نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۷، شماره ۳، مرداد – شهریور ۱۳۹۲، ص. ۵۸۰-۵۷۰

Journal of Water and Soil
Vol. 27, No.3, Jul.-Agu. 2013, p. 570-580

اثر بیست‌وسه سال آبیاری سطحی با پساب شهری بر انباشت بعضی فلزات سنگین در خاک، انتقال به دانه‌های گندم و ذرت و خطرات بهداشتی مرتبط

حبیب اله بیگی هرچگانی[1*]- گلنوش بنی طالبی[2]

تاریخ دریافت:۱۳۹۱/۱۰/۴
تاریخ پذیرش:۱۳۹۲/۴/۱۶

چکیده

به رغم جنبه‌های مفید پساب شهری به عنوان منبع غنی از عناصر غذایی و ماده آلی، ورود فلزات سنگین در نتیجه‌ی کاربرد درازمدت آن در خاک‌های زراعی مشکل‌ساز خواهد بود. هدف از تحقیق حاضر ۱- تعیین غلظت کل فلزات سنگین روی، مس، کادمیوم، سرب،کروم و نیکل در خاک و دانه‌های گندم و ذرت و ۲- محاسبه‌ی شاخص‌های انباشت آلودگی،انتقال گیاهی و شاخص خطر بهداشتی این عناصر پس از کاربرد درازمدت پساب شهری در منطقه‌ی طاقانک است. به همین منظور، دو مزرعه با خاک ظاهراً مشابه ولی با تاریخچه‌های متفاوت آبیاری انتخاب شدند: مزرعه‌ی اول فقط با آب چاه و مزرعه‌ی دیگر طی ۲۳ سال اخیر فقط با پساب شهری شهرکرد آبیاری سطحی شده بودند. آبیاری با پساب در مزرعه‌ی دوم منجر به افزایش غلظت روی، مس، کروم و نیکل و افزایش شاخص انباشت آن‌ها از ۱ به ترتیب به ۱/۲، ۱/۳، ۱/۶ و ۱/۶ و کاهش غلظت و شاخص انباشت کادمیوم و سرب به ترتیب به ۰/۴ و ۰/۸ گردید. بزرگترین شاخص انتقال به دانه‌های گندم و ذرت مربوط به کادمیوم (۶/۱۴ و ۴/۸۸) و سرب (۴/۸۵ و ۴/۹۶)، و کمترین مربوط به کروم (۰/۲۲ و ۰/۳۰) و البته نیکل (صفر) بود. غلظت کادمیوم، کروم وسرب در دانه‌ی گندم و ذرت فراتر از حد مجاز اتحادیه اروپا بود. شاخص خطر سرب برای کودکان و بزرگسالان در گندم و ذرت و شاخص خطر کادمیوم برای کودکان در ذرت بزرگ‌تر از ۱ بود که به مفهوم خطر جدی و فزاینده مصرف گندم و ذرت تولید شده در این ناحیه است.

واژه‌های کلیدی: پساب شهری، فلزات سنگین، شاخص انباشت آلودگی، شاخص انتقال گیاهی، شاخص خطر بهداشتی

مقدمه

کمبود آب با کیفیت مناسب، حفظ و توسعه کشاورزی را در نواحی خشک محدود می‌سازد. از این رو، ناچاراً برای آبیاری از آب‌های نامتعارف از جمله پساب شهری استفاده می‌شود (۶). کاربرد پساب عموماً منجر به افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک و گیاه می‌شود. این افزایش بستگی به نوع و ویژگی‌های پساب مصرف شده دارد. گاهی هم کاربرد پساب می‌تواند به کاهش غلظت یک عنصر در خاک و گیاه منجر شود (۲۱).

اگرچه بدن انسان به عناصری از قبیل روی، مس، نیکل و کروم در مقادیربسیار کم نیازمند است ولی مقادیر بسیار کم عناصری مانند کادمیوم و سرب برای سلامتی انسان خطرناک است. به طور کلی فلزات سنگین می‌توانند مشکلات بهداشتی مختلفی را در انسان ایجاد کنند. به عنوان مثال تجمع کادمیوم در بدن انسان منجر به عملکرد نادرست کلیه، ایجاد سرطان و تجمع سرب باعث اختلال در سیستم عصبی، کم‌خونی و آسیب کلیوی می‌شود (۱۷).

تغییرات غلظت هر عنصر آلاینده را پس از کاربرد پساب در مقایسه با غلظت آن عنصر قبل از کاربرد، با شاخص انباشت آلودگی خاک[3] (PLI) ارزیابی می‌کنند. چن و همکاران (۱۳) و خان و همکاران (۱۸) نشان دادند که آبیاری با پساب شهری به مدت ۵۰ سال منجر به افزایش شاخص انباشت آلودگی روی، مس، کادمیوم، کروم، سرب و نیکل در خاک شده است.

تنها غلظت فلزات سنگین در خاک، برای پیش‌بینی وضعیت جذب آن‌ها توسط گیاه کافی نیست بلکه در بررسی آلودگی سیستم پیچیده‌ی خاک-گیاه حتماً بایستی به ویژگی‌های شیمیایی خاک (از

۱و۲ – استادیار و دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد، گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد
(*- نویسنده مسئول: Email: beige.habib@gmail.com)

3- Pollution Load Index

قبیل اسیدیته خاک، وضعیت اکسایش و احیاء و میزان و نوع و مواد آلی)، نوع فلز، نوع یا گونه‌ی گیاهی و عملیات زراعی نیز توجه داشت (۲). توانمندی جابه‌جایی عناصر سنگین از خاک به گیاه با عامل (شاخص) انتقال گیاهی[1] (PCF) ارزیابی می‌شود. بزرگ‌تر بودن شاخص انتقال گیاهی در گیاهان گوناگون کشت شده در یک خاک، نشان‌دهنده‌ی برتری آن گونه‌های گیاهی در انباشت فلزات سنگین است (۲). فیضی و راست‌قلم (۱۶) نشان دادند که در مزارعی که به مدت ۸ سال با پساب شهری آبیاری شده بودند، غلظت منگنز و روی در دانه‌ی گندم بیشتر بود در حالی که در بخش هوایی یونجه افزایش غلظت هیچ‌کدام از عناصر در مزارع آبیاری شده با پساب نسبت به شاهد معنی‌دار نبود.

خطر حاصل از جذب فلزات سنگین توسط گیاه و بلع آن به وسیله‌ی انسان با شاخص خطر بهداشتی[2] (HRI) ارزیابی می‌شود (۱۹). مقادیر بزرگ‌تر از عدد یک این شاخص برای هر فلز بیان‌گر خطر فزاینده‌ی آن فلز سنگین برای سلامتی انسان است. چن و همکاران (۱۳) در بررسی خود روی سه گیاه آفتاب‌گردان، پنبه و ذرت در خاک‌هایی که ۵۰ سال با پساب آبیاری شده بودند به این نتیجه رسیدند که فقط در دانه‌ی آفتاب‌گردان شاخص خطر، عددی بزرگ‌تر از یک بود. خان و همکاران (۱۸) در زمین‌های آبیاری شده با پساب شهری به مدت ۵۰ سال، با اندازه‌گیری کادمیوم، کروم، مس، نیکل، سرب و روی در بافت خوراکی تربچه، کاهو، کلم سبز، ذرت، شلغم و آفتاب‌گردان نشان دادند مقادیر شاخص خطر بهداشتی برای تمام عناصر در گیاهان ذکر شده کمتر از آستانه‌ی خطر، یعنی یک بود.

