نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)
سال بیست و سه / شماره دوم / تابستان ۱۳۹۸

ارزیابی شاخص‌های ریسک اکولوژیکی عناصر روی، مس، کادمیوم، سرب و نیکل در اراضی تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه شده

بهناز آتش‌پز و سالار رضاپور[1*]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۵/۲۱)

چکیده

مطالعه حاضر با هدف ارزیابی شاخص‌های ریسک اکولوژیکی عناصر روی، مس، کادمیوم، سرب و نیکل در اراضی تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه شده در دشت ارومیه (روستای قهرمانلو) انجام شده است. بدین‌منظور شش نقطه (پنج نقطه در اراضی آبیاری شده با فاضلاب و یک نقطه در اراضی تحت آبیاری با آب چاه به‌عنوان شاهد) انتخاب و مورد نمونه‌برداری (افق AP، عمق ۰ -۳۰ سانتی‌متری خاک) قرار گرفتند. نمونه‌های خاک بعد از هوا خشک شدن و از غربال دو میلی‌متری عبور داده شدند و سپس تحت آزمایش‌های مختلف شیمیایی قرار گرفتند و شکل کل عناصر مورد مطالعه شدند. نتایج نشان داد که عملیات آبیاری با فاضلاب تصفیه شده باعث افزایش معنی‌دار شکل کل عناصر فوق در توالی (۲۳/۵ درصد) Cu < (۵۴/۲ درصد) Pb < (۸۱/۵ درصد) Zn < (۲۲۸ درصد) Cd شده است. با این وجود بر اساس استانداردهای ملی و بین‌المللی به‌استثنای کادمیوم سایر عناصر در محدوده‌های قابل قبول قرار داشتند. مقدار شاخص ریسک اکولوژیکی (کمینه = ۱۲۵، بیشینه = ۱۵۲ و میانگین = ۱۴۰) در همه مناطق تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه شده کلاس ریسک زیاد (۲۰۰ ≥ RI ≥۱۰۰) را نشان داد و کادمیوم بیشترین تأثیرگذاری را بر کمیت این شاخص داشت.

واژه‌های کلیدی: فاضلاب تصفیه شده، فلزات سنگین، شاخص‌های ریسک اکولوژیکی، دشت ارومیه

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: S_rezapour2000@yahoo.com

مقدمه

آبیاری با آب فاضلاب در مناطقی با محدودیت منابع آب، یک رویکرد رایج است و در ایران ۷۰ میلیون مترمکعب در سال از آب فاضلاب برای آبیاری اراضی کشاورزی استفاده می‌شود (۱۸). همچنین با توسعه و گسترش کشور، افزایش جمعیت شهری و بالا رفتن استانداردهای زندگی، حجم آب شیرین بیشتری در بخش‌های بازرگانی و صنعتی مصرف می‌شود که پیامد آن تولید مقادیر زیادی از آب فاضلاب است (۱۷). به‌طورکلی در مناطق شهری و اطراف شهرها استفاده از آب فاضلاب برای آبیاری اراضی کشاورزی امری رایج و مرسوم است که از دلایل عمده آن می‌توان به‌وجود مقدار قابل توجه عناصر غذایی در آب فاضلاب، هزینه بالای کودهای شیمیایی و فراوانی و قابل دسترس بودن آب فاضلاب در نزدیک مزارع اشاره کرد (۱ و ۱۹).

فلزات سنگین به عناصری گفته می‌شود که در پوسته زمین در مقادیر کمتر از ۰/۱ درصد یافت می‌شوند. وزن اتمی این عناصر بین ۶۳/۵ تا ۲۰۰/۶ گرم و جرم مخصوص آنها بزرگ‌تر از ۵ گرم در سانتی‌متر مکعب است (۲). این عناصر از منابع و منشاهای مختلفی وارد خاک می شوند که مهم‌ترین آنها فعالیت‌های مدیریتی انسان یا عوامل آنتروپوژنیک است. از جمله این فعالیت‌ها استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی، آفت کش‌ها، سموم و آب فاضلاب شهری در طول سالیان متمادی است که می‌تواند باعث تجمع معنی‌دار این عناصر مخصوصاً مس، روی، کادمیوم، سرب، و نیکل در اراضی کشاورزی شود (۱۳). همچنین این فلزات از نظر زیستی تجزیه‌ناپذیر و به‌شدت در محیط زیست ماندگار هستند (۲۴). از طرفی خاک نیز دارای ظرفیت محدودی برای نگهداری این عناصر است و چنانچه این ظرفیت کامل شود، عناصر فوق (مس، روی، کادمیوم، سرب و نیکل) می‌توانند جذب گیاهان و یا وارد منابع آب‌های طبیعی شوند و درنهایت آلودگی زنجیره خاک– گیاه– حیوان– انسان را در پی داشته باشند (۲۶).

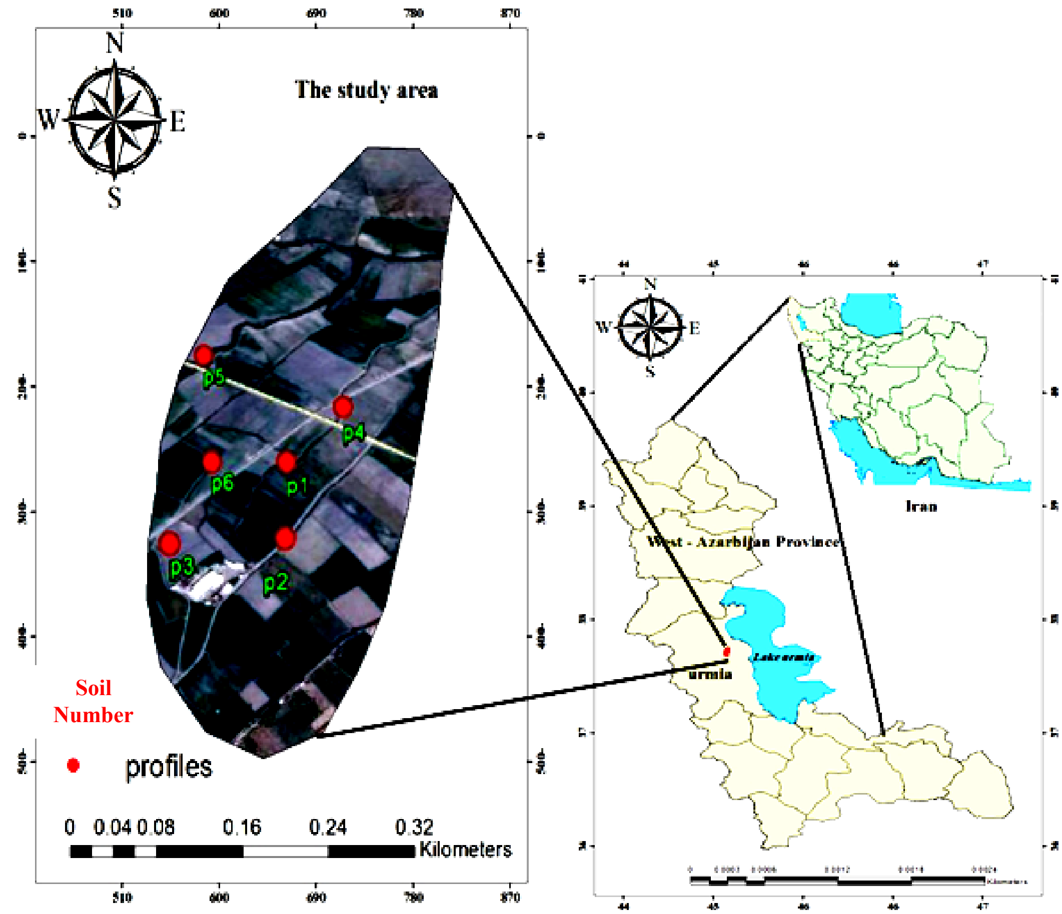
رضاپور و صمدی (۱۹) طی مطالعاتی در اراضی آهکی شمال غرب ایران گزارش کردند که آبیاری طولانی‌مدت با فاضلاب‌های خام شهری باعث افزایش معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) غلظت عناصر روی، مس، سرب و کادمیوم نسبت به اراضی تحت آبیاری با آب چاه شده است. نتایج تحقیقات آکاتا و همکاران (۳) مشخص کرده که استفاده از آب فاضلاب برای آبیاری اراضی کشاورزی منجر به تجمع آلوده کننده عناصر سرب، مس و روی در خاک تحت نفوذ این فاضلاب شده است. کالاورتیز و همکاران (۱۱) نیز با بررسی اثرات آبیاری با فاضلاب تصفیه شده نشان دادند، غلظت فلزات سنگین در خاک به‌خصوص برای سرب، روی، مس و نیکل با دوره آبیاری افزایش یافته است.

در حال حاضر، کشور پهناور ایران همچون سایر کشورهای واقع در کمربند خشک کره زمین دچار کم‌آبی است و پیش‌بینی می‌شود طی نیم قرن آینده از جمله ۶۶ کشوری باشد که از تنش آبی رنج خواهد برد (۴). بنابراین لازم است برای مقابله با این بحران، بهره‌برداری از آب‌های نامتعارف مانند پساب‌ها با برنامه ریزی دقیق و مطالعه منسجم مورد توجه قرار گیرد و اولین مرحله در استفاده از این آب‌ها نیز بررسی اثرات آنها بر روی اکوسیستم مخصوصاً خاک و آب است تا در صورت زیانبار بودن، راهکارهای مقابله برای کم‌خطر کردن آنها مورد توجه قرار گیرد. بدین‌منظور مطالعه حاضر با هدف ارزیابی شاخص‌های ریسک اکولوژیکی عناصر روی، مس، کادمیوم، سرب و نیکل در اراضی تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه شده شهرستان ارومیه انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در منطقه دشت ارومیه واقع در بین ۱۵´ ۴۵° تا ۰۰´ ۴۵° طول و ۴۵´ ۳۷° تا ۳۰´ ۳۷° عرض جغرافیایی روستای قهرمانلو استان آذربایجان غربی انجام شده است (شکل ۱). در این منطقه متوسط بارندگی سالیانه ۳۳۰ میلی‌متر با متوسط درجه حرارت ۱۳ درجه سانتی‌گراد منجر به اقلیم نیمه‌خشک با رژیم رطوبتی خاک زریک و رژیم حرارتی مزیک شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و محل نمونه‌برداری منطقه مورد مطالعه در استان آذربایجان‌غربی

مواد مادری اراضی این ناحیه از نوع رسوبات آبرفتی جوان است و خاک‌های آنها نیز از رده اینسپتی‌سول‌ها است. محصولات زراعی غالب این منطقه گندم، ذرت و آفتابگردان است که آب مورد نیاز آنها عمدتاً به‌وسیله کانال خروجی از تصفیه‌خانه فاضلاب شهر ارومیه تأمین می‌شود و سیستم آبیاری آنها به‌صورت غرقابی با سابقه حدود ۱۰ سال است.

عملیات صحرایی و نمونه‌برداری

در عملیات میدانی شش نقطه برای برداشت نمونه‌های خاک (پنج سایت به‌عنوان اراضی آبیاری شده با فاضلاب و یک سایت به‌عنوان شاهد) در نظر گرفته شد. در مرحله بعد نمونه‌های مرکب خاک از بخش سطحی (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری) اراضی فوق برداشت و به آزمایشگاه منتقل شدند.

تجزیه آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک پس از آماده‌سازی در آزمایشگاه (هوا خشک شدن و عبور از الک دو میلی‌متری) تحت آزمایش‌های شیمیایی معمول خاک شامل تعیین pH، هدایت الکتریکی (EC)، کربن آلی (OC) (۱۵)، کربنات کلسیم معادل (CCE) (۱۶) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) (۵) قرار گرفتند. مقدار کل عناصر روی، مس، کادمیوم، سرب و نیکل به روش هضم در اسید نیتریک غلیظ (۶) عصاره‌گیری شدند و غلظت آنها نیز توسط دستگاه جذب اتمی مدل شیمادزو اندازه‌گیری شد. همچنین کلیه آزمایش‌های خاک در سه تکرارانجام شد و رسم گراف‌ها و

جدول ۱. دامنه تغییرات و کلاس‌های تعریف شده برای فاکتور آلودگی (f_i)، فاکتور آلودگی منفرد (E_i) و شاخص ریسک اکولوژیکی (RI)

فاکتور آلودگی (f_i)			فاکتور آلودگی کل (f_{deg})		
Value	Class	Pollution Level	Value	Class	Pollution Level
$f_i \leq$ ۱	۱	Clean	$f_{deg} <$ ۵	۱	Low pollution
۱< $f_i \leq$۳	۲	Low pollution	۵≤ f_{deg} <۱۰	۲	Moderate pollution
۳ < $f_i \leq$۶	۳	Moderate pollution	۱۰ ≤ f_{deg} < ۲۰	۳	High pollution
۶ < $f_i \leq$۹	۴	Considerable pollution	$f_{deg} \geq$ ۲۰	۴	Very High pollution
$f_i >$ ۹	۵	High pollution			
شاخص ریسک اکولوژیکی منفرد (E_i)			شاخص ریسک اکولوژیکی (RI)		
$E_i \leq$ ۴۰		Low risk	RI≤۵۰		Low potential ecological risk
۴۰< $E_i \leq$ ۸۰		Moderate risk	۵۰< RI≤۱۰۰		Moderate potential ecological risk
۸۰< $E_i \leq$ ۱۶۰		Considerable risk	۱۰۰ < RI ≤ ۲۰۰		Considerable potential ecological risk
۱۶۰ < $E_i \leq$ ۳۲۰		High risk	RI >۲۰۰		High potential ecological risk
$E_i >$ ۳۲۰		Very high risk			

مقایسه‌های آماری به‌ترتیب با استفاده از نرم‌افزار Excel و نسخه ۱۹ SPSS انجام شد.

شاخص ریسک اکولوژیکی

شاخص ریسک اکولوژیکی (RI, Potential ecological risk index) به‌صورت مجموعه‌ای از فاکتورهای ریسک برای فلزات روی، مس، کادمیوم، سرب و نیکل با استفاده از معادله‌های زیر تعیین شد.

$$RI = \sum E_i \qquad (۱)$$

$$E_i = T_i f_i \qquad (۲)$$

$$f_i = C_i / B_i \qquad (۳)$$

$$f_{deg} = \sum f_i \qquad (۴)$$

که E_i شاخص ریسک اکولوژیکی منفرد، T_i فاکتور پاسخ سمیت فلزات، f_i فاکتور آلودگی، C_i غلظت فلزات سنگین در خاک تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه شده، B_i غلظت فلزات سنگین در خاک تحت آبیاری با آب چاه و f_{deg} فاکتور آلودگی کل هستند. بر اساس نظریات هاکانسون و زاو (۸ و ۲۷) مقادیر T_i به‌ترتیب برای سرب، نیکل و مس ۵، کادمیوم ۳۰ و برای روی نیز یک است. دامنه تغییرات و کلاس بندی شاخص‌های RI، f_i، T_i و f_{deg} در جدول (۱) ارائه شده است.

نتایج و بحث

خصوصیات شیمیایی خاک‌ها

مشخصات شیمیایی خاک‌های تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه شده و خاک شاهد (تحت آبیاری با آب چاه) در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد کاربرد فاضلاب شهری تصفیه شده ویژگی‌هایی از خاک نظیر pH، EC، ماده آلی و کربنات کلسیم خاک را در مقایسه با خاک منطقه کنترل افزایش داده است اگرچه بیشتر این تغییرات از لحاظ آماری معنی‌دار نشده است. در مقایسه با اراضی شاهد یک افزایش ۰/۵ تا ۳ درصد در pH خاک‌های تحت آبیاری با فاضلاب مشاهده شد که چنین تغییرات ناچیزی در pH این خاک‌ها به‌علت ظرفیت بافری بالای آنها (همانند سایر خاک‌های مناطق آهکی) چندان دور از انتظار نیست. همچنین EC

جدول ۲. مقایسه میانگین پارامترهای شیمیایی اندازه‌گیری شده در اراضی تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه شده و آب چاه (شاهد)

پارامترها	خاک منطقه ۱ خاک آبیاری شده با فاضلاب	 خاک آبیاری شده با آب چاه	درصد تغییرات
pH	۷/۹۳ ± ۰/۰۱۵	۷/۷۰ ± ۰/۰۵	۲/۹۸۷
EC (dS m^{-1})	۲/۷۳ ± ۰/۲۹۷	۲/۵ ± ۱/۷۵	۹/۲
OM (g kg^{-1})	۲/۸۳ ± ۰/۸۶۷	۲/۵۸ ± ۰/۸۶	۹/۶۹
CCE (g kg^{-1})	۴۲/۲۲ ± ۱/۳۹	۴۰/۷± ۱/۳۶	۳/۷
CEC (cmol$_c$ kg^{-1})	۲۴/۳ ± ۱/۱۲۳	۲۱/۸۲ ± ۲/۳۱	۱۱/۳۶
	خاک منطقه ۲		
pH	۷/۷۴ ± ۰/۰۲۱	۷/۷۰ ± ۰/۰۴۷	۰/۵۲
EC (dS m^{-1})	۳/۶۴ ± ۲/۱۶۴	۲/۵ ± ۱/۷۵	۴۵/۶*
OM (g kg^{-1})	۲/۶۰ ± ۰/۹۱	۲/۵۸ ± ۰/۸۶	۰/۷۷۵
CCE (g kg^{-1})	۴۰/۴۲ ± ۱/۰۴	۴۰/۷± ۱/۳۶	−۰/۷
CEC (cmol$_c$ kg^{-1})	۲۵/۴۵ ± ۰/۷۷	۲۱/۸۲ ± ۲/۳۱	۱۶/۶
	خاک منطقه ۳		
pH	۷/۷۱۱ ± ۰/۰۵	۷/۶ ± ۰/۰۴۷	۱/۴۶
EC (dS m^{-1})	۲/۵۹۳± ۰/۸۸	۲/۴۵ ± ۱/۷۵	۵/۸۴
OM (g kg^{-1})	۲/۷۶ ± ۰/۶۶	۲/۳۵ ± ۰/۸۶	۱۷/۴۵
CCE (g kg^{-1})	۴۲/۷۹± ۱/۵۹	۴۰/۸ ± ۱/۳۶	۴/۸۸
CEC (cmol$_c$ kg^{-1})	۲۳/۵۴ ± ۰/۴۰	۲۷/۶ ± ۲/۳۱	۷/۸۸
	خاک منطقه ۴		
pH	۷/۷۷ ± ۰/۲۱	۷/۶۵ ± ۰/۰۲۱	۱/۵۷
EC (dS m^{-1})	۳/۷۸ ± ۱/۵۸	۲/۴۵ ± ۱/۴۷	۵۴/۳*
OM (g kg^{-1})	۲/۶۰ ± ۰/۰۱۱	۲/۳۵ ± ۰/۰۶۳	۱۰/۶۴
CCE (g kg^{-1})	۳۷/۴ ± ۱/۷۳	۳۰/۷۸ ± ۱/۲۳	۲۱/۵۱
CEC (cmol$_c$ kg^{-1})	۱۸/۱۶ ± ۰/۴	۱۷/۳ ± ۰/۰۹۷	۴/۹۷
	خاک منطقه ۵		
pH	۷/۷ ± ۰/۰۲۱	۷/۶ ± ۰/۳۲	۱/۳۲
EC (dS m^{-1})	۳/۷۸ ± ۱/۵۸	۲/۴۶ ± ۱/۴۲	۵۳/۶*
OM (g kg^{-1})	۲/۶۰ ± ۰/۱۱	۲/۳۷ ± ۰/۰۵	۹/۷
CCE (g kg^{-1})	۳۷/۴ ± ۱/۷۳	۳۰/۳۲ ± ۱/۶	۲۳/۳۵
CEC (cmol$_c$ kg^{-1})	۲۰/۱۳ ± ۰/۸	۱۷/۶۴ ± /۰۴۵	۱۴/۱

* معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است

خاک‌های تحت آبیاری با فاضلاب یک افزایش قابل توجه (۶ تا ۵۴ درصد) نسبت به شاهد نشان دادند که این روند می‌تواند یک تأثیر منفی بر کیفیت خاک داشته باشد. بر اساس نتایج اسمیت و دورن (۲۵) در خاک‌های آهکی و مناطق خشک و نیمه‌خشک، هر گونه افزایش در pH و EC باعث کاهش کیفیت خاک می‌شود. در مقابل آبیاری با فاضلاب از طریق افزایش مواد آلی (۱ تا ۱۷ درصد) و CEC خاک (۵ تا ۱۷ درصد)، اثرات مثبتی بر کیفیت خاک به‌جای گذاشته است. چنین مشاهداتی در مطالعات گذشته نیز گزارش شده است (۲۰ و ۲۱).

فلزات سنگین خاک

آبیاری با فاضلاب باعث افزایش قابل ملاحظه مقدار کل عناصر مس، روی، کادمیوم، سرب و نیکل خاک نسبت به خاک شاهد شده است (جدول ۳) و این افزایش برای این عناصر به‌صورت Cd> Zn> Pb> Ni> Cu بود. این نتایج می‌تواند ناشی از ورود عناصر فوق از طریق فاضلاب و برهم‌کنش فاضلاب و خاک‌های دریافت آن باشد. افزایش معنی‌دار غلظت کل عناصر سنگین پس از آبیاری با فاضلاب در سایر نقاط ایران نیز گزارش شده است (۱۹ و ۲۰). میانگین مس کل از ۱۰ تا ۳۲ درصد در خاک‌های تحت آبیاری با فاضلاب نسبت به شاهد افزایش یافته است با این وجود میانگین این عنصر در تمام خاک‌های مورد مطالعه کمتر از حد قابل قبول آنها بود و در حال حاضر در محدوده خطر آفرین نیست. در مقایسه با شاهد، مقدار روی کل در اراضی تحت آبیاری با فاضلاب در اکثر خاک‌ها به‌طور معنی‌داری به‌صورت خاک منطقه ۲ (۱۵۷ درصد) > خاک منطقه ۵ (۱۲۱ درصد) > خاک منطقه ۳ (۱۱۲ درصد) > خاک منطقه ۴ (۱۰۳ درصد) > خاک منطقه ۱ (۹۹ درصد) افزایش یافته بود. اما با این وجود میانگین عنصر فوق بر اساس منابع مختلف کمتر از حد آستانه قابل قبول بود. در بین عناصر پنج‌گانه این مطالعه عملیات آبیاری با فاضلاب بیشترین افزایش را در کادمیوم ایجاد کرده است به‌طوری‌که در خاک‌های مناطق مختلف یک افزایش دو تا سه برابر در غلظت کادمیوم کل نسبت به اراضی تحت آبیاری با آب چاه اتفاق افتاده بود. از طرف دیگر غلظت کادمیوم در اراضی تحت آبیاری با فاضلاب بیش از دو برابر حد مجاز این عنصر در منابع مختلف بین‌المللی و داخلی است (۹ و ۱۰) که می‌تواند بسیار نگران کننده باشد. این نگرانی می‌تواند بیشتر شود با در نظر گرفتن این حقیقت که کادمیوم در بین عناصر سنگین به‌عنوان متحرک‌ترین عنصر شناخته شد (۱۴). بنابراین کادمیوم خطرناک‌ترین عنصر این مطالعه است که می‌تواند تبعات ناگواری را در چرخه خاک– آب– گیاه– حیوان– انسان ایجاد کند. همچنین افزایش معنی‌دار و نگران کننده کادمیوم پس از آبیاری با فاضلاب در حومه مناطق شهری توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (۷ و ۱۲). پس از حدود ۱۰ سال آبیاری با فاضلاب تصفیه شده میانگین نیکل کل در دامنه ۲۳ تا ۱۳۳ درصد (در مقایسه با شاهد) افزایش یافته است. اگرچه این افزایش نگران کننده است و بایستی راهکارهای مدیریتی مناسب برای مقابله با آن در نظر گرفته شود اما دامنه این عنصر هنوز کمتر از آستانه قابل قبول آن است (۱۰). همانند سایر عناصر این مطالعه سرب کل نیز به‌طور قابل توجه و نگران کننده (در دامنه ۴۵ تا ۶۳ درصد) در اثر عملیات آبیاری با فاضلاب تصفیه شده افزایش یافته است و بیشتر افزایش در خاک‌های منطقه چهار مشاهده شد. با این وجود دامنه تغییرات آن بر اساس منابع داخلی (۹) و خارجی (۱۰) در آستانه قابل قبول بود (جدول ۳). به‌طورکلی آبیاری با فاضلاب تصفیه شده در طی یک دوره حدود ۱۰ ساله در بخشی از اراضی حومه شهر ارومیه باعث افزایش قابل توجه، نگران‌کننده و معنی‌دار (برای بیشتر عناصر) شکل کل عناصر مس، روی، کادمیوم، نیکل و سرب شده است، اگرچه این افزایش برای عناصر فوق در دامنه‌های کاملاً مختلفی اتفاق افتاده است که می‌تواند ناشی از کیفیت و منابع فاضلاب و خصوصیات متفاوت خاک‌های دریافت کننده این فاضلاب باشد (۷ و ۲۱). از طرف دیگر در مقایسه با مطالعات مشابه (۱۹) غلظت عناصر پنج‌گانه مورد تحقیق در فاضلاب تصفیه شده این مطالعه به‌طور معنی‌داری بیشتر است و این رفتار می‌تواند ناشی از این حقیقت

جدول ۳. اثرات آبیاری با فاضلاب تصفیه شده بر غلظت شکل کل عناصر کادمیوم، مس، سرب، روی و نیکل

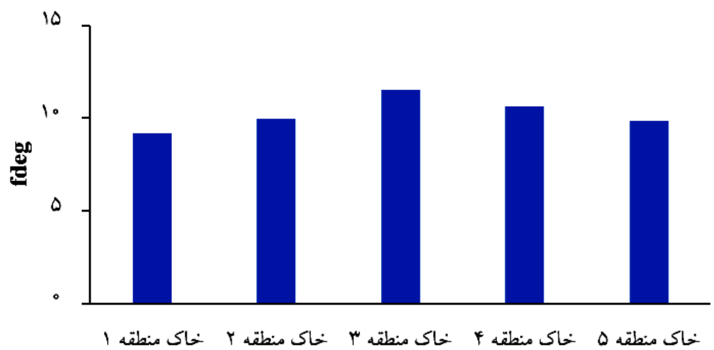
عناصر سنگین (mg kg^{-1})	خاک آبیاری شده با فاضلاب	خاک آبیاری شده با آب چاه	درصد تغییرات	استاندارد داخلی (۹)	استاندارد خارجی (۱۰)
	خاک منطقه ۱				
Total - Cd	۱۰.۶۲ ± ۱/۵۳	۲/۸ ± ۱/۵۲	۲۷۹/۳***	۵	۳
Total – Cu	۵۶/۶۲ ± ۲/۷۱	۴۶/۲ ± ۳/۲	۲۲/۶*	۲۰۰	۱۰۰
Total – Pb	۵۵/۷۱ ± ۵/۹۸	۳۷/۱۸ ± ۱/۴	۴۹/۹۲*	۷۵	–
Total – Zn	۴۰/۱۶ ± ۳/۱۹	۲۰/۲ ± ۱/۷۶	۹۸/۷۷**	۳۶۰	۳۰۰
Total - Ni	۲۵/۱۴ ± ۳/۳۲	۱۸/۵۹ ± ۱/۳۶	۳۵/۲۳*	۱۱۰	۱۱۰
	خاک منطقه ۲				
Total - Cd	۹/۶۳ ± ۱/۷	۲/۸۱ ± ۱/۵۶	۲۴۲/۷***	۵	۳
Total – Cu	۵۵/۶۱ ± ۲/۶	۴۶/۱۸ ± ۳/۱۶	۲۰/۴۴	۲۰۰	۱۰۰
Total – Pb	۵۴/۰۸ ± ۴/۲۵	۳۷/۱۷ ± ۱/۶	۴۵/۶*	۷۵	–
Total – Zn	۵۱/۹۵ ± ۲/۳۵	۲۰/ ۲ ± ۱/۷۶	۱۵۷/۲***	۳۶۰	۳۰۰
Total - Ni	۴۲/۷۳ ± ۲۰/۱	۱۸/۳۱ ± ۱/۹۶	۱۳۳/۴***	۱۱۰	۱۱۰
	خاک منطقه ۳				
Total - Cd	۱۱/۶۸ ± ۰/۹۲	۲/۸۵ ± ۱/۵۶	۳۰۹/۸***	۵	۳
Total – Cu	۵۵/۰ ± ۲/۸	۴۶/۱۷ ± ۳/۱۶	۱۸/۷	۲۰۰	۱۰۰
Total – Pb	۵۶/۳۵ ± ۳/۱۲	۳۷/۱۵ ± ۱/۵	۵۱/۶*	۷۵	–
Total – Zn	۴۲/۸۰۲ ± ۳/۷	۲۰/۲۱ ± ۱/۷۶	۱۱۱/۸***	۳۶۰	۳۰۰
Total - Ni	۳۴/۷۴ ± ۱/۷۹	۱۸/۳۳ ± ۱/۶	۸۹/۵۲**	۱۱۰	۱۱۰
	خاک منطقه ۴				
Total - Cd	۱۱/۶۵ ± ۲/۰۹	۲/۹ ± ۱/۴۵	۳۰۱/۷***	۵	۳
Total – Cu	۵۷/۱۵ ± ۲/۳۲	۴۶/۱۸± ۳/۱۸	۲۳/۷۸*	۲۰۰	۱۰۰
Total – Pb	۶۰/۴۷ ± ۰/۶۶	۳۷/۱۶ ± ۱/۴	۶۲/۷۱*	۷۵	–
Total – Zn	۴۱/۱ ± ۲/۷۹	۲۰/۲۲ ± ۱/۸۸	۱۰۳/۳***	۳۶۰	۳۰۰
Total - Ni	۴۱/۶۹ ± ۳/۶۸	۱۸/۳۸ ± ۲/۴۱	۱۲۶/۸***	۱۱۰	۱۱۰
	خاک منطقه ۵				
Total - Cd	۱۱/۸ ± ۲/۶۵	۲/۹ ± ۱/۴۵	۳۰۶/۹***	۵	۳
Total – Cu	۶۰/۹۲ ± ۱/۸	۴۶/۱۷ ± ۳/۱۵	۳۱/۹۵*	۲۰۰	۱۰۰
Total – Pb	۵۹/۸۷ ± ۰/۶۱	۳۷/۱۶ ± ۱/۴	۶۱/۱*	۷۵	–
Total – Zn	۴۴/۷۱ ± ۴/۳۷	۲۰/۲۱ ± ۱/۸	۱۲۱/۲۲***	۳۶۰	۳۰۰
Total - Ni	۲۲/۶۰± ۵/۸	۱۸/۳۹ ± ۲/۴۲	۲۲/۸۹*	۱۱۰	۱۱۰

*، ** و *** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و ۰/۱ درