichel and selenium by bush beans. *J. Water, Air and Soil Pollut.* 91:209-217.
28. Smit, J. and J. Nasr. 1992. Urban agriculture for sustainable cities: using wastes and idle land and water bodies as resources. *Environ. Urban* 4(2): 141-152.

Investigation of Transfer Coefficients of Cd, Zn, Cu and Pb from Soil to Potato Under Wastewater Reuse

N. Parsafar and S. Marofi^{1*}

(Received : Feb. 17-2012 ; Accepted : Apr. 28-2013)

Abstract

In this study, a completely randomized experiment was designed with five irrigation treatments and three replicates. The irrigation programs were raw wastewater (T₁), treated wastewater (T₂), a combination of 50% raw wastewater and 50% fresh water (T₃), a combination of 50% treated wastewater and 50% fresh water (T₄), and fresh water (T₅). The experiments were run within a greenhouse. The lysimeters were built up in September 2009 and they were filled with a two layer soil. The upper (30 cm) and lower (40 cm) layers were sandy loam and sandy clay loam, respectively. The results showed that the effects of watering treatments on transfer coefficients of heavy metals from soil to shoots (except Cd) and tubers of potato (except Zn and Cu) were significant ($p < 0.01$). Maximum and minimum transfer coefficients of heavy metals were observed in the (T₁) and (T₅) treatments, respectively. Also, the transfer coefficients of Cd from soil to shoots were lower than tubers. In the case of Zn, Cu and Pb, transfer coefficients from soil to tubers were lower than shoots. In this study, the maximum transfer coefficients to shoots were Cd (0.331-0.463), Zn (0.383-0.230), Cu (0.173-0.386) and Pb (0.003-0.057), respectively. Maximum transfer coefficients toward tubers (except T₅) were Cd (0.439-0.572), Cu (0.081-0.138), Zn (0.170-0.217) and Pb (0-0.017), respectively. The combination of wastewater and fresh water use in short-term irrigation might be feasible, but a heavy metal monitoring program is necessary.

Keywords: Heavy metal, Lysimeter, Potato, Soil, Transfer coefficients, Wastewater.

1. Dept. of Water Resour. Eng., College of Agric., Bu-Ali Sina Univ., Hamedan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: marofi@basu.ac.ir