تاکنون پژوهش‌های زیادی به منظور ارزیابی اثر کاربرد پساب بر غلظت فلزات سنگین در خاک و محصولات مختلف انجام شده است (۱۴). بسیاری از این پژوهش‌ها در شرایط گلخانه و در یک یا دو فصل زراعی انجام شده است (۷) ولی اثر درازمدت آبیاری با پساب بر غلظت فلزات سنگین در خاک و گیاهان آبیاری شده با پساب، شاخص انباشت آلودگی، شاخص انتقال گیاه و شاخص خطر بهداشتی در مزرعه و در شرایط صحرایی در کشورهای مختلف از جمله ایران کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف از مطالعه‌ی حاضر اندازه‌گیری غلظت شش فلز سنگین روی، سرب، کادمیوم، کروم، مس و نیکل در خاک و دانه‌های دو گیاه گندم و ذرت کشت شده در دو مزرعه‌ی طاقانک (شهرکرد) به منظور محاسبه‌ی شاخص انباشت آلودگی در خاک، شاخص انتقال گیاهی و شاخص خطر بهداشتی ناشی از مصرف گندم و ذرت برای کودکان و بزرگسالان پس از ۲۳ سال کاربرد پساب شهری در شهرکرد است.

مواد و روش‌ها

برای بررسی پیامدهای دراز مدت آبیاری با پساب شهری شهرکرد بر غلظت فلزات سنگین در خاک و گیاه، دو مزرعه در منطقه‌ی طاقانک در۱۷کیلومتری جنوب شهرکرد انتخاب شدند. این منطقه دارای اقلیم نیمه معتدل با میانگین درجه حرارت و بارش سالانه به ترتیب ۱۱/۵درجه‌ی سلسیوس و ۲۵۰ میلی‌متر بوده و در ارتفاع ۲۰۳۰ متری از سطح دریای آزاد قرار دارد. این دو مزرعه تقریباً مجاور یکدیگر واقع شده اند (شکل ۱). این مزارع از نظر بافت خاک و توپوگرافی مشابه ولی از لحاظ تاریخچه‌ی آبیاری با پساب متفاوت بودند. مزرعه‌ی۱ فقط با آب چاه و مزرعه‌ی۲ در مدت ۲۳ سال اخیر فقط با پساب شهری آبیاری سطحی شده‌اند. پساب مصرفی در این مزرعه خروجی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب بهرام آباد در نزدیکی شهر طاقانک است. روش تصفیه فاضلاب در این تصفیه خانه از نوع لجن فعال با هوادهی گسترده است. در زمان نمونه‌برداری (سال ۱۳۹۰) در هر دو مزرعه گندم و ذرت کشت شده بود. از هر یک از مزارع فوق‌الذکر ۱۵ نمونه‌ی خاک به طور تصادفی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری برداشت شد و مقدار اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره‌ی ۱:۵، کربن آلی خاک و همچنین غلظت شش فلز سنگین روی، سرب، کادمیوم، کروم، مس و نیکل در آن‌ها اندازه‌گیری شد. اسیدیته توسط دستگاه pHمتر الکترونیکی و هدایت الکتریکی توسط دستگاه هدایت‌سنج الکترونیکی (۲۶)، و کربن آلی خاک به روش اکسایش تر (۲۲) تعیین شدند. هم‌چنین از محل برداشت هر نمونه‌ی خاک نمونه‌ی گیاهی (گندم و ذرت) تهیه و غلظت شش عنصر مذکور در دانه‌ی آن‌ها اندازه‌گیری شد.

تعیین غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک و دانه‌ی گیاه: غلظت کل روی (Zn)، سرب (Pb)، کادمیوم (Cd)، کروم (Cr)، مس (Cu) و نیکل (Ni) در نمونه‌های خاک پس از عصاره‌گیری با اسید نیتریک (۲۷) و با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل GBC923plus اندازه‌گیری شدند. برای تعیین غلظت عناصر مذکور در دانه‌های گندم و ذرت ابتدا یک گرم از نمونه‌های پودر شده گیاهی در کوره الکتریکی در دمای ۵۵۰ درجه‌ی سلسیوس خاکستر شده و پس از حل خاکستر آن‌ها در اسیدکلریدریک غلظت کادمیوم، سرب، نیکل، روی، کروم و مس در محلول صاف شده (۲۸) به وسیله‌ی دستگاه جذب اتمی مدل GBC923plus قرائت شد.

تعیین غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک و دانه‌ی گیاه: غلظت کل روی (Zn)، سرب (Pb)، کادمیوم (Cd)، کروم (Cr)، مس (Cu) و نیکل (Ni) در نمونه‌های خاک پس از عصاره‌گیری با اسید نیتریک (۲۷) و با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل GBC923plus اندازه‌گیری شدند.

1- Plant Concentration Factor
2- Health Risk Index

شکل۱- کروکی مزارع واقع در منطقه طاقانک. علامت ● نقاط نمونه‌برداری را نشان می‌دهد

برای تعیین غلظت عناصر مذکور در دانه‌های گندم و ذرت ابتدا یک گرم از نمونه‌های پودر شده گیاهی در کوره الکتریکی در دمای ۵۵۰ درجه‌ی سلسیوس خاکستر شده و پس از حل خاکستر آن‌ها در اسیدکلریدریک غلظت کادمیوم، سرب، نیکل، روی، کروم و مس در محلول صاف شده (۲۸) به وسیله‌ی دستگاه جذب اتمی مدل GBC923plus قرائت شد.

محاسبه‌ی شاخص انباشت آلودگی (PLI): شاخص انباشت آلودگی از رابطه‌ی زیر بدست آمد (۱۳):

$$PLI=C_{soil(sample)}/C_{reference} \quad (۱)$$

که در آن: $C_{soil(sample)}$ و $C_{refrence}$ به ترتیب بیان‌گر میانگین غلظت کل هر فلز سنگین در خاک‌های آبیاری شده با پساب و میانگین غلظت آن فلز در خاک مرجع (آبیاری شده با آب چاه) برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک می‌باشند.

محاسبه‌ی عامل انتقال گیاهی (PCF): عامل انتقال به گیاه با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه شد (۱۳):

$$CF=C_{plant}/C_{soil} \quad (۲)$$

که در آن: C_{plant} و C_{soil} به ترتیب نشان‌دهنده‌ی غلظت هر عنصر در دانه‌ی خشک و در خاک خشک (بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم) است.

