مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۵

صفحه‌های ۳۶۵-۳۴۷

مطالعهٔ تجمع فلزات سنگین در محصولات مختلف تحت تأثیر آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شدهٔ شهری کرمانشاه

میلاد فرمانی‌فرد[۱]، هوشنگ قمرنیا[۲]*، مقداد پیرصاحب[۳] و نظیر فتاحی[۴]

۱. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۲. استاد، گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۳. استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکدهٔ بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران
۴. استادیار، گروه شیمی، دانشکدهٔ علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۲

چکیده

در این تحقیق به بررسی تجمع فلزات سنگین شامل مس، آهن، روی، کادمیم و منگنز در اندام‌های مختلف (ریشه، اندام هوایی، میوه یا دانه) ذرت، جو، بامیه و جعفری در شرایط واقعی تحت آبیاری با دو تیمار فاضلاب تصفیه‌شدهٔ شهری خروجی تصفیه‌خانهٔ کرمانشاه (TWW) و آب چاه موجود در اراضی همان منطقه (WEW) در سه تکرار و قالب طرح کاملاً تصادفی کرت‌های خردشده برای هر محصول (در سال زراعی ۱۳۹۳) پرداخته شده است. نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد که اثر آبیاری با پساب بر تجمع فلزات سنگین در تمامی محصولات در سطح ۵ درصد معنادار بود. همچنین، تجمع آهن، روی و کادمیم در اندام‌های محصولات مورد بررسی تحت تیمار پساب بیش از تیمارهای آب چاه و از نظر آماری نیز معنادار بود و در بیشتر موارد بالاتر از حدود استانداردها نیز قرارداشت، ولی از نظر تجمع مس و منگنز، علی‌رغم مشاهدهٔ اختلاف معنادار آماری و مقداری بین تیمارهای مختلف، میزان تجمع این دو فلز در اندام‌های مختلف محصولات در اکثر موارد پایین‌تر از حدود مجاز قرارداشت. دامنهٔ تغییرات فلزات سنگین در محصولات مختلف تحت تیمارهای آبیاری با پساب، ۳۷/۷-۱۴/۱، ۱۱۶۵-۷۱/۱، ۹۸/۶-۲۴/۳، ۲/۳۰-۰/۱۰ و ۲۶۹-۱۵/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌ترتیب برای مس، آهن، روی، کادمیم و منگنز اندازه‌گیری شد. علاوه‌بر این، تجمع فلزات مختلف در ریشه بیش از اندام‌های دیگر به‌دست آمد.

کلیدواژه‌ها: بامیه، پساب شهری تصفیه‌شده، جعفری، جو، ذرت، فلزات سنگین.

* نویسنده مسئول Email: hghamarnia@razi.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر، با توجه به خشکسالی‌ها، کمبود بارش و کاهش منابع آب شیرین، آبیاری با فاضلاب و پساب تصفیه‌شده به عملی رایج تبدیل شده است (۴۶) تا جایی که قریب به ۲۰ میلیون هکتار از اراضی در سطح جهان با فاضلاب و پساب آبیاری می‌شود که تحت کشت سبزیجات و محصولات مختلف قراردارد. از این‌رو، با توجه به تشدید تنش و بحران منابع آب در آینده این احتمال وجود دارد تا گرایش به استفاده از آن افزایش یابد (۱۱). آبیاری با فاضلاب، از یک‌سو جایگزینی برای منابع آب شیرین به‌شمار می‌رود و از سویی دیگر، حاوی مواد مغذی متعددی است که برای رشد گیاه ضروری است (۳۵). علی‌رغم اینکه استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده برای آبیاری راهکاری ارزش‌مند برای بالابردن منابع آب در دسترس محسوب می‌شود، کیفیت و شرایط این آب چالش‌هایی را در کشاورزی ایجاد می‌کند (۲۷).

فاضلاب آلوده به عناصر کمیابی مانند سرب، مس، روی، بر، کبالت، کروم، کادمیم، آرسنیک و منگنز است که بسیاری از این عناصر غیرضروری است (۴۰). استفادهٔ بلندمدت از فاضلاب و پساب تصفیه‌شده منجر به تجمع مقدار قابل‌توجهی از فلزات سنگین در خاک (۲۴)، سبزیجات و غلات می‌شود و انتقال این عناصر سمی به زنجیرهٔ غذایی خطرات زیادی برای سلامت مصرف‌کنندگان ایجاد می‌کند (۱۶، ۲۶)، چرا که یکی از مهم‌ترین مسائل در ارتباط با فلزات سنگین، عدم متابولیزه‌شدن آن در بدن است. به‌عبارتی دیگر، چنین آلاینده‌هایی غیرقابل‌تجزیه است و تمایل به تجمع دارد (۱۴) که موجب بروز بیماری می‌شود.

فلزات سنگین عمدتاً از طریق ریشه وارد بافت گیاهی می‌شود و ممکن است به اندام‌های هوایی و بخش‌های خوراکی سبزیجات منتقل شود (۵۶). افزایش غلظت فلزات سنگین باعث کاهش جذب مواد مغذی ضروری گیاه و در نتیجه کاهش کیفیت سبزیجات می‌شود(۳۱). با این حال، جذب این فلزات و آثار آن بر سبزیجات، به‌طور قابل‌توجهی در گونه‌های گیاهی مختلف متنوع است (۵۱). گزارش‌های متعددی مبنی بر غلظت‌های بالای فلزات سنگین در سبزیجات برگی آبیاری‌شده با آب آلوده به فلزات یا رشدکرده در خاک آلوده در مقایسه با دیگر سبزیجات ارائه شده است (۳۱، ۳۴). این فرضیه وجود دارد که ممکن است سبزیجات برگی فلزات سنگین سمی دریافت شده از آب آبیاری را در بخش‌های خوراکی انباشت کند و از طریق زنجیرهٔ غذایی به انسان انتقال دهد. همچنین، نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که غلظت فلزات سنگین در گیاهان آبیاری‌شده با فاضلاب، به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از گیاهان آبیاری‌شده با آب شیرین بوده است (۲۶). با این حال، نرخ انباشت فلزات سمی در گیاهان بستگی به غلظت این فلزات در خاک و آب آبیاری دارد. مطالعهٔ تجمع مس، نیکل، روی، کروم، آهن، منگنز، کبالت و سرب در سبزی‌های خوراکی شامل پیاز، سیر، گوجه‌فرنگی و بادمجان نشان داد، تجمع فلزات در سبزیجات آبیاری‌شده با فاضلاب به‌طور معناداری بیش از آب چاه است که فراتر از مقادیر سازمان بهداشت جهانی و فائو بود (۴۲).

بررسی مقدار تجمع فلزات سنگین در گیاهان علوفه‌ای تحت آبیاری با فاضلاب در جنوب تهران نشان داد که مقدار تجمع در بوتهٔ ذرت آبیاری‌شده با فاضلاب ۱/۵ برابر بوتهٔ ذرت آبیاری شده با آب چاه است. به‌غیر از منگنز و روی تجمع سایر عناصر در بوتهٔ ذرت بیش از حد مجاز و در بلال و دانهٔ ذرت مقادیر نیکل، کروم، سرب و روی کمتر از حد مجاز و منگنز و کادمیم بیشتر از حد مجاز درون گیاه مشاهده شد (۵). همچنین، با مطالعه و مقایسهٔ پساب تصفیه‌خانهٔ فاضلاب اولنگ مشهد و آب چاه‌های منطقه برای آبیاری و تأثیر آبیاری با آن در عملکرد محصول گندم،

گزارش شده است که کیفیت پساب از نظر تمامی پارامترهای مورد سنجش، با استانداردهای آبیاری کشاورزی مطابقت دارد و آبیاری با آن در مقایسه با آب چاه بر عملکرد محصول گندم تأثیر بهتری دارد. لذا، پساب تصفیه‌شده با پایش مستمر جایگزین مناسبی برای آب چاه به‌منظور آبیاری است (۱).

ارزیابی تأثیر جذب تعدادی از عناصر سنگین در سبزیجات (شامل اسفناج، گشنیز، گل‌کلم، سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی، بادمجان، تربچه و کدو) آبیاری‌شده با پساب تصفیه‌شده در شهر بیکانر نشان داد که ترتیب وجود و جذب این عناصر به صورت Fe > Mn >Zn > Cu و درصد برخی از این عناصر از حدود مجاز سازمان بهداشت جهانی بیشتر بود (۱۲).

نتایج پایش نمونه‌های سبزیجات (اسفناج و بامیه)، خاک و آب آبیاری جمع‌آوری شده از سایت‌های حواشی دهلی‌نو نشان داد که علی‌رغم اینکه مقدار فلزات سنگین موجود در آب آبیاری بالاتر از حد مجاز بود، تجمع فلزات در خاک پایین‌تر از مقدار مجاز و در نمونه‌های گیاهی بالاتر به‌دست آمد و مقدار تجمع فلزات مس، روی، سرب و کادمیم در نمونه‌های گیاهی اسفناج و بامیه، بیش از حد مجاز پیشنهادی WHO[1] بود (۴۸). همچنین، گزارش شده است که با وجود غلظت پایین فلزات سنگین در فاضلاب، نمونه‌های گیاهی به‌دلیل سازوکار تجمع در بافت‌ها، حاوی مقدار بالای فلزات سنگین است (۲۶).