محاسبه‌ی دریافت روزانه عناصر سنگین[1] (DIM): دریافت روزانه‌ی هر فلز از رابطه‌ی زیر محاسبه شد (۲۰):

$$DIM=(C_{metal}.C_{factor}.D_{food_intake})/B_{average} \quad (۳)$$

که در آن: C_{metal} غلظت فلز سنگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در دانه‌های هر گیاه است. مقدار ضریب تبدیل C_{factor} که برای تبدیل وزن تر به وزن خشک گیاهی مورد استفاده قرار گرفت ۰/۰۸۵ در نظر گرفته شد (۲۵)؛ D_{food_intake} بیان‌گر میزان مصرف روزانه فلز سنگین است که مقدار پیشنهادی برای کودکان معادل ۲۸۹ گرم گندم و ۲۳۲ گرم ذرت و برای بزرگسالان معادل ۳۸۰ گرم گندم و ۳۴۵ گرم ذرت است و $B_{average}$ متوسط وزن شخص که برای بزرگسالان و کودکان به ترتیب معادل ۵۵/۹ و ۳۲/۷ کیلوگرم در نظر گرفته شد (۲۹).

محاسبه‌ی شاخص خطر بهداشتی فلزات سنگین (HRI): شاخص خطر بهداشتی هر فلز براساس رابطه‌ی زیر محاسبه شد (۲۰):

$$HRI=DIM/R_fD \quad (۴)$$

که در آن: R_fD بیان‌گر مقدار خوراکی مرجع (میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) بوده ومیزان پیشنهادی آن برای عناصر روی، سرب، کادمیوم، کروم، مس و نیکل به ترتیب ۰/۳، ۰/۰۰۳۵، ۰/۱، ۰/۰۰۱، ۰/۰۴ و ۰/۰۲ است (۱۳).

غلظت کل روی، سرب، کادمیوم، کروم، مس و نیکل در پنج نمونه‌ی آب چاه و پنج نمونه‌ی پساب با دستگاه جذب اتمی مدلGBC923plus، اسیدیته و هدایت الکتریکی نمونه‌های آب چاه و پساب نیز توسط دستگاه pHمتر و هدایت‌سنج الکترونیکی (۲۶) و BOD و COD به‌ترتیب با دستگاه BOD متر و روش تقطیر برگشتی اندازه‌گیری شدند. مقایسه‌ی ویژگی‌های پساب و آب چاه، مزرعه‌ی ۱ با مزرعه‌ی ۲ و شاخص انتقال گندم و ذرت با آزمون t مستقل انجام گرفت. مقایسه‌ی میانگین شاخص‌های انباشت و انتقال عناصر در خاک و به گیاه با استفاده از تجزیه‌ی واریانس و مقایسه‌ی میانگین‌ها با LSD انجام گرفت. تمام مقایسات با سطح اطمینان ۹۵ درصد توسط نرم‌افزارSTATISTICA10.0 انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های شیمیایی و غلظت عناصر سنگین مورد نظردر پساب و آب چاه مورد استفاده برای آبیاری دو مزرعه‌ی مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.

1- Daily Intake of heavy Metals

جدول۱- برخی از ویژگی‌های شیمیایی و غلظت بعضی از عناصر سنگین در پساب و آب چاه مورد استفاده در آبیاری

ویژگی یا غلظت	واحد	پساب		آب چاه		حد مجاز (mg/L)	
						استاندارد ایران(۸)	استاندارد فائو (۱۵)
اسیدیته(pH)	–	۷/۹	b	۷/۶	a	–	–
هدایت الکتریکی (EC)	dS/m	۰/۷	b	۰/۵	a	–	–
اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD)	mg/L	۱۷	b	ناچیز	a	۱۰۰	–
اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)	mg/L	۴۵	b	ناچیز	a	۲۰۰	–
روی	mg/L	۰/۰۳	a	۰/۰۱	a	۲	۲
مس	mg/L	۰/۰۴	a	۰/۰۲	a	۲	۰/۲
سرب	mg/L	۰/۰۵	a	۰/۰۴	a	۱	۵
کادمیوم	mg/L	۰/۰۱	a	۰/۰۲	b	۰/۱	۰/۰۱
کروم	mg/L	۰/۰۲	a	۰/۰۲	a	۲	۰/۱
نیکل	mg/L	۱/۳۹	a	۰/۰۱	b	۲	۰/۲

حروف کوچک متفاوت انگلیسی نشان دهنده‌ی تفاوت آماری در بین عناصر سنگین آب چاه و پساب است ($p<0/05$)

مقادیر pH و EC پساب بیشتر از آب چاه است ($p<0/05$). برخلاف پساب که حاوی ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر ماده‌ی آلی است، آب چاه حاوی هیچ نوع ماده‌ی آلی نبوده و بالاتر بودن مقدار BOD و COD پساب نسبت به آب چاه نیز نشان دهنده‌ی این واقعیت است. غلظت نیکل در پساب و غلظت کادمیوم در آب چاه از حد مجاز فائو بیشتر است ولی غلظت بقیه عناصر فلزی اندازه‌گیری شده در پساب و آب چاه زیر حد مجاز ایران و فائو است. غلظت روی و مس در پساب مقداری بیشتر از غلظت آن‌ها در آب چاه است ولی آزمون t تفاوت معنی‌داری نشان نداد ($p>0/05$). غلظت سرب و کروم در پساب و آب چاه یکسان ولی غلظت کادمیوم آب چاه دو برابر غلظت کادمیوم پساب است ($p<0/05$). برعکس، غلظت نیکل نیز در پساب مصرفی چهارده برابر آب چاه است ($p<0/05$).

اثر پساب بر ویژگی‌های فیزیکی–شیمیایی و غلظت فلزات سنگین در خاک دو مزرعه با استفاده از تجزیه‌ی واریانس بررسی و نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است. در این جدول به منظور مقایسه‌ی حد مجاز فلزات سنگین مورد نظر، حدود استاندارد تعیین شده برای این عناصر براساس توصیه‌های سازمان بهداشت جهانی (WHO)، اتحادیه‌ی اروپا (EU) و انگلستان (UK) آورده شده است (۱۳). آبیاری درازمدت با پساب شهری موجب کاهش معنی‌دار pH و هدایت الکتریکی خاک شده است ($p<0/05$) هرچند که هدایت الکتریکی پساب بیشتر از آب چاه بوده است. به نظر می‌رسد علت این امر مصرف حجم بیشتری از پساب (اطلاعات حاصل از کشاورزان) در مقایسه با آب چاه باشد. کاهش هدایت الکتریکی خاک با گزارش پژوهشگران دیگر (۳، ۴ و ۱۰) نیز هم‌خوانی دارد. بر خلاف این دو ویژگی، آبیاری با پساب کربن آلی خاک را افزایش داده است ($p<0/05$) زیرا پساب برخلاف آب چاه حاوی کربن آلی است (جدول ۱) که با BOD و COD نمایش داده می‌شود. پژوهشگران دیگر مانند دریچزل و همکاران (۱۴) نیز نتیجه مشابهی را گزارش کردند.

غلظت تمامی عناصر اندازه‌گیری شده روی، مس، کروم، سرب و نیکل به جزء کادمیوم در محدوده‌های استاندارد تعیین شده (سازمان بهداشت جهانی، اتحادیه‌ی اروپا و انگلستان) برای این عناصر قرار دارد. آبیاری با پساب به مدت ۲۳ سال اثرات متفاوتی بر غلظت شش عنصر فلزی اندازه‌گیری شده در خاک گذاشته است. کاربرد پساب غلظت فلزات سنگین مورد مطالعه در خاک را تغییر داده است. در این میان، غلظت کادمیوم و سرب پس از ۲۳ سال کاهش و غلظت سایر فلزات افزایش یافته است ($p<0/05$). حداکثر افزایش غلظت عناصر در خاک پس از ۲۳ سال آبیاری با پساب، مربوط به نیکل (۹+ mg/L) و حداقل افزایش مربوط به مس (۲/۵+mg/L) بوده است. علت افزایش حداکثری نیکل خاک را می‌توان به چهارده برابر بودن غلظت نیکل پساب نسبت به آب چاه ربط داد. کاهش غلظت کادمیوم خاک در این مدت ناچیز (۰/۴- mg/L) ولی کاهش غلظت سرب نسبتاً قابل توجه (۵- mg/L) بوده است. کاهش کادمیوم خاک پس از ۲۳ سال آبیاری با پساب را می‌توان به غلظت کمتر کادمیوم پساب (جدول ۱) نسبت داد. با توجه به این‌که مقدار سرب در پساب کمی بیشتر از آب چاه است، کاهش سرب ممکن است به جذب بیشتر آن توسط گیاه مربوط باشد.

گزارش‌های مختلف حاکی از افزایش غلظت بعضی فلزات سنگین خاک در پی کاربرد پساب است. برای مثال، طبق گزارش چن و همکاران (۱۳) ۵۰ سال آبیاری با پساب باعث افزایش معنی‌دار غلظت کادمیوم، سرب، نیکل، روی و مس نسبت به خاک مرجع (آبیاری شده با آب چاه)شده است. منیر و همکاران (۲۱) هم گزارش کردند که آبیاری گیاهان علوفه‌ای با پساب شهری به مدت ۲ تا ۱۰ سال، غلظت روی، مس، آهن و منگنز در خاک را افزایش داده است. از طرف دیگر، بعضی از پژوهشگران کاهش غلظت بعضی از فلزات

سنگین را در خاک در پی آبیاری با پساب گزارش کرده‌اند.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی وشیمیایی و غلظت فلزات سنگین در خاک مزرعه‌ی ۱ (آبیاری شده با آب چاه) و مزرعه‌ی ۲ (آبیاری با پساب به مدت ۲۳ سال) و حدود مجاز فلزات سنگین براساس استانداردهای سازمان بهداشت جهانی (WHO)، اتحادیه‌ی اروپا (EU) و انگلستان (UK)

ویژگی	واحد	مزرعه‌ی ۱ (n=۱۵)					مزرعه‌ی ۲ (n=۱۵)					استانداردها		
		آبیاری با آب چاه (مرجع)					آبیاری با پساب به مدت ۲۳ سال							
		میانگین		بیشینه	کمینه	خطای معیار	میانگین		بیشینه	کمینه	خطای معیار	تغییر*	EU (۲۰۰۱)	WHO (۱۹۸۴)	UK (۱۹۸۹)
اسیدیته	-	۷/۹۹	a	۸/۱۰	۷/۷۴	۰/۰۳	۷/۷۷	b	۸/۶۰	۷/۲۰	۰/۰۹	-۰/۲۲			
هدایت الکتریکی	dS/m	۰/۳۶	b	۰/۴۹	۰/۲۹	۰/۰۱	۰/۲۳	a	۰/۲۹	۰/۱۶	۰/۰۱	-۰/۱۳			
کربن آلی	g/kg	۱۱/۵	a	۱۱/۹	۵/۵	۰/۱۲	۲۰/۳	b	۳۲/۰	۱۱/۰	۰/۱۶	+۸/۸			
روی	mg/kg	۲۹/۵	a	۳۵/۰	۱۷/۱	۱/۱۲	۳۳/۴	b	۳۶/۸	۲۹/۰	۰/۶۵	+۴		۹۰	
مس	mg/kg	۸/۷	a	۱۱/۳	۳/۸	۰/۴۷	۱۱/۲	b	۱۴/۰	۶/۷	۰/۵۲	+۲/۵		۳۰	
سرب	mg/kg	۲۳/۸	a	۳۰/۳	۱۶/۳	۰/۹۱	۱۹/۱	b	۲۰/۸	۱۶/۹	۰/۹۵	-۵		۳۰	
کادمیوم	mg/kg	۰/۷	a	۰/۸	۰/۶	۰/۰۲	۰/۵	b	۰/۵	۰/۱	۰/۴۳	-۰/۴		۰/۳۵	
کروم	mg/kg	۱۸/۰	a	۲۲/۲	۱۰/۳	۰/۷۴	۲۸/۴	b	۲۸/۴	۱۶/۲	۰/۸۴	+۶			۳۴
نیکل	mg/kg	۲۰/۶	a	۲۷/۳	۵/۸	۱/۴۱	۲۹/۷	b	۳۴/۲	۱۹/۰	۱/۱۰	+۹	۵۰		

در هر سطر حروف کوچک متفاوت انگلیسی به معنی تفاوت معنی‌دار میانگین یک ویژگی بین خاک دو مزرعه است ($p<0.05$).

* میزان تغییر در میانگین ویژگی پس از آبیاری با پساب به مدت ۲۳ سال نسبت به خاک مرجع است و علامت مثبت و منفی به ترتیب بیان کننده‌ی مقدارافزایش و یا کاهش آن ویژگی است.

برای مثال، پدریرو و آلرکون (۲۳) دریافتند که کادمیوم خاک پس از مصرف پساب شهری در یک فصل زراعی نسبت به خاک مرجع تمایل به کاهش داشته است. منیر و همکاران (۲۱) نیز گزارش کردند که آبیاری با پساب به مدت ۱۰ سال میزان کادمیوم خاک را کاهش داده است. اما، صفری‌سنجانی (۵) نتیجه گرفت که ۷ سال کاربرد پساب شهری سبب هیچ‌گونه تغییری در غلظت آهن، مس، منگنز، نیکل و سرب خاک نشده است. به نظر می‌رسد که هر گونه تغییر در غلظت کل فلز خاک تابعی از غلظت آن فلز در پساب، میزان کاربرد پساب، برداشت گیاهی و گاهی آبشویی باشد.

مقادیر شاخص انباشت آلودگی فلزات سنگین مزرعه‌ی آبیاری شده با پساب به مدت ۲۳ سال در جدول ۳ آورده شده است. بیشترین مقدار شاخص انباشت آلودگی خاک مربوط به کروم و نیکل و کمترین مقدار آن مربوط به کادمیوم است. سرب و به ویژه کادمیوم نه تنها در خاک انباشته نشده بلکه به نظر می‌رسد آبیاری با پساب از غلظت آن‌ها در خاک کاسته است.

سرنوشت آلاینده‌ها در خاک به فرآیندهای متعددی نظیر جذب سطحی، آبشویی و اتصال به مواد آلی بستگی داشته و کاهش غلظت کادمیوم و سرب می‌تواند در اثر آبشویی این عناصر به اعماق پایین‌تر خاک و یا افزایش حلالیت آن‌ها و جذب توسط گیاه باشد (۹). قشلاقی و همکاران (۲۴) یادآور شدند که مقادیر انباشت آلودگی کوچک‌تر از ۱، ۱ تا ۳، ۳ تا ۶ و بزرگ‌تر از ۶ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی انباشت کم، متوسط، قابل توجه و بسیار زیاد آلودگی برای یک عنصر است. نتایج ما نشان داد که آبیاری با پساب منجر به انباشت متوسط مس (۱/۳)، روی (۱/۲)، کروم (۱/۶) و نیکل (۱/۶) در خاک شده است. سایر پژوهشگران نیز به نتایج مشابهی در ارتباط با انباشت متوسط (مقادیر بزرگ‌تر از ۱) روی (۱/۹) و مس (۱/۶) و انباشت قابل توجه نیکل (۳/۳) در خاک تحت کاربرد پساب شهری به مدت ۵۰ سال رسیده‌اند (۱۳). خان و همکاران (۱۸) انباشت بسیار زیاد کروم (۳/۰)، مس (۳/۹)، نیکل (۱۰/۹) و روی (۲/۱) را در خاک ۵۰ سال آبیاری شده با پساب گزارش کردند.

افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک خطر انتقال به گیاه و آبشویی به آب زیرزمینی را افزایش می‌دهد. با این حال، انتقال یک عنصر سمی به گیاه تابعی از ویژگی‌های خاک و گیاه زراعی است. افزایش یک عنصر در گیاه نشان‌دهنده‌ی تحرک بالای آن عنصر در خاک و تمایل بالای گیاه به جذب آن است. آلن و همکاران (۱۲) نشان دادند که نوع گونه‌ی گیاهی و مدت زمان قرارگیری گیاه در معرض فلزات سنگین بر غلظت آلاینده‌ها در گیاه اثرگذار بوده و در نتیجه بر شاخص انتقال گیاهی این عناصر اثر می‌گذارد. میانگین شاخص انتقال گیاهی برای دانه‌ی گندم و ذرت تولید شده در مزرعه‌ی ۲ در جدول ۴ آورده شده است.

در بین عناصر، بزرگترین میانگین شاخص انتقال به گندم و ذرت مربوط به کادمیوم (۶/۱۴ و ۴/۸۸) و سرب (۴/۸۵ و ۴/۹۶)، و کمترین آن مربوط به کروم (۰/۲۲ و ۰/۳۰) و نیکل (صفر) است. جالب آنکه شاخص انتقال نیکل به گیاه، علی‌رغم غلظت زیاد و شاخص انباشت ۱/۶ آن، ناچیز است. به عبارت دیگر، در این خاک نیکل جذب گندم و ذرت نمی‌شود. تفاوت گندم و ذرت در جذب عناصر از شاخص‌های انتقال قابل استنباط است (جدول ۴). هر دو گیاه زراعی در جذب سرب و نیکل یکسان عمل می‌کنند و مقدار نیکل در دو گیاه مذکور ناچیز و غیر قابل اندازه‌گیری است.

طبق گزارش امینی و همکاران (۱) بین میزان غلظت قابل‌جذب نیکل در اندام هوایی و ظرفیت تبادل کاتیونی و کربن آلی خاک هم‌بستگی منفی و معنی‌داری وجود داشته و با افزایش ماده آلی جذب نیکل توسط گیاه به خاطر کمپلکس شدن این عنصر کاهش می‌یابد. گندم در جذب روی و به ویژه مس قوی‌تر از ذرت عمل می‌کند و بنابراین از نظر این دو عنصر غذایی نیز غنی خواهد بود.

جدول ۳- میانگین شاخص انباشت آلودگی عناصر سنگین در مزرعه‌ی ۲ که به مدت ۲۳ سال با پساب آبیاری شده است

روی	مس	سرب	کادمیوم	کروم	نیکل
۱/۲bc	۱/۳cd	۰/۸b	۰/۴a	۱/۶d	۱/۶d

حروف کوچک متفاوت انگلیسی به معنی تفاوت معنی‌دار در بین شاخص انباشت عناصر است ($p<0.05$)

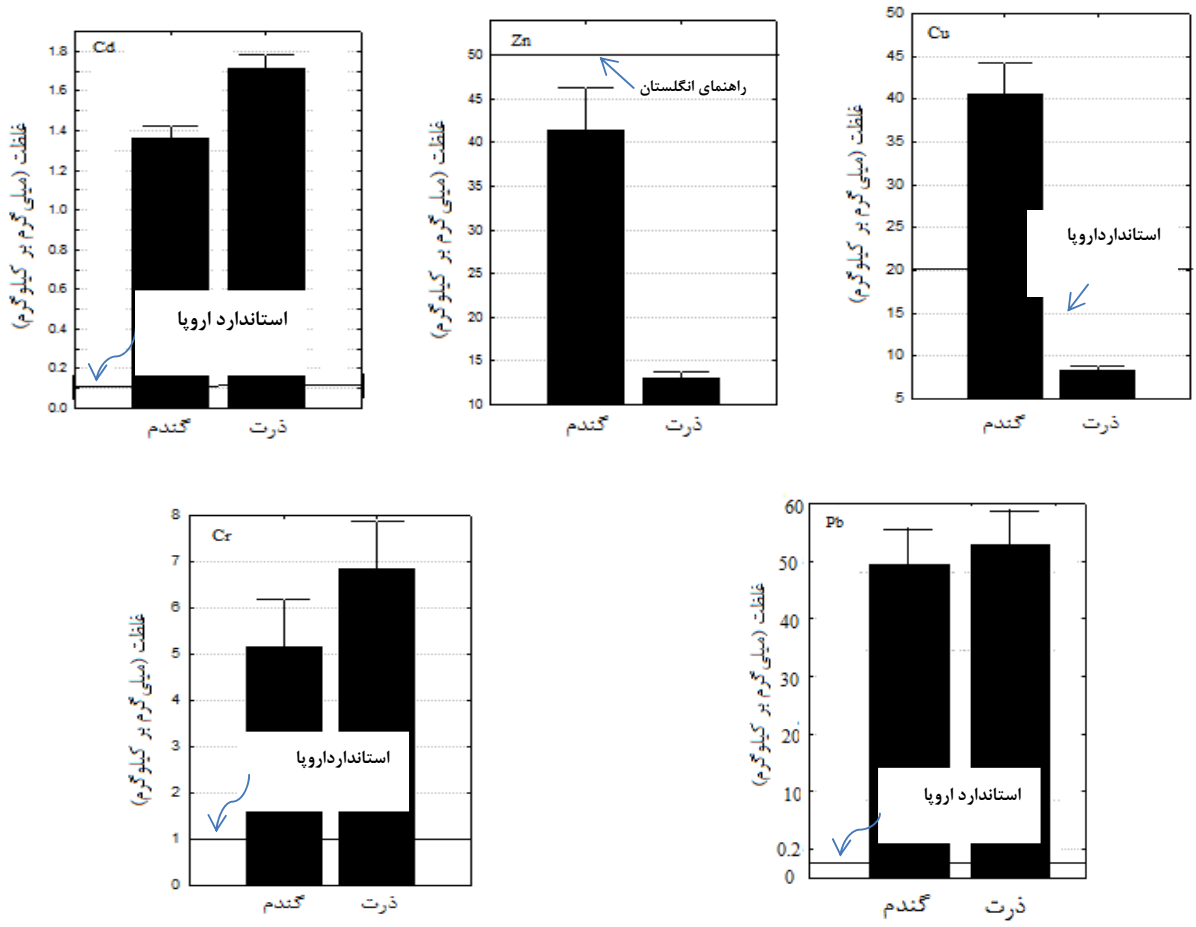
جدول ٤- میانگین شاخص انتقال گیاهی عناصر سنگین دانه‌ی گندم و ذرت کشت شده در مزرعه ۲ که به مدت ۲۳ سال با پساب آبیاری شده است

	روی	مس	سرب	کادمیوم	کروم	نیکل*
گندم	۱/۲۰b A	۳/۵۹c A	۴/۹۶d A	۴/۸۸d A	۰/۲۲a A	ناچیز a A
ذرت	۰/۸۰b B	۰/۷۵b B	۴/۸۵c A	۶/۱۴d B	۰/۳۰a B	ناچیز a A

حروف کوچک انگلیسی متفاوت در هر سطر نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار آماری در بین عناصر ($p<0.05$) و حروف بزرگ انگلیسی متفاوت در هر ستون نشان دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار شاخص انتقال گیاهی برای هر عنصر بین گندم و ذرت است ($p>0.05$).* غلظت نیکل در دانه‌ی گندم و ذرت ناچیز و نزدیک به صفر بود.

سایر محققین نیز نشان دادند که غلظت روی و مس در گندم و ذرت کشت شده در خاک آبیاری شده با پساب افزایش یافته و غلظت روی و مس در گندم بیشتر از ذرت بود (۱۱ و ۱۶). برعکس ذرت در جذب کروم و به ویژه کادمیوم فعال‌تر از گندم است. از این رو، شاید کاشت گندم در مزارع منطقه‌ی طاقانک که در آن‌ها از پساب برای آبیاری استفاده می‌شود بر کشت ذرت برتری داشته باشد. وجود اثرات تشدیدی (سینرژیسمی) و منفی (آنتاگونیسمی) بین فلزات نیز بر جذب آن‌ها اثرگذار است. برای مثال گفته شده است که افزایش غلظت سرب در خاک منجر به افزایش جذب کادمیوم توسط گیاه می‌شود (۱۲). شاید، بالاتر بودن شاخص انتقال گیاهی غلظت‌های کادمیوم و سرب در دانه‌ی گندم و ذرت در مزرعه‌ی ۲ نتیجه‌ی اثر تشدیدی این دو عنصر باشد.

بالاتر بودن شاخص انتقال گیاهی یک عنصر در گیاه نشان دهنده‌ی تمایل بیشتر گیاه برای جذب آن عنصر است. طبق نظر آلن و همکاران (۱۲) عواملی از قبیل اسیدیته خاک، مقدار کربن آلی، غلظت فسفات خاک، فیزیولوژی گیاه و مدت زمان قرار گیری گیاه در معرض عناصر سنگین بر میزان شاخص انتقال مس، سرب و روی اثر می‌گذارند. آلن و همکاران (۱۲) دامنه کلی شاخص انتقال گیاهی را برای روی (۱۰-۱)، برای مس (۱-۰/۱)، برای سرب (۰/۱-۰/۰۱)، برای کادمیوم (۱۰-۱)، برای کرمیوم (۰/۱-۰/۰۱) و برای نیکل (۱-۰/۱) ذکر کرده است که البته وابسته به نوع گیاه و ویژگی‌های خاک است (۱۲). با توجه به نتایج جدول ۴ شاخص انتقال گیاهی مس، سرب و کروم در مزرعه‌ی دوم مورد بررسی فراتر از حد بالایی دامنه طبیعی آن‌ها است (۱۲). غلظت روی، مس،سرب، کادمیومو کروم در دانه‌ی گندم و ذرت تولید شده در مزرعه‌ی ۲ در شکل ۲ نمایش داده شده است. خطوط مبنا در هر شکل بیان‌گر حد مجاز غلظت گیاهی برای روی، مس، سرب، کادمیوم وکروم به ترتیب معادل ۵۰، ۲۰،۲، ۰/۱ و ۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک دانه است (۱۳).



شکل ۲- غلظت فلزات سنگین در دانه‌ی گندم و ذرت کشت شده در مزرعه‌ی آبیاری شده با پساب به مدت ۲۳ سال

با توجه به شکل ۲ معلوم می‌شود غلظت کروم، کادمیوم و سرب در دانه‌های گندم و ذرت فراتر از حد مجاز است، غلظت روی و مس در گندم به ترتیب نزدیک به حد مجاز یا فراتر از آن است، غلظت روی و مس در دانه‌ی ذرت زیر حد مجاز است و غلظت کادمیوم در ذرت بیشتر از گندم است. روی در دانه‌ی گندم علی‌رغم این که کمتر از حد مجاز بوده ولی احتمال می‌رود که با مصرف مداوم پساب و با گذشت زمان غلظت روی در دانه‌ی گندم از حد مجاز فراتر برود. گیاه ذرت غلظت کمی از دو عنصر روی و مس را دربر داشت که با توجه به بالاتر بودن میانگین شاخص انتقال گیاهی روی و مس در گندم نسبت به ذرت (جدول ۴) چنین نتیجه‌ایی دور از انتظار نمی‌باشد. علاوه بر این میزان شاخص انتقال گیاهی کادمیوم ذرت بالاتر از گندم بوده و بیشتر بودن غلظت این عنصر را در ذرت توجیه می‌نماید.

بالاتر بودن غلظت سه عنصر سنگین کروم، کادمیوم و سرب از حد مجاز، مصرف گندم و ذرت تولید شده در این مزارع را برای انسان نامناسب می‌سازد. در مورد روی و مس دانه‌های گندم این نگرانی وجود ندارد زیرا معمولاً کمبود این دو عنصر غذایی در رژیم غذایی انسان مشکل‌سازتر است اگرچه مقادیر زیاد یک عنصر در بافت خوراکی گیاه نشان‌دهنده‌ی خطر آن عنصر برای مصرف کننده است، ولی تصویر کاملاً دقیقی از خطر ارائه نمی‌دهد. زیرا مصرف کننده بر حسب عادت غذایی و امکان مالی ممکن است روزانه مقادیر کمتر و یا بیشتری از یک بافت خوراکی گیاه را دریافت کند. بنابراین برای ارزیابی خطر ناشی از مصرف بافت خوراکی گیاه در انسان، از شاخص خطر بهداشتی استفاده می‌شودکه در آن نه تنها غلظت عنصر در بافت گیاهی بلکه دریافت روزانه و وزن مصرف کننده بر اساس دو رده‌ی سنی کودک و بزرگسال هم در نظر گرفته می‌شود. میانگین دریافت روزانه و شاخص خطر بهداشتی فلزات سنگین برای کودکان و بزرگسالان، ناشی از مصرف گندم و ذرت تولید شده در مزرعه‌ی ۲، در جدول ۵ آورده شده است.

میانگین دریافت روزانه عناصر و در بین دو گونه‌ی گیاهی گندم و ذرت روند خاصی را نشان نمی‌دهد. میانگین دریافت روزانه‌ی سرب توسط کودکان و بزرگسالان و کادمیوم توسط کودکان ناشی از مصرف گندم و ذرت فراتراز حد استاندارد سازمان بهداشت جهانی (۱۳) (به ترتیب ۰/۰۳ و ۰/۰۰۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) است. شاخص خطر کوچک‌تر از ۱ بیان‌گر ایمنی نسبی مصرف بخش خوراکی گیاه مورد نظر است. شاخص خطر بهداشتی سرب ناشی از مصرف گندم و ذرت برای کودکان و بزرگسالان بسیار بزرگ‌تر از ۱ است.

شاخص خطر کادمیوم هم یا در حال نزدیک شدن به ۱ (بزرگسالان) یا از آن فراتر رفته است (برای کودکان). از این رو، باید از مصرف گندم و ذرت تولید شده در این شرایط جلوگیری شود. با اینکه غلظت‌های سرب، کادمیوم و کروم در گندم و ذرت و غلظت مس فقط در دانه‌ی گندم فراتر از حد مجاز بود (شکل ۲) ولی بر خلاف انتظار، شاخص خطر بهداشتی در ارتباط با همه‌ی این فلزات بزرگ‌تر از حد آستانه (یک) مشاهده نگردید بلکه این شاخص فقط در مورد فلزات سنگین سرب و کادمیوم در گندم و ذرت بزرگ‌تر از حد آستانه است. از طرف دیگر، اگرچه غلظت مس در گندم بیشتر از غلظت آن نسبت به استانداردهای مذکور است، با این وجود شاخص خطر بهداشتی آن کوچک‌تر از ۱ بود و انتظار می‌رود با گذشت زمان نه چندان طولانی، از ۱ بیشتر شود. در یک کار تحقیقاتی، شاخص خطر بهداشتی مس در دانه‌ی آفتاب گردان تولید شده در برخی مزارع چین که به مدت ۵۰ سال با پساب آبیاری شده بودند بیشتر از ۱ گزارش شده است (۱۳). قشلاقی و همکاران (۲۴) نیز شاخص خطر بهداشتی کادمیوم در بخشی از دشت شیراز را که با فاضلاب (تصفیه نشده) آبیاری شده بود بزرگ‌تر از ۱ گزارش نمودند.

جدول ۵- تخمین دریافت روزانه‌ی فلزات سنگین (DIM) و شاخص خطر بهداشتی(HIR) برای کودکان و بزرگسالان در صورت مصرف گندم و ذرت کشت شده در مزرعه‌ی۲ (۲۳ سال آبیاری با پساب)

گیاه	رده سنی		روی	مس	سرب	کادمیوم	کروم	نیکل
گندم								
	کودکان	DIM	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰
		HRI	۰/۱۰	۰/۸۰	۸/۸۵	۱/۰۰	۰/۰۵	۰
	بزرگسالان	DIM	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۳	۰
		HRI	۰/۰۸	۰/۶۰	۶/۸۰	۰/۷۲	۰/۰۴	۰
ذرت								
	کودکان	DIM	۰/۰۱۵	۰/۰۰۵	۰/۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۰
		HRI	۰/۰۵	۰/۱۳	۷/۵۱	۱/۰۳	۰/۰۰۳	۰
	بزرگسالان	DIM	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴	۰/۰۲	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۳	۰
		HRI	۰/۰۴	۰/۱۱	۶/۵۳	۰/۹۰	۰/۰۰۲	۰

نتیجه‌گیری

آبیاری با پساب شهرکرد به مدت ۲۳ سال اثرات متفاوتی بر غلظت فلزات سنگین در خاک داشته است به طوری که غلظت سرب و کادمیوم در خاک کاهش و غلظت روی، مس، کروم و نیکل افزایش یافته است. این تغییرات متناسب با بالاتر بودن غلظت این فلزات در پساب در مقایسه با آب چاه به نظر می‌رسد. شاخص انباشت آلودگی خاک برای کروم و نیکل بزرگ‌تر از شاخص انباشت عناصر دیگر بود. هم‌چنین مشخص گردید که غلظت کروم، کادمیوم و مس در دانه‌های گندم و ذرتی که تحت آبیاری با پساب تولید شده بودند از حد مجاز برای مصرف انسان فراتر رفته است. شاخص خطر سرب در گندم و ذرت برای همه‌ی مصرف‌کنندگان و شاخص خطر کادمیوم در ذرت برای کودکان بزرگ‌تر از ۱ بود. بنابراین، مصرف گندم و ذرت تولید شده در این مزرعه و مزارع مجاور و مشابه در طاقانک می‌تواند برای سلامتی انسان خطر جدی داشته باشد. با توجه به نتایج، به نظر می‌رسد شاخص خطر بهداشتی، برآورد محتاطانه‌تر و محافظه‌کارانه‌تری از خطر فلزات سنگین، در مقایسه با حد مجاز استفاده از آن توسط گیاهان ارائه می‌کند که احتمالاً واقعی‌تر و قابل قبول‌تر است. بنابراین توصیه می‌شود مطالعات مشابهی در خاک‌های دشت شهرکرد که با پساب شهری آبیاری می‌شوند انجام شود تا صحت نتایج این پژوهش ارزیابی شود و به‌ویژه جایگزینی کشت گندم و ذرت با گیاهان زراعی دیگر مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

۱- امینی ف.، میرغفاری ن. و عشقی ب. ۱۳۹۰. بررسی غلظت نیکل در خاک و تعدادی از گونه‌های گیاهی طبیعی اطراف معدن سرب و روی آهنگران در استان همدان. علوم و تکنولوژی محیط زیست ۱۳(۱): ۲۰-۱۱.

۲- تدین م.ر. ۱۳۸۷. تاثیر پساب کارخانه قند بر درصد عناصر اندام هوایی، عملکرد و اجزای عملکرد دو رقم گندم. نشریه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۲(۴۵): ۴۹۸-۴۸۹.

۳- جلالی ع.، گلوی م.، قنبری ا.، رمرودی م. و یوسف الهی م. ۱۳۸۹. اثر آبیاری با فاضلاب تصفیه شده‌ی شهری بر عملکرد و جذب فلزات سنگین در سورگوم علوفه‌ای. نشریه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۴(۵۲): ۲۳-۱۵.

۴- رحمانی ح.ر. ۱۳۸۴. بررسی کیفیت پساب‌های فاضلاب شهری و صنعتی و اثرات آن‌ها بر خاک و آب و گیاه در ایران. مجموعه مقالات نهمین کنگره علوم خاک ایران. جلد اول. ۶ تا ۹ شهریور. ۱۳۸۴. دانشگاه تهران. صفحات ۴۰۰-۳۹۸.

۵- صفری‌سنجانی ع. ۱۳۷۴. پیامد آبیاری با پساب بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک ناحیه برخوار اصفهان و انباشتگی برخی عناصر در گیاه یونجه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی. دانشگاه صنعتی اصفهان.

۶- قنبری ا.، عابدی کوپایی ج. و طایی سمیرمی ج. ۱۳۸۵. اثر آبیاری با پساب فاضلاب تصفیه شده شهری روی عملکرد و کیفیت گندم و برخی ویژگی‌های خاک در منطقه سیستان. نشریه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۰(۴):۷۳-۵۹.

۷- مرادمند م. و بیگی هرچگانی ح. ۱۳۸۸. اثر آبیاری با پساب تصفیه شده شهری بر توزیع سرب و نیکل در اندام فلفل سبز. نشریه پژوهش آب در ایران ۳(۵):۷۰-۶۳.

۸- معاونت تحقیقاتی سازمان حفاظت محیط زیست. ۱۳۷۱. استاندارد خروجی فاضلاب‌ها. انتشارات دفتر آموزش زیست محیطی.

۹- موسویان ن. ۱۳۸۶. بررسی تغییرات غلظت عناصر سنگین در اراضی مجاور شرکت فولاد آلیاژی ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۱۰- نظری م.ع.، شریعتمداری ح.، افیونی م.، مبلی م. و رحیلی ش. ۱۳۸۵. اثر کاربرد پساب و لجن فاضلاب صنعتی بر غلظت برخی عناصر و عملکرد گندم، جو و ذرت. نشریه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۰(۳):۱۱۰-۹۷.

۱۱- هراتی م.، تمدن رستگار م.، حریری ن. و وراوی‌پور م. ۱۳۸۹. اثرات استفاده از پساب‌های شهری و مشکلات تجمع فلزات سنگین در اراضی کشاورزی (منطقه‌ی جنوب شهر تهران). صفحات ۱۲-۱. کنگره‌ی چالش‌های کود: نیم قرن مصرف کود در ایران، تهران، ایران. ۱۲-۱۰

12- Allen H.E., Huang C.P., Bailey G.W., and Bowers A.R. 1995. Metal Speciation andContamination of Soil. Lewis Publishers, USA.

13- Chen Z-F., Zhao Y., Zhu Y., Yang X., Qiao J., Tianc Q., and Zhang Q. 2009. Health risks of heavy metals in sewage-irrigated soils and edible seeds in Langfang of Hebei province, China. Journal of Science Food Agriculture, 90:314-320.

14- Drechsel P., Ascott C.H., Raschid-sally L., Redwood M., and Bahri A. 2010. Wastewater Irrigation and Health Assessing and Mitigating Risk in Low-income Countries. Earthscan, London.

15- FAO/WHO.1984. List of contaminants and their maximum levels in foods. Codex Alimentarius Commission. Available at http://www.codexalimentarius.org.(visited on 10 November 2012).
16- 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 4thNational Congress on Recycling of Organic Waste in Agriculture, 26–27 April, 2012. Isfahan, Iran. pp: 1-5.
17- Haidar K., and Schaffer A. 2009.Soil Biochemistry.Science Publishers, Enfield, USA.
18- Khan S., Cao Q., Zheng Y.M., Huang Y.Z., and Zhu Y.G. 2008. Health risks of heavy metals incontaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. Environmental Pollution, 152:686-692.
19- Khan S., Farooq R., Shahbaz S.H., Aziz Khan M., and Sadique M. 2009. Health risk assessment of heavy metals for population via consumption of vegetables. World Applied Sciences Journal, 6:1602-1606.
20- Moradmand M., and Beigi Harchegani H. 2011.Treated municipal wastewater irrigation effect on lead content and health risks of nickel in soil and pepper in Shahrekord, Iran. Desalination and Water Treatment, 28:42-45.
21- Munir J., Rusan M., Hinnawi S., and Rousan L. 2007. Long-term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. Soil Science Society of American Journal, 215:143-152.
22- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1982.Total carbon, organic carbon and organic matter.In :Methods of Soil Analysis. A.L. Page et al. (ed.). Part 2. Second ed. ASA and SSSA, Madison, WI. pp: 539–579.
23- Pedrero F., and Alarcon J.J. 2009. Effects of treated wastewater irrigation on lemon trees. Desalination, 246:631–639.
24- Qishlaqi A., Moore F., and Forghani G. 2008. Impact of untreated wastewater irrigation on soil and crops in Shiraz suburban area, SW Iran. Environmental Monitoring Assess, 141:257-273.
25- Rattan R.K., Datta S.P., Chhonkar P.K., Suribabu K., and Singh A.K. 2005. Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils,crops and groundwater,a case study. Agriculture, Ecosystem and Environmen, 109:310–322.
26- Rhoades J.D. 1982. Soluble salinity.In:Method of Soil Analysis. A.L. Page et al. (ed.). Part 2. Second ed. ASA and SSSA, Madison, WI. pp: 167-178.
27- Sposito G., Lund L.J., and Chang A.C. 1982. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. Soil Science Society of American Journal, 46:260-264.
28- Westerman R.L. 1990. Soil Testing and Plant Analysis. SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
29-Wang X.L., Sato T., Xing B.S., and Tao S. 2005. Health risks of heavy metals to the general public in Tianjin, China via consumption of vegetables and fish. Science of the Total Environmental, 350:28–37.

Journal of Water and Soil
Vol. 27, No.3, Jul.-Agu. 2013, p. 570-580

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۷، شماره ۳، مرداد – شهریور ۱۳۹۲، ص. ۵۸۰-۵۷۰

The Effect of Twenty-Three Years of Surface Irrigation with Treated Municipality Wastewater on Soil Loadings, Transfer to Wheat and Corn Grains, and Related Health Risks of Some Heavy Metals

H. Beigi Harchegani[1]*- G. Banitalebi[2]
Received: 24-12-2012
Accepted: 07-07-2013

Abstract

Despite beneficial effects of wastewater as a nutrient and organic carbon source, its long-term application for irrigation may lead to soil and food pollution. The aims of this study were (1) to determine the total concentration of six heavy metals: zinc, copper, cadmium, lead, chromium, and nickel in the soil and the wheat and corn grains grown in the Taqanak region, Shahrekord; and (2) to calculate the associated pollution loading index (PLI), plant concentration factor (PCF) and health risk index (HRI) after long-term surface irrigation with treated municipality wastewater. For this, two neighboring fields of seemingly similar soil and site characteristics but contrasting irrigation water were selected. The first field had always been irrigated with well water and the second field had been irrigated only with treated wastewater for the past 23 years. In the second field, wastewater application has increased the zinc, chromium, copper and nickel soil concentrations, and therefore has moderately increased their PLIs from 1 to 1.2, 1.6, 1.3 and 1.6, respectively, while decreasing the concentrations and the PLIs of cadmium and lead from 1 to respectively 0.4 and 0.8. For both wheat and corn grains, cadmium and lead had the highest PCFs while chromium and nickel had the lowest PCFs. Concentrations of cadmium, chromium and lead in both crop grains exceeded the EU 2001 standards. The lead HRI for children and adults in wheat or corn and that of cadmium for children in corn exceeded unity, rendering both locally-produced crops unfit for human consumption.

Keywords: Municipal Wastewater, Heavy Metals, Soil Pollution Loading Index (PLI), Plant Concentration Factor (PCF), Health Risk Index (HRI)

1,2- Assistant Professor and MSc Postgraduate of, Soil Science Department, Shahrekord University, Shahrekord
(*- Corresponding Author Email: beige.habib@gmail.com)