با درنظرگرفتن افزایش آسیب‌پذیری مصرف سبزیجات به‌دلیل آلودگی به فلزات سنگین، ارزیابی میزان تجمع این فلزات در اندام‌های مختلف گیاه که در نتیجهٔ آبیاری خاک با پساب روی می‌دهد، اهمیت کاربردی دارد. در حال حاضر، در بسیاری از شهرهای ایران، فاضلاب‌های شهری و رواناب‌های سطحی که از شهرها خارج می‌شود، در زمین‌های کشاورزی پایین‌دست استفاده می‌شود که تا کنون هیچ بررسی و تحقیق جامع و قابل‌استنادی مبنی بر مطالعهٔ تأثیر فاضلاب تصفیه‌شدهٔ شهری کرمانشاه بر تجمع فلزات سنگین در گیاهان و محصولات آبیاری‌شده انجام نشده است.

در این ارتباط و در پژوهش حاضر، به بررسی جامع آثار آبیاری با پساب فاضلاب تصفیه‌شده بر تجمع مس، آهن، روی، کادمیم و منگنز در ریشه، اندام هوایی و دانهٔ (میوه) محصول ذرت، جو، (به‌عنوان نمایندهٔ غلات) بامیه و جعفری (به‌عنوان نمایندهٔ سبزیجات) در قیاس با شرایط آبیاری با آب با کیفیت مناسب (آب چاه) پرداخته‌ایم. نتایج حاصل از آزمایش‌ها با استانداردهای موجود و تحقیقات پیشین مقایسه شده است.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مورد مطالعه

تصفیه‌خانهٔ فاضلاب شهر کرمانشاه با مساحتی در حدود ۷۸ هکتار، در جنوب‌غربی شهر واقع شده است. این تصفیه‌خانه برای جمعیتی برابر ۴۰۰ هزار نفر طراحی و از اواسط پاییز ۱۳۸۴ بهره‌برداری شده است. فرایند تصفیه در تصفیه‌خانهٔ فاضلاب کرمانشاه به روش لجن فعال از نوع متعارف و شامل مراحل تصفیه‌های مقدماتی، اولیه و ثانویه ودر نهایت گندزدایی پساب است. مقدار فاضلاب تصفیه‌شده معادل ۷۰۰ لیتر در ثانیه و معادل ۶۰۰۰۰ مترمکعب در روز است. اراضی منتخب در پایین‌دست تصفیه‌خانه واقع شده است که به روش سطحی و سنتی به‌مدت قریب به ده سال با پساب خروجی تصفیه‌خانه آبیاری شده بود. همچنین، نمونه‌های شاهد (که از سال‌های دور با آب چاه آبیاری می‌شود) نیز دقیقاً از اراضی روبه‌روی این اراضی، در طرف دیگر رودخانهٔ قره‌سو قراردارد که هر یک مساحتی قریب به ۵ هکتار را شامل می‌شود (شکل ۱).

1. Word Health Organization

شکل ۱. تصویری هوایی از موقعیت تصفیه‌خانه و اراضی مورد مطالعه

مشخصات و آنالیز نمونه‌های خاک

در پایان فصل زراعی، نمونه‌های خاک تحت تیمار پساب و آب چاه از لایه‌های مختلف در سه تکرار برداشت شد. پس از خشک‌شدن نمونه‌ها خرد و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. بافت خاک با استفاده از هیدرومتر تعیین شد که بر اساس طبقه‌بندی USDA در هر سه لایه لوم ماسه‌ای به‌دست آمد. نتایج خصوصیات فیزیکی اندازه‌گیری‌شدهٔ خاک در لایه‌های مختلف در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و بافت خاک در لایه‌های عمقی مختلف

تیمار آبیاری	لایهٔ خاک (سانتی‌متر)	هدایت هیدرولیکی اشباع (میلی‌متر بر ساعت)	وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	تخلخل (درصد)	درصد ماسه	درصد سیلت	درصد رس	کلاس بافت خاک
پساب تصفیه‌شده	۰ – ۳۰	۳۸/۰۲	۱/۶۴	۳۵/۸۳	۶۱/۶	۲۲/۰	۱۶/۴	Sandy Loam
	۳۰ – ۶۰	۳۴/۱۸	۱/۵۸	۲۷/۱۱	۵۹/۶	۲۲/۳	۱۸/۱	Sandy Clay Loam
	۶۰ – ۹۰	۳۶/۰۶	۱/۷۲	۳۳/۱۹	۶۳/۶	۱۴/۰	۲۲/۴	Sandy Loam
آب چاه	۰ – ۳۰	۱۸/۱۹	۱/۷۰	۳۷/۰۰	۷۲/۱	۱۵/۴	۱۲/۴	Sandy Loam
	۳۰ – ۶۰	۲۷/۱۶	۱/۸۰	۲۹/۹۰	۷۵/۲	۱۳/۴	۱۱/۴	Sandy Loam
	۶۰ – ۹۰	۲۰/۶۰	۱/۶۹	۲۵/۷۳	۶۸/۲	۱۵/۴	۱۶/۴	Sandy Loam

هدایت هیدرولیکی به‌روش بار افتان و جرم مخصوص ظاهری به روش نمونه‌برداری دست‌نخورده اندازه‌گیری شد. همچنین، تخلخل در هر لایه نیز بر اساس مقدار وزن مخصوص ظاهری و واقعی و با استفاده از فرمول محاسبه شد. برای آنالیز شیمیایی، نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه به‌مدت ۲۴ ساعت در داخل آون در دمای ۱۰۵ درجهٔ سانتی‌گراد قرارگرفت تا کاملاً خشک شود (۳۴). در مرحلهٔ بعد، الک و آسیاب شد تا پودر کاملاً یکنواختی به‌دست آید. سپس، ۰/۵ گرم از نمونهٔ فوق با روش هضم کامل برای تزریق به دستگاه آماده شد (۱۰). برای اندازه‌گیری تمامی عناصر موجود در این تحقیق، از روش جذب اتمی با کورهٔ گرافیکی استفاده شد. خلاصهٔ نتایج آنالیز شیمیایی خاک در جدول ۲ ارائه شده است.

مشخصات و آنالیز نمونه‌های گیاهی

در این تحقیق، به‌منظور بررسی میزان فلزات سنگین مس، آهن، روی، کادمیم و منگنز، محصول چهار گیاه مختلف ذرت (*Zea mays*)، جو (*Hordeum vulgare*)، بامیه (*Abelmoschus esculentus*) و جعفری (*Petroselinum crispum*) کشت‌شده در سه تکرار از قسمت‌های مختلف مزرعه به‌طور تصادفی انتخاب و برداشت شد. شروع کشت ذرت در اواخر اسفند و برداشت آن در شهریور بود. جو در آبان ماه کاشت و در اواسط خرداد برداشت شد. بامیه در اواسط فروردین کاشت و در اواخر تیرماه برداشت شد. جعفری نیز از اواخر فروردین کشت شد و برداشت آن در تیرماه صورت گرفت. نمونه‌های گیاه در کیسه‌های پلی‌اتیلن جمع‌آوری، سپس به آزمایشگاه منتقل و با آب سه بار تقطیر کاملاً شستشو داده شد تا آلاینده‌های احتمالی موجود در آب و خاک که در تماس با گیاه بود از بین برود. برای هضم نمونهٔ گیاهی، ۲ گرم از نمونه‌های خشک و آسیاب‌شده در بالن ته‌گرد قرار داده شد و به‌ترتیب ۴ میلی‌لیتر اسید پرکلریک غلیظ، ۲ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ و ۲۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ به آن اضافه و جوشانده شد تا حجم آن کم شود. در گام بعدی، به آن ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد تا رسوبات حل شود و دوباره حرارت داده شد تا حجم آن کم شود. سپس، محلول صاف شد و حجم آن به ۲۵۰ میلی‌لیتر رسید (۲۰). بعد از آن مقدار فلزات سنگین با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل Spectra AA 220 ساخت کارخانهٔ VARIAN کشور استرالیا اندازه‌گیری شد.

تجزیه‌وتحلیل آماری

این پژوهش در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی (CRD) برای کرت‌های خردشده (Split Plots) و آزمایش فاکتوریل (با دو تیمار پساب تصفیه‌شده و آب چاه) در سه تکرار، برای هر یک از محصولات به‌طور جداگانه انجام شد. پارامترهای اندازه‌گیری‌شده با استفاده از نرم‌افزارهای آماری SAS 9.1 و MSTATC تحلیل و ارزیابی شد. تست نرمال‌بودن داده‌ها نیز انجام شد. آزمون مقایسهٔ میانگین نیز در سطوح احتمالی ۱ و ۵ درصد بر اساس روش دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

مشخصات شیمیایی و فلزات سنگین تیمارهای آب و خاک

در این مطالعه، دو تیمار آب پساب خروجی تصفیه‌خانهٔ فاضلاب (TWW) و آب چاه (WEW) موجود در همان محل (شاهد) استفاده شد. پارامترهای کیفی نمونه‌های برداشت‌شده با استانداردهای معتبر مقایسه شد (۲۲، ۵۵). مطابق نتایج، غلظت برخی پارامترها در نمونه‌های پساب تصفیه‌خانه بیش از حدود مجاز به‌دست آمده است. غلظت منیزیم، آهن، منگنز، کلسیم، نیترات و فسفات و مقدار هدایت الکتریکی اکثر نمونه‌های پساب و حتی در برخی موارد معدود آب چاه، بیش از حدود پیشنهادی و مجاز برای آبیاری است که باید مورد توجه و بررسی بیشتر قرارگیرد. این موار در خاک جذب می‌شود و در طول رشد گیاه از طریق ریشه وارد گیاه می‌شود و در اندام‌های مختلف تجمع می‌یابد (جدول ۲).

بررسی تجمع فلزات در محصولات مختلف

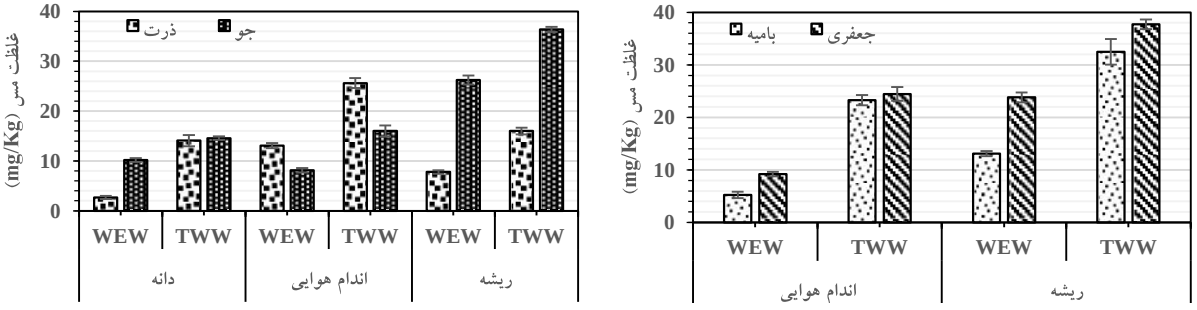
با توجه به تفاوت در ماهیت فلزات مختلف مورد بررسی در این تحقیق، همچنین متفاوت‌بودن سازوکار جذب و تجمع این فلزات در گروه‌های مختلف گیاهی و حتی اندام‌های مختلف هر گیاه و اهداف مورد نظر محقق، در این پژوهش، نتایج به تفکیک هر فلز و با هدف مقایسهٔ هم‌زمان وضعیت تجمع و جذب هر فلز در محصولات مختلف، به‌خصوص در اندام هر محصول ارائه می‌شود.

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های پارامترهای شیمیایی و فلزات سنگین آب و خاک و مقایسه با استانداردهای جهانی

متغیر	واحد	آب				خاک			
		پساب	آب چاه	FAO	WHO	واحد	آبیاری با پساب	آبیاری با آب چاه	EU 2002	WHO 2007
مس (Cu)	mg/l	۰/۱۱	۰/۰	۰/۲	۰/۲	mg/kg	۴۱/۶	۲۶/۱	۱۴۰	۱۰۰
آهن (Fe)	mg/l	۳۶/۲	۱/۰۶	۵	۵	mg/kg	۲۱۲۴	۲۵۴۱	NA	-
روی (Zn)	mg/l	۰/۱۱	۰/۰۷	۱	۲	mg/kg	۲۳۳	۱۷۹	۳۰۰	۳۰۰
منگنز (Mn)	mg/l	۱۱/۱	۰/۰۲	۰/۲	۰/۲	mg/kg	۹۴۲	۷۵۳	NA	NA
کادمیم (Cd)	mg/l	-	-	-	-	mg/kg	۱/۸۵	۱/۶۷	۳	۴
سدیم (Na)	mg/l	۲۶/۲	۳۲/۶	۶۹	۶۹	mg/l	۲۹۰	۲۸۲	-	-
کلسیم (Ca)	mg/l	۳۱۸/۵	۱۰۸/۲	۲۰۰	-	mg/l	۱۷/۲۵	۱۳/۵	-	-
منیزیم (Mg)	mg/l	۱۶۸/۳	۵۴/۱	۶۵	-	mg/l	۶/۸۹	۶/۱۸	-	-
پتاسیم (K)	mg/l	۱۹/۸	۸/۵	-	-	mg/l	۹۳/۵	۹۳/۴	-	-
کلر (Cl)	mg/l	۵۸/۳	۲۱/۵	۱۰۰	۱۰۶	mg/l	۱۵/۳	۱۲/۶	-	-
نسبت جذب سدیم (SAR)	-	۰/۱۶۸	۰/۳۱۶	-	۳	-	۲/۸۶	۲/۴۲	-	-
کل ذرات محلول (TDS)	mg/l	۱۱۸۶	۶۵۸	-	۴۵۰	mg/l	۲۷۱	۷۰/۸	-	-
هدایت الکتریکی (EC)	ds/m	۱/۷۱	۰/۹۶	۰/۷	۰/۷	ds/m	۰/۴۲	۰/۱۱	-	-
اسیدیته (pH)	-	۷/۶۸	۷/۰	۶/۵-۸/۴	۶/۵-۸/۵	-	۷/۳۸	۷/۰۶	-	-

مس (Cu)

تحرک مس در خاک کم و وجود عنصر مس برای انسان و دام ضروری است (۹). بنابراین، چنانچه به هر دلیلی وارد خاک شود، امکان آبشویی و خروج آن تنها از طریق جذب در ریشه گیاهان صورت می‌گیرد. بالابودن نسبی غلظت مس در تیمارهای تحت آبیاری با پساب نسبت به تیمارهای آبیاری‌شده با آب چاه، حاکی از همین واقعیت است (شکل ۱). در دیدی کلی، افزایش تجمع مس در اندام‌های مختلف ذرت، جو، بامیه و جعفری تحت آبیاری با پساب نسبت به تیمارهایی نظیر آب چاه مشاهده می‌شود. از طرف دیگر، به‌طور متوسط تجمع مس در ریشه و دانهٔ جو نسبت به ذرت به‌طور قابل‌توجهی بیشتر بود. این روند و شرایط در هر دو تیمار آبیاری دیده شد. در جعفری و بامیه، با وجود تفاوت زیاد بین تیمارهای آب چاه و پساب، اختلاف قابل‌توجهی در مقدار غلظت مس اندازه‌گیری‌شده در ریشه و اندام هوایی دو محصول تحت تیمار یکسان مشاهده نمی‌شود. همچنین، بیشترین غلظت مس در ریشهٔ جعفری، جو و بامیه به‌ترتیب برابر با ۳۷/۷، ۳۶/۴ و ۳۲/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌دست آمد. اما در ذرت، بیشترین تجمع در اندام هوایی و برابر با ۲۵/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم اندازه‌گیری شده است. این نتایج نشان می‌دهد که علی‌رغم حرکت کند مس در اندام گیاهان و تجمع بیشتر در ریشه، در صورت عدم علاج‌بخشی و ادامهٔ روند آبیاری با پساب، در آینده باعث آلوده‌شدن بخش‌های هوایی و خوراکی محصولات، به‌خصوص سبزیجات، می‌شود، چرا که سبزیجات برگی، نسبت به محصولات میوه‌دار و غلات، توانایی بیشتری در انباشت فلزات سمی در بخش‌های خوراکی خود دارد (۴۵).

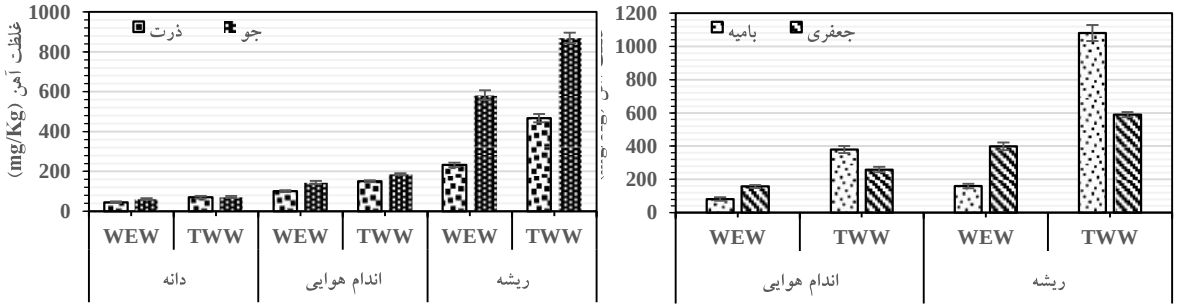


شکل ۱. متوسط غلظت مس در اندام محصولات مختلف تحت تیمارهای مختلف آبیاری

نتایج آبیاری گندم، جو و ذرت با پساب فاضلاب کارخانه‌های صنعتی نشان داد که میزان عناصر سنگین به‌ویژه Cd، Pb، Cu، Ni بیش از اراضی شاهد بود و در صورت استفادهٔ مستمر از پساب، میزان عناصر ذکرشده بالاتر از حد استاندارد جهانی می‌شود، به‌طوری‌که میزان عناصر سنگین در این محصولات ناچیز بود که به دلیل حرکت کند این عناصر از ریشه به اندام هوایی و دانه است (۳). نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان داد که تجمع مس در ریشه و عموماً در سبزیجات بیشتر است. باید دقت نظر داشت که در نتیجهٔ تحقیقات مشابه، با توجه به تأثیر مستقیم و غیرمستقیم عوامل مختلف نظیر کیفیت آب آبیاری، خصوصیات خاک، اقلیم منطقه و جزآن مقدار تجمع مس در قسمت خوراکی گیاه برابر با ۷۲/۰ (۵۰)، ۳/۳۴ (۳۷)، ۱۶/۴ (۸) و ۹/۱ (۳۸) میلی‌گرم در کیلوگرم در نتیجهٔ آبیاری با آب پساب شهری گزارش شده است.

آهن (Fe)

نتایج اندازه‌گیری غلظت آهن در اندام‌های مختلف ذرت، جو، بامیه و جعفری نشان‌دهندهٔ غلظت بالا و تجمع آهن در ریشهٔ هر چهار محصول تحت تیمار آبیاری پساب است. اگرچه به‌طور نسبی مقدار این فلز در ریشهٔ جو آبیاری‌شده با آب چاه نیز قابل‌توجه است، در نتیجهٔ آبیاری با پساب، مقدار تجمع آهن در ریشهٔ ذرت، جو، بامیه و جعفری به‌ترتیب ۲، ۱/۵، ۶/۷ و ۱/۵ برابر بیش از تیمارهایی نظیر آبیاری با آب چاه اندازه‌گیری شده است (شکل ۲). بیشترین مقدار تجمع آهن بین سبزیجات به ۱۰۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در ریشهٔ بامیه و در میان غلات به ۸۶۹ میلی‌گرم در کیلوگرم در ریشهٔ جو، تحت تیمار آبیاری با پساب رسید. در میان تیمارهای تحت آبیاری با آب چاه نیز، بالاترین میزان تجمع آهن در ریشهٔ جو و جعفری به‌ترتیب برابر با ۵۸۳ و ۳۹۸ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. اگرچه عنصر آهن در حالت عادی جزء عناصر مغذی محسوب می‌شود و حد مشخصی برای سمی‌بودن آن در اندام‌های گیاهی لحاظ نشده است، تجمع غلظت‌های بالای این فلز در اندام گیاهان نگران‌کننده است. همچنین، عمدهٔ تجمع آهن در ریشه‌ها صورت گرفته است و انتقال آن به اندام‌های هوایی (به‌خصوص دانهٔ غلات) محدود بود که این روند با نتایج دیگر تحقیقات (۴۹) مطابقت دارد. همچنین، اثر آبیاری گندم و ذرت با پساب تصفیه‌شده باعث افزایش میزان فلزات سنگین، به‌ویژه Mn، Zn و Cu شد. با وجود این، تنها مقدار تجمع آهن زیاد و بالاتر از حد بحرانی بود (۲۳). همچنین، مقادیر مختلفی از تجمع آهن در گیاه جعفری به سبب آبیاری با پساب فاضلاب گزارش شده است که غلظت آهن اندازه‌گیری‌شده ۵۴۳ (۳۸)، ۱۲۳۹ (۲۸) میلی‌گرم در کیلوگرم بوده است و با نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر مطابقت دارد و تأییدی است بر این مهم که سبزیجات تمایل بالایی به جذب آهن از طریق ریشه و انتقال آن به اندام هوایی خود دارد.

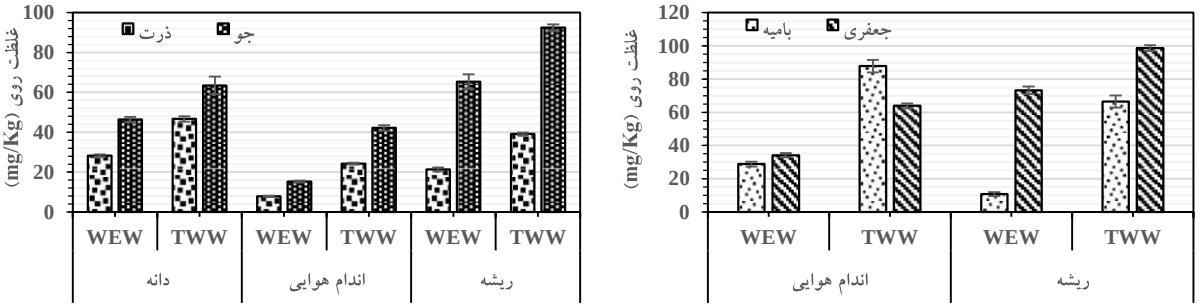


شکل ۲. متوسط غلظت آهن در اندام محصولات مختلف تحت تیمارهای مختلف آبیاری

روی (Zn)

اگرچه روی عنصری ضروری برای رشد گیاه است، در غلظت‌های بالا باعث سمیت و توقف رشد گیاه خواهد شد (۹). در این پژوهش، پراکنش روی در اندام هوایی و ریشهٔ سبزیجات مورد آزمایش (بامیه و جعفری)، همچنین میان ریشه و دانهٔ غلات (ذرت و جو) به‌خصوص در تیمارهای آبیاری‌شده با پساب نزدیک و یکنواخت‌تر بود. به‌طور متوسط، اختلاف کمی از نظر تجمع روی در ریشه و اندام هوایی بامیه و جعفری مشاهده می‌شود. در بین غلات (جو و ذرت)، کمترین غلظت روی در اندام هوایی تیمارهای تحت آزمایش به‌دست آمد. بالاترین مقدار تجمع روی در ریشهٔ جعفری به‌طور متوسط برابر با ۹۹ میلی‌گرم در

کیلوگرم و در جو برابر با ۹۳ میلی‌گرم در کیلوگرم اندازه‌گیری شد. نتایج بررسی اثر پساب تصفیه‌شده بر تجمع روی در جعفری در کشورمان برابر با ۱۰۹ (۴) و ۲۶ (۱۳) میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شده است. همچنین، گزارش شده که سبزیجات و غلات تولیدی از آب‌های نامتعارف، محتوی فلزات سنگین با مقادیر بالاتر از حد بحرانی است (۴۴). در مطالعهٔ محصولات کشت‌شده با پساب در شهر فیصل‌آباد پاکستان مشخص شد که در اصل، ریشهٔ محصولات دارای تجمع بیشتری از فلزات است و هرچه به ساقه و دانه پیش می‌رود، تجمع فلزات کمتر می‌شود (۴۱).



شکل ۳. متوسط غلظت روی در اندام محصولات مختلف تحت تیمارهای مختلف آبیاری

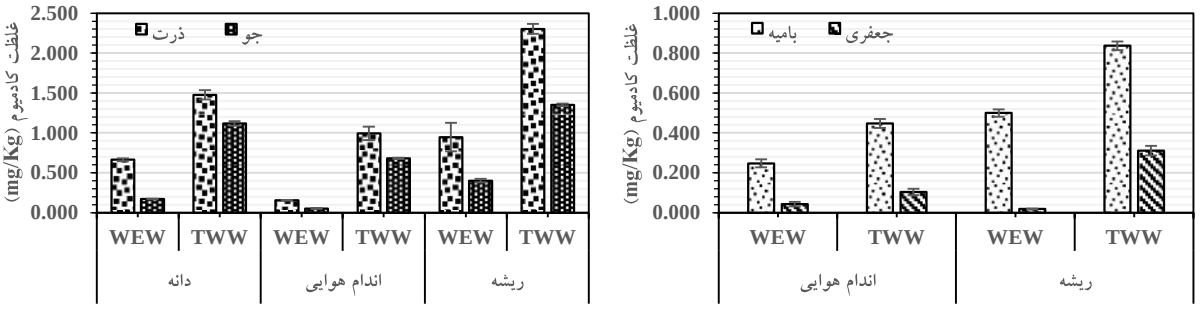
اختلاف چشمگیر میان غلظت روی به‌دست‌آمده در ریشه و اندام هوایی بامیهٔ آبیاری‌شده با پساب نسبت به آب چاه قابل‌توجه است، به‌طوری که مقدار روی تجمع‌یافته در ریشه و اندام هوایی بامیه تحت تیمار پساب به‌ترتیب بیش از ۶ و ۳ برابر مقدار نظیر آبیاری‌شده با آب چاه بود. همچنین، نتایج بررسی تحقیقات روی تجمع روی در گیاه جعفری در نتیجهٔ آبیاری با فاضلاب و پساب تصفیه‌شده نشان می‌دهد که مقدار این عنصر عموماً کمتر از حدود مجاز اعلام شده و نزدیک به نتایج تحقیق حاضر ۳۷ و ۳۸ میلی‌گرم در کیلوگرم بوده است.

کادمیم (Cd)

در بین فلزات سنگین، کادمیم دارای اهمیت ویژه‌ای است، زیرا به‌راحتی در سیستم گیاه جذب می‌شود و سمیت آن در گیاه ۲ تا ۲۰ برابر سایر فلزات سنگین است. در اراضی کشاورزی، کادمیم موجود در کودهای فسفری یکی از منابع عمدهٔ آلودگی خاک با این عنصر سمی است. نقش کودهای فسفری در آلودگی خاک با کادمیم و سمیت آن در گیاه در تحقیقات متعددی گزارش شده است (۶). از طرفی نیز گیاهان بدون اینکه صدمه‌ای ببینند مقادیر زیادی کادموم را در خود جمع می‌کنند. غلظت‌های نسبتاً زیاد کادمیم در بخش‌های خوراکی گیاه تجمع می‌یابد، بدون آنکه علایم بیماری و تأثیرگذاری در گیاه آشکار شود (۹). تجمع کادموم در گیاهان پتانسیل جذب این عنصر در انسان را افزایش می‌دهد. این امر در حالی صورت می‌گیرد که این گیاهان جزو جیرهٔ غذایی است (۳۰). برخلاف سایر فلزات سنگین که غلظت و تجمع آن در سبزیجات عمدتاً بیشتر بود، بیشترین تجمع کادمیم در ریشه و دانهٔ غلات جو و ذرت مشاهده شد (شکل ۳).

کادمیم تحرک زیادی در گیاه دارد و چنانچه با ریشه جذب شود، به‌راحتی به بخش‌های دیگر گیاه منتقل می‌شود (۹). این عنصر همچنین در کاهش جذب آهن، منگنز و

احتمالاً کلسیم، منیزیم و ازت در گیاه نقش دارد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده و برخلاف تجمع مس، آهن و روی در سبزیجات، به‌خصوص در جعفری تجمع کادمیم بسیار کمتر از دیگر محصولات بود. اگرچه افزایش بیش از ۱۷ برابری تجمع کادمیم در ریشهٔ جعفری آبیاری‌شده با پساب نسبت به تیمار آب چاه قابل‌تأمل است، از طرفی، بیشترین غلظت اندازه‌گیری‌شده از تجمع کادمیم به‌ترتیب در ریشه، دانه و اندام هوایی ذرت (آبیاری‌شده با پساب) به‌ترتیب برابر با ۲/۳۰۳، ۱/۴۷۷ و ۰/۹۹۳ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌دست آمد (شکل ۴). در تحقیقی، مقدار غلظت کادمیم در اندام هوایی ذرت آبیاری‌شده با فاضلاب کمتر از ۰/۰۲ نیز گزارش شده است (۳۳). اما، بیشینهٔ مقدار کادمیم در محصولات کشاورزی طبق توصیه، ۰/۱ است (۱۵).



شکل ۴. متوسط غلظت کادمیم در اندام محصولات مختلف تحت تیمارهای مختلف آبیاری

در تحقیقی مشابه، مقدار کادمیم در نمونه‌های سبزیجات در همدان بیش از تیمارهای شاهد به‌دست آمد که دلیل آن بالا بودن غلظت کادمیم در خاک‌های تحت کشت سبزیجات ناشی از فعالیت‌های انسانی بیان شد (۲۹). توصیه شده است که حداکثر غلظت مجاز کادمیم در گیاهان برای مصرف انسان نباید بیش از ۰/۱ تا ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم باشد (۱۷). همچنین، تجمع نسبتاً بالای کادمیم در ریشه و دانهٔ جو قابل‌ملاحظه است. به‌عبارتی، می‌توان گفت که تجمع و انتقال کادمیم از ریشه به اندام هوایی در غلات بیش از سبزیجات بوده است. بالابودن نسبی غلظت کادمیم در تیمارهای آبیاری با آب چاه در ذرت، جو و بامیه نیز قابل‌توجه است، چرا که کادمیم نسبت به فلزات سنگین دیگر، اهمیت و خطر بیشتری دارد و تجمع آن در اندام خوراکی گیاهان و ورود به بدن انسان و دام مشکلات و نگرانی‌های زیادی ایجاد می‌کند.

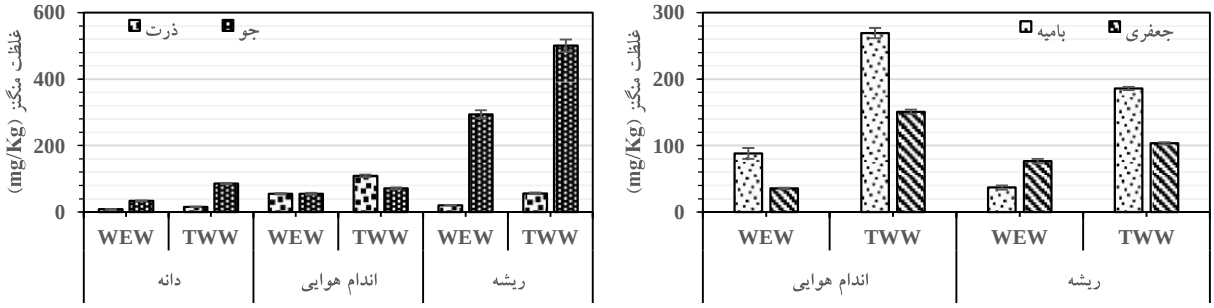
مقدار تجمع کادمیم در اندام‌های جعفری در حد معقول و مناسبی به‌دست آمد، به‌طوری که بیشترین مقدار در ریشهٔ جعفری آبیاری‌شده با پساب برابر با ۰/۳۱ به‌دست آمد، در حالی که تحقیقات مشابه مقادیر بالاتری از تجمع این فلز در اندام جعفری را گزارش کردند (۴، ۳۸، ۵۰). همچنین، نتایج تحقیقات اخیر دربارهٔ تأثیر آبیاری با فاضلاب بر تجمع کادمیم در جعفری نشان داد که به‌طور متوسط مقدار این عنصر کمتر از ۲ میلی‌گرم در کیلوگرم بوده است (۳۹). غلظت کادمیم در سبزیجات برداشت‌شده از حومهٔ شهر همدان به‌طور متوسط ۱/۱۴ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌دست آمد (۱۳). بررسی‌ها بیانگر قابلیت و توانایی متفاوت گونه‌های مورد بررسی در جذب و تجمع کادمیم در اندام‌های مختلف و توانایی بیشتر گونه‌های سبزیجات برگ‌پهن در جذب و تجمع کادمیم در اندام‌های مختلف به‌ویژه در بخش‌های خوراکی است (۵).

مطالعات معدودی در مورد وضعیت تجمع عناصر مختلف در بامیه وجود دارد. مقدار انباشت کادمیم در ریشه و میوهٔ بامیه در این تحقیق به‌ترتیب برابر با ۰/۸۴ و ۰/۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌دست آمد که در هر دو مورد بالاتر از حدود مجاز برای گیاهان است. در گزارشی متوسط غلظت کادمیم در اندام خوراکی بامیه ۱/۷۴ تا ۲/۳۸ میلی‌گرم در کیلوگرم اعلام شده است (۳۳). به‌نظر می‌رسد که یکی از دلایل اصلی آلودگی این محصولات به‌دلیل استفادهٔ بیش از اندازهٔ کودهای شیمیایی، به‌خصوص کودهای فسفاته، باشد، چرا که این نوع کودها گاه حاوی ۰/۰۰۰۵ تا ۰/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیم به‌صورت ناخالصی است که این مقدار وارد خاک و به‌مرور زمان جذب گیاهان می‌شود (۵۳). علاوه‌بر این، قلیایی‌بودن خاک یکی از مهم‌ترین عوامل در جذب عناصر سنگین نظیر کادمیم در گیاه است (۲۵).

منگنز (Mn)

در تحقیقی بیان شد که تجمع منگنز در تمامی اندام‌های گیاه به‌صورت یکنواخت است (۴۹). در این پژوهش، در غلات مورد مطالعه (ذرت و جو) بیشترین تجمع عنصر منگنز در قسمت ریشه و کمترین مقدار تجمع آن در دانه بود. اما در سبزیجات (جعفری و بامیه)، در قیاس با غلات، تجمع منگنز در ریشه و اندام هوایی پراکنش نسبتاً یکسانی داشت و در مجموع تجمع آن در اندام هوایی بیشتر بوده است (شکل ۵). بیشترین تجمع منگنز در ریشهٔ جو و میوهٔ بامیه به‌ترتیب با ۵۰۱ و ۲۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم اندازه‌گیری شد، اما ذرت نسبت به جذب و تجمع منگنز شرایط مناسبی داشت و کمترین مقدار منگنز در بین چهار محصول در این گیاه به‌دست آمد. از این نظر اندام هوایی و دانهٔ جو نیز که از بخش‌های اصلی و خوراکی گیاه محسوب می‌شود، شرایط مناسبی داشته است. مقدار منگنز تجمع‌یافته در اندام هوایی و دانهٔ تمامی تیمارهای ذرت و جو کمتر از ۱۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که در قیاس با حداکثر مقدار مجاز اختلاف و فزونی بالایی دارد. نتایج بررسی اثر پساب تصفیه‌شدهٔ پالایشگاه جنوب تهران بر تجمع منگنز در جعفری و ذرت به‌ترتیب برابر با ۱۱۰ و ۸۷ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شده است (۴).

انباشت منگنز در بخش هوایی بامیه و جعفری که خوراکی است و مصرف زیادی دارد، بسیار قابل‌توجه است، به‌طوری‌که تجمع این فلز تحت آبیاری با پساب تصفیه‌شده به‌ترتیب ۳ و ۴/۳ برابر بیش از تیمار آب چاه به‌دست آمده است. طبق نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر و مقایسهٔ بین آن‌ها مشخص شد که میانگین غلظت عناصر سنگین در انواع سبزیجات برگی متفاوت است.



شکل ۳. متوسط غلظت منگنز در اندام محصولات مختلف تحت تیمارهای مختلف آبیاری

نتایج تحلیل آماری

نتایج تحلیل آماری تأثیر تیمارهای آبیاری بر میزان تجمع فلزات سنگین در اندام‌های مختلف ذرت، جو، بامیه و جعفری در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که با روندی نسبتاً مشابه، اثر تیمار کیفیت آب و اندام‌های مختلف گیاه نسبت به تجمع فلزات سنگین در همهٔ محصولات در سطح احتمال ۱ درصد معنادار بوده است. این در حالی است که بررسی تأثیرات متقابل این دو عامل (تیمار کیفیت آب و اندام گیاهی) نتایج یکسانی نشان نمی‌دهد. غلظت فلزات سنگین مختلف (مس، آهن، روی، کادمیم و منگنز) در تمامی اندام‌های محصول ذرت تحت تیمار آبیاری پساب نسبت به آب چاه اختلاف مقداری قابل‌توجه و تفاوت آماری معناداری داشته است. در جو، غیر از آهن، غلظت فلزات سنگین دیگر در تمامی اندام‌ها در آب آلوده نسبت به آب چاه افزایش معناداری داشت. در هر دو تیمار آبیاری افزایش غلظت همهٔ فلزات در ریشه نسبت به سایر اندام‌ها معنادار بود. همچنین، تجمع مس، آهن و کادمیم در هر دو تیمار آب چاه و پساب در ریشه بیش از میوهٔ بامیه بوده است، در حالی که این روند در روی و منگنز معکوس بود و فزونی و تجمع در میوه بیشتر مشاهده می‌شود.

جدول ۳. جدول تجزیهٔ واریانس در رابطه با تأثیر تیمارهای آبیاری بر تجمع فلزات سنگین در اندام‌های مختلف محصولات

نام محصول	تیمار	درجهٔ آزادی	Cu	Fe	Zn	Cd	Mn
ذرت	آب	۱	۵۱۶/۳**	۴۷۹۴۶**	۱۳۷۷/۱**	۴/۵۳۰**	۴۷۰۳/۲**
	اندام گیاهی	۲	۱۸۸/۰۱**	۱۳۹۹۱۰**	۷۰۸/۸۷**	۱/۶۶۱**	۷۳۸۸**
	آب* اندام گیاهی	۲	۷/۵۷۶ns	۱۹۴۹۰**	۱/۶۶۱ ns	۰/۱۴۱ ns	۸۳۵/۶**
	خطا	۸	۴/۵۸۸	۱۰۷۸/۸	۶/۱۹۲	۰/۰۳۸	۳۷/۱
	ضریب تغییرات (٪)	–	۱۶/۲۳	۱۸/۴۶	۸/۹۰	۱۷/۹۵	۱۳/۸۱
جو	آب	۱	۲۵۱/۲۵**	۱۳۵۸۳۱*	۲۵۳۳**	۱/۸۴۳**	۳۷۹۵۰**
	اندام گیاهی	۲	۷۲۹/۲۱**	۵۸۴۱۰۸**	۳۷۸۴**	۰/۳۹۱*	۲۲۶۱۰۰**
	آب* اندام گیاهی	۲	۱۲/۷۷*	۱۸۰۰۳۵**	۴۹/۷۵ ns	۰/۰۵۱ ns	۱۵۲۹۸**
	خطا	۸	۲/۷۶۲	۷۵۸۵	۸۰/۱۲	۰/۰۵۵	۷۱۱/۸
	ضریب تغییرات (٪)	–	۸/۹۴	۱۵/۵۱	۱۶/۵۲	۳۷/۱۵	۱۵/۳۹
بامیه	آب	۱	۱۰۵۰**	۱۱۲۰۳۴**	۹۸۴۷**	۰/۲۱۶**	۸۱۵۷۶**
	اندام گیاهی	۲	۲۱۸/۱*	۴۵۵۲۸۶**	۱۱۶۱*	۰/۳۱۰**	۱۳۵۸۷**
	آب* اندام گیاهی	۲	۱/۳۶۷ ns	۲۹۰۴۷۴**	۷/۸۰۹ ns	۰/۰۱۴ ns	۷۷۱/۲ ns
	خطا	۸	۱۱/۴۸	۱۹۸۸	۱۲۴/۷	۰/۰۰۴	۲۵۲/۵
	ضریب تغییرات (٪)	–	۱۸/۳۰	۱۰/۴۸	۲۳/۰۳	۱۲/۵۱	۱۰/۹۵
جعفری	آب	۱	۶۳۹/۵**	۶۴۴۸۹**	۲۲۸۳**	۰/۰۹۳**	۱۵۱۵۱**
	اندام گیاهی	۲	۵۸۲/۴**	۲۴۵۳۵۹**	۴۰۷۸**	۰/۰۲۵*	۳۰/۷ ns
	آب* اندام گیاهی	۲	۱/۳۳۳ ns	۶۰۷۹ ns	۱۴/۰۴ ns	۰/۰۴۰*	۵۸۹۶**
	خطا	۸	۳/۱۶۳	۴۱۲۴	۲۵/۲۱	۰/۰۰۳	۳۷/۹۴
	ضریب تغییرات (٪)	–	۷/۴۷	۱۸/۲۹	۷/۴۴	۴۶/۴۸	۶/۷۲

ns = عدم تفاوت معنادار

* = معنادار در سطح ۵٪

** = معنادار در سطح ۱٪

نتایج آزمون مقایسهٔ میانگین در سطح احتمال ۵ درصد نسبت به تجمع فلزات سنگین در اندام‌های مختلف جعفری نشان می‌دهد که غلظت تمام فلزات سنگین در اندام هوایی و ریشهٔ این محصول تحت تیمار پساب دارای افزایشی معنادار و فاحش بوده است. از طرفی نیز، در هر دو تیمار آبیاری مقدار تجمع مس، آهن، روی و کامیم در ریشه به‌طور معناداری بیش از اندام هوایی بوده است، و برعکس تجمع منگنز در اندام هوایی بیش از ریشه بوده است، اما این اختلاف معنادار نبود (جدول ۴).

بررسی تجمع فلزات سنگین در مقایسه با استانداردها

مقایسهٔ نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر (جدول ۴) با مقادیر پیشنهادی استانداردهای ارائه شده حاکی است که سطوح غلظت مس در اندام‌های مختلف هر چهار محصول مورد مطالعه (ذرت، جو، بامیه و جعفری) پایین‌تر از مقادیر حداکثر پیشنهادی FAO/WHO و EU بوده است. سمیت خاصی از آهن به‌استثنای مقادیر بالای آن در گیاهان گزارش نشده است. تنها حدود پیشنهادی برای مقدار آهن در گیاهان برابر با ۴۵۰ و ۴۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است که FAO/WHO و EU اعلام کرده است. اما، مقدار آستانهٔ سمیت این عنصر برای تغذیهٔ دام ۱۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم پیشنهاد شده است (۹). مقایسهٔ میزان غلظت آهن اندازه‌گیری‌شده در محصولات مختلف در تحقیق حاضر نشان می‌دهد که مقدار تجمع این فلز در ریشهٔ هر چهار محصول مورد بررسی بالاتر از حد مجاز استانداردهاست. بیشترین مقدار انباشت آهن نیز در ریشهٔ جو و بامیه (بیش از ۱۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) به‌دست آمد که برای تغذیهٔ دام نیز مناسب نیست. اما، با توجه به پایین‌بودن مقدار آن در اندام هوایی خوراکی این محصولات که نقش مهمی در جیرهٔ غذایی انسانی دارد، نگرانی خاصی وجود ندارد.

تحقیقات دیگری دربارهٔ جعفری، غلظت مس و آهن در تمامی اندام‌های این محصول را بیش از استاندارد WHO گزارش کرده‌اند (۷، ۵۷) که با نتایج این تحقیق تا حدی متفاوت است. مقدار انباشت روی در تمامی محصولات مورد بررسی پایین‌تر از حدود پیشنهادی استاندارد EU به‌دست آمد. اما غلظت این عنصر در اندام‌های مختلف محصولات تحت تیمار آبیاری با پساب (به‌جز ذرت)، بالاتر از حداکثر مجاز استاندارد EU بود، اگرچه روی نیز جز در غلظت‌های بالا، نگران‌کننده و خطرساز نیست.

نتایج بررسی‌های اخیر در منطقهٔ ورامین نشان داد که تجمع تمامی فلزات مورد مطالعه در بافت گیاهی (کاه و کلش گندم و برگ ذرت) بیش از دانهٔ این محصولات بود. همچنین، میزان تجمع سه عنصر Cu، Zn، Ni در مقایسه با استانداردهای FAO، از حد مجاز بالاتر بود (۲). مقدار انباشت منگنز در محصولات مختلف در اکثر موارد نزدیک یا کمتر از ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شده است و تنها غلظت این فلز در میوهٔ بامیه و ریشهٔ جو نسبتاً زیاد بود که به‌ترتیب برابر با ۲۶۹ و ۲۹۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌دست آمده است و با این حال بسیار کمتر از حد پیشنهادی استاندارد FAO/WHO (2007) بود. نتایج اندازه‌گیری مقدار کادمیم تجمع‌یافته در اندام‌های مختلف ذرت، جو، بامیه و جعفری در تمام تیمارهای آبیاری‌شده با پساب و حتی در اندام هوایی و ریشهٔ محصول بامیه و جو تا حد زیادی بیش از مقادیر پیشنهادی استانداردهای ارائه شده است. غلظت بسیار بالای این فلز در ریشه و دانهٔ ذرت (به‌ترتیب برابر با ۲/۳۰ و ۱/۴۸ میلی‌گرم در کیلوگرم) و جو (۱/۳۵ و ۱/۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) با نتایج تحقیقات مشابه مطابقت و موافقت دارد (۲۱، ۳۶) و بسیار نگران‌کننده و خطرناک است، چرا که کادمیم ماده‌ای سرطانزا در ایجاد اغلب سرطان‌ها شناخته شده است (۵۲). همچنین، در این تحقیق، غلظت تمامی فلزات سنگین در

تمام اندام‌های جعفری زیر حد مجاز قرارداشت که با تحقیق مشابه مطابقت دارد (۲۱). طبق نتایج تحقیق حاضر، بالاترین و پایین‌ترین غلظت عناصر سنگین گیاهی به‌ترتیب مربوط به عناصر آهن، روی و کادمیم است که می‌توان آن را به غلظت کل فلزات سنگین در خاک و تحرک متفاوت آن‌ها نسبت داد.

جدول ۴. مقایسهٔ میانگین‌های غلظت فلزات سنگین در اندام‌های مختلف محصولات مورد مطالعه تحت تأثیر تیمارهای آبیاری

نام محصول	تیمار آبیاری	تیمار	مس (mg/kg)	آهن (mg/kg)	روی (mg/kg)	کادمیم (mg/kg)	منگنز (mg/kg)
ذرت	پساب	ریشه	۱۶/۰b	۴۶۶a	۳۹/۲b	۲/۳۰a	۵۶/۳b
		اندام هوایی	۲۵/۶a	۱۵۰c	۲۴/۳cd	۰/۹۹c	۱۰۸a
		دانه (میوه)	۱۴/۱b	۷۱/۱d	۴۶/۷a	۱/۴۸b	۱۵/۸cd
	آب چاه	ریشه	۷/۸۰c	۲۳۲b	۲۱/۴d	۰/۹۵c	۲۰/۷c
		اندام هوایی	۱۳/۱b	۱۰۰cd	۷/۹۳e	۰/۱۵d	۵۴/۶b
		دانه (میوه)	۲/۶۷d	۴۵/۲d	۲۸/۳c	۰/۶۶c	۸/۵۳d
جو	پساب	ریشه	۳۶/۴a	۱۱۶۵b	۹۲/۵a	۱/۳۵a	۵۰۰a
		اندام هوایی	۱۶/۰c	۱۸۶c	۴۲/۲c	۰/۶۸bc	۷۱/۲c
		دانه (میوه)	۱۴/۶c	۷۱/۷c	۶۳/۵c	۱/۱۲ab	۸۵/۹c
	آب چاه	ریشه	۲۶/۲b	۱۷۳۸a	۶۵/۳b	۰/۴۰cd	۲۹۴b
		اندام هوایی	۸/۱۰c	۱۴۴c	۱۵/۲d	۰/۰۵d	۵۴/۷c
		دانه (میوه)	۱۰/۲c	۶۱/۹c	۴۶/۴c	۰/۱۷d	۳۳/۳c
بامیه	پساب	ریشه	۳۲/۴۷a	۱۰۸۰a	۶۶/۴۸a	۰/۸۴a	۱۸۵/۹b
		دانه (میوه)	۲۳/۲۷b	۳۷۹/۶b	۸۷/۷۷a	۰/۴۵b	۲۶۹/۲a
	آب چاه	ریشه	۱۳/۰۸c	۱۶۰/۳c	۱۰/۸۰b	۰/۵۰b	۳۷/۰۰c
		دانه (میوه)	۵/۲۳d	۸۱/۹۳c	۲۸/۸۷b	۰/۲۵c	۸۸/۲۷c
جعفری	پساب	ریشه	۳۷/۷۳a	۵۹۰/۲a	۹۸/۶۴a	۰/۳۱a	۱۰۳/۳b
		اندام هوایی	۲۴/۴۷b	۲۵۹/۲bc	۶۳/۹۳b	۰/۱۰b	۱۵۰/۹a
	آب چاه	ریشه	۲۳/۸۰b	۳۹۸/۴b	۷۳/۲۱b	۰/۰۲b	۷۶/۶۰c
		اندام هوایی	۹/۲۰c	۱۵۷/۴c	۳۴/۱۸c	۰/۰۴b	۳۵/۴۷d
استاندارد FAO/WHO (2001 and 2007)			۴۰ – ۷۳	۴۵۰	۶۰ – ۱۰۰	۰/۱ – ۰/۲	۵۰۰
استاندارد EU (2006)			۴۰	۴۲۵	۶۰	۰/۲ – ۰/۰۵	NL

در هر ستون و برای هر گروه میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک با یکدیگر اختلاف معناداری ندارد (P < ۰/۰۵).

نتیجه‌گیری

وجود فلزات سنگین در دنیای صنعتی امروز به معضلی جدی تبدیل شده است که به طرق مختلف در حال ورود به زنجیرهٔ غذایی انسان است. نتایج تحقیقات پیشین حاکی از آن است که غلظت فلزات سنگین در محلول خاک، در کنترل قابلیت استفادهٔ فلز در گیاهان نقش حیاتی دارد، به‌طوری که با افزایش سطح غلظت عناصر سنگین در خاک، به افزایش غلظت و جذب عنصر در گیاه می‌انجامد (۴۳). غلظت فلزات سنگین در گیاهان با توجه به نوع و رقم گیاه متفاوت است، به‌طوری که جذب این عناصر در گیاهان تحت تأثیر نوع و مرحلهٔ رشدی گیاه، نوع خاک، نوع فلز و سایر فاکتورهای محیطی است. نتایج پژوهش حاضر، تجمع آهن، روی و کادمیم در اندام‌های محصولات مورد بررسی برای پساب بیشتر از آب چاه و در بیشتر موارد بالاتر از حدود استانداردها نیز بود. ولی از نظر تجمع مس و منگنز، علی‌رغم مشاهدهٔ اختلاف معنادار آماری و مقداری بین تیمارهای مختلف، میران تجمع این دو فلز در اندام‌های مختلف محصولات در اکثر موارد پایین‌تر از حدود مجاز قرارداشت. دامنهٔ تغییرات فلزات سنگین در محصولات مختلف تحت تیمارهای آبیاری با پساب، ۱۴/۱–۳۷/۷، ۷۱/۱–۱۱۶۵، ۲۴/۳–۹۸/۶، ۰/۱۰–۲/۳۰ و ۱۵/۸–۲۶۹ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌ترتیب برای مس، آهن، روی، کادمیم و منگنز اندازه‌گیری شد. اگرچه در برخی موارد معدود تجمع برخی فلزات در اندام محصولات مورد بررسی تحت تیمار آب چاه نیز قابل‌توجه و حتی بالاتر از حدود مجاز به‌دست آمد، می‌توان نتیجه گرفت که در غلات و سبزیجاتی که با پساب آبیاری شده است تجمع فلزات سنگین بیشتر و تجمع این فلزات در ریشه بیش از دیگر قسمت‌های گیاه است، هر چند تجمع برخی فلزات در اندام هوایی جعفری بیشتر بود. همچنین، تجمع کادمیم در تمامی اندام‌های بررسی‌شده و انباشت آهن در ریشهٔ تمامی محصولات تحت تیمارهای پساب، بیش از استانداردهای معتبر ارائه شده بود.

منابع

۱. پیرصاحب م. شرفی ک. و دوگوهر ک. (۱۳۹۰) مقایسهٔ کیفیت پساب تصفیه خانهٔ فاضلاب اولنگ مشهد با آب چاه‌های منطقه برای آبیاری. مجلهٔ علمی–پژوهشی آب و فاضلاب، ۴۲: ۳۶–۴۶.

۲. ساسانی ف. (۱۳۹۴) تحلیل چند متغیرهٔ خاک‌های اراضی کشاورزی تحت آبیاری بلندمدت با پساب شهری. دانشگاه رازی، کرمانشاه، پایان‌نامهٔ دکتری.

۳. شهابی‌فر ج. (۱۳۸۹) بررسی اثرات کاربرد فاضلاب‌های صنعتی در اراضی تحت کشت و گیاهان منطقهٔ قزوین. سمینار ملی جایگاه آب‌های بازیافتی و پساب در مدیریت منابع آب، کاربردها در کشاورزی و فضای سبز: ۱–۷.

۴. کاظم‌زاده خویی ج. سادات‌نوری ا. پورنگ ن. علیزاده م. قریشی ح. و پاداش ا. (۱۳۹۱) بررسی و اندازه‌گیری فلزات سنگین نیکل، سرب، مس، منگنز، روی، کادمیم و وانادیم در سبزی‌های خوراکی جنوب پالایشگاه تهران. پژوهش‌های محیط‌زیست، ۳(۶): ۶۵–۷۴.

۵. یارقلی ب. (۱۳۸۷) بررسی میزان جذب کادمیم از محیط ریشه و میزان تجمع آن در اندام محصولات زراعی. دانشگاه تهران، تهران، پایان‌نامهٔ دکتری.

۶. کریمیان، ن. (۱۳۷۷) پیامدهای زیادهروی در مصرف کودهای شیمیایی فسفری. مجلهٔ خاک و آب، ۱۴(۴): ۱–۱۲.

7. Afzal S. Abdul N. Nazeef U. Ali R. Muhammad A. Muhammad Z. and Muhammad S.K. (2013) Comparative study of heavy metals in soil and

selected medicinal plants. Journal of Chemistry, 5: 36-40.

8. Al-jaboobi M. Zouahri A. Tijane M. Housni A.El. Mennane Z. Yachou H. and Bouksaim M. (2014) Evaluation of heavy metals pollution in groundwater, soil and some vegetables irrigated with wastewater in the Skhirat region B Morocco. J Mate Environ Sci., 5: 961-966.

9. Alloway B.J. (1995) Heavy metals in soils. 2nd ed. Glasgow: Blackie Academic and Professional: 16.

10. Baba A. Erees F.S. and Cam H.S. (2008) An assessment of the quality of various bottled mineral water marketed in Turkey. Environ Monit Assess., 85: 139-277.

11. Bedbabis S. Trigui D.B. Ahmed C. Clodoveo M.L. Camposeo S. and Vivaldi G.A. (2015) Long-terms effects of irrigation with treated municipal wastewater on soil, yield and olive oil quality. Agri Waste Manage., 160: 14-21.

12. Charan P.D. Ashwani K. Jakhar, Singh M. Singh K. and Manoj K.M. (2014) Analysis of some heavy metals in waste water irrigated vegetables grown in Bikaner City, Rajasthan. Journal of Applied Phytotechnology in Environmental Sanitation, 3(1): 29-34.

13. Chraghy M. and Ghobadi A. (2014) Evaluation of the health risk assessment of heavy metals (cadmium, nickel, lead and zinc) in the parsley vegetable harvested from some farms of Hamedan. Sunrise Health Journal, 13(4): 130-143.

14. Christou A. Maratheftis G. Eliadou E. Michael C. Hapeshi E. and Fatta-Kassinos D. (2014) Impact assessment of the reuse of two discrete treated wastewaters for the irrigation of tomato crop on the soil geochemical properties, fruit safety and crop productivity. Agri Ecosyst Environ., 192: 105-114.

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

16. Cui Y. Zhu Y.G. Zhai R. Huang Y. Qin Y. and Liang J. (2005) Exposure to metal mixtures and human health impacts in a contaminated area in Nanning, China. Environment International, 31(6): 784-90.

17. Dadban Y. Shahriari A. Rahimzade H. and Mehdinejad M. (2009) Investigation of cadmium and lead in vegetable land in Gorgan. 12th Environmental Health Conference, Tehran.

18. EU (2006) Commission regulation (EC) No. 1881/2006, setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. Official Journal of the European Union, 364: 5-24.

19. European Union (2002) Heavy Metals in Wastes, European Commission on Environment.

20. Eva P. (2008) Survey of bottled drinking water available in Manitaba, Anada. Environmental Health Perspective, 108(9): 863.

21. Ewers U. (1991) Standards, guidelines and legislative regulations concerning metals and their compounds. In: Metals and their compounds in the Environment. (Ed.) E. Merian, VCH, Weinheim, New York, Basel, Cambridge: 687-711.

22. FAO (1985) Water quality for agriculture. Paper no. 29 (Rev. 1). UNESCO Publication, Rome, p 96.

23. Feizi M. and Rastghalam Z. (2012) The effect of treated wastewater irrigation on accumulation of heavy metals in selected plants. The 1th International and the 4th National Congress on recycling of organic waste in agriculture, Isfahan, Iran.

24. Ghosh A.K. Bhatt M.A. and Agrawal H.P. (2012) Effect of long-term application of treated sewage water on heavy metal accumulation in vegetables grown in northern India. Environ Monit Assess., 184(2): 1025-1036.

25. Grey C.W. McLaren R.G. Roberts A.H.C. and Condron L.N. (1998) Sorption and desorption of cadmium from some New Zealand soils: Effect of pH and contact time. Australian Journal of Soil Research, 36: 199-216.

26. Gupta N. Khan D.K. and Santra S.C. (2011) Heavy metal accumulation in vegetables grown in a long-term wastewater-irrigated agricultural land of tropical India. Environ. Monit. Assess., Epub.

27. Hasan H.I. Anwar M. Battikhi M. and Qrunfleh M. (2015) Impacts of treated wastewater reuse on some soil properties and production of gladiolus communis. Jordan Journal of Agricultural Sciences, 11(4): 1103-1118.

28. Jabeen S. Shah M.T. Khan S. and Hayat M.Q. (2010) Determination of major and trace elements in ten important folk therapeutic plants of Haripur basin, Pakistan. Medicinal Plants Research, 4(7): 559-566.

29. Jalali M. and Khanlari Z.V. (2008) Cadmium availability in calcareous soils of agricultural lands in Hamadan, western Iran. Soil and Sediment Contamination: an International Journal, 17(3): 256-68.

30. Kabata-Pendias A. (2011) Trace elements in soils and plants. 4th ed. Boca Raton, Florida: CRC Press.

31. Khan A. Khan S. Alam M. Khan M.A. Aamir M. Qamar Z. Rehman Z. and Perveen S. (2016) Toxic metal interactions affect the bioaccumulation and dietary intake of macroand micro-nutrients. Chemosphere, 146: 121-128.

32. Khan S. Rehman S. Khan A.Z. Khan M.A. and Shah M.T. (2010) Soil and vegetables enrichment with heavy metals from geological sources in Gilgit, northern Pakistan. Ecotoxicology and Environmental Safety, 73: 1820-1827.

33. Khan M.U. Malik R.N. and Muhammad S. (2013) Human health risk from Heavy metal via food crops consumption with wastewater irrigation practices in Pakistan. Chemosphere, 93: 2230-2238.

34. Klute A. and Dirkwen C. (1986) Hyraulic conductivity and Dffusivity: Laboratory methods. p 687-734. In: A. Klute (Ed.), Method of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. Monogr. 9, ASA and SSSA, Madison, WI.

35. Lone M.I. Saleem S. Mahmood T. Saifullah K. and Hussain G. (2003) Heavy metal contents of vegetables irrigated by sewage/tube well water. International Journal of Agriculture Biology, 5: 533-535.

36. Masona C. Mapfaire L. Mapurazi S. and Makanda R. (2011) Assessment of heavy metal accumulation in wastewater irrigated soil and uptake by maize plants (*Zea mays* L) at Firle Farm in Harare. Sustainable Development, 4(6): 132-137.

37. Mohamed A.E. Rashed M.N. and Mofty A. (2003) Assessment of essential and toxic elements in some kinds of vegetables. Ecotoxicology and Environmental Safty, 55: 251-260.

38. Mohamed H.H.A. and Khairia M.A.Q. (2012) Assessment of some heavy metals in vegetables, cereals and fruits in Saudi Arabian markets. Aquatic Research, 38: 31-37.

39. Mohammadi P. Rigi Hossien Abadi N. Darsanjc

A. and Sohrabi Y. (2016) Determination of lead and cadmium in vegetables farmed countryside Kermanshah, Iran. International Journal of Crop Science, 19(4): 174-180.

40. Muchuwetia M. Birkettb J. Chinyangaa E. Zvauyaa R. Scrimshawc M. and Lester J.N. (2006) Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: Implications for human health. Agric Ecosyst Environ., 112: 41-48.

41. Murtaza G. Usman M. and Ahmad H.R. (2015) Monitoring and management of wastewater for safer crop production. Global Journal on Advances Pure and Applied Sciences, 5: 78-85.

42. Noor-ul- A. Anwar H. Sidra A. and Shumaila B. (2013) Accumulation of heavy metals in edible parts of vegetables irrigated with waste water and their daily intake to adults and children, District Mardan, Pakistan. Food Chemistry, 136: 1515-1523.

43. Orisakwe O.E. Nduka J.K. Amadi C.N. Dike D. and Obialor O.O. (2012) Evaluation of potential dietary toxicity of heavy metals of vegetables. Journal of Environmental and Analytical Toxicology, 2(3).

44. Raja S. Cheema H.M.N. Babar S. Khan A.A. Murtaza G. and Aslam U. (2015) Socio-economic background of wastewater irrigation and bioaccumulation of heavy metals in crops and vegetables. Agricultural Water Management, 158: 26-34.

45. Rashid A. Jabeen N. Batool A. and Ahmad R. (2016) Comparison of cadmium and zinc accumulation in onion and radish irrigated with municipal wastewater. Journal of Applied Agriculture Biotechnology, 1(1): 47-53.

46. Reynolds W.D. Drury C.F. Tan C.S. Fox C.A. and Yang X.M. (2009) Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify physical quality. Geoderma, 152: 252-263.

47. Singh A. Sharma R.K. Agrawal M. and Marshall F.M. (2010) Health risk assessment of heavy metals via dietary intake of foodstuffs from the wastewater irrigated site of a dry tropical area of India. Food Chemistry Toxicology, 48(2): 611-619.

48. Singh S. and Kumar M. (2006) Heavy metal load of soil water and vegetables in peri-Urban Delhi. Environ Monit Assess., 120(1-3): 79-91.

49. Smith S.R. (1996) Agricultural recycling of sewage sludge and the environment. CABI Press: 400 pp.

50. Stalikas C.D. Mantalovas A.C. and Pilidis G.A. (1997) Multi-element concentrations in vegetable species grown in two typical agricultural areas of Greece. Science of the Total Environment, 206: 17-24.

51. Uzma S. Azizullah A. Bibi R. Nabeela F. Muhammad U. Ali I. Rehman Z. and Häder D.P. (2016). Effects of industrial wastewater on growth and biomass production in commonly grown vegetables. Environmental Monitoring and Assessment, 188: 1-13.

52. Waalkes M.P. (2003) Review cadmium carcinogenesis. Mutation Research, 533: 107-20.

53. Wang Q.C. and Ma Z.W. (2004) Heavy metals in chemical fertilizer and environmental risks. Rural Eco-Environment, 20(2): 62-64.

54. WHO/FAO (2007) FAO/WHO food standard programme codex alimentarius commission 13th session. Report of the Thirty Eight Session of the Codex Committee on Food Hygiene Houston, TX, USA.

55. World Health Organization (WHO) (2003) Guidelines for drinking water quality. 3rd ed. Geneva: World Health Organization.

56. Younis U. Malik S.A. Rizwan M. Qayyum M.F. Ok Y.S. Shah M.H.R. Rehman R.A. and Ahmad N. (2016) Biochar enhances the cadmium tolerance in spinach (Spinacia oleracea) through modification of Cd uptake and physiological and biochemical attributes. Environmental Science and Pollution Research, doi: 10.1007/s11356-016-7344-3.

57. Zaigham H. Zubair A. Khalid U.K. Mazhar I. Rizwan U.K. and Jabar Z.K.K. (2012) Civic pollution and its effect on water quality of River Toi at district Kohat, NWFP. Environmental and Earth Sciences, 4(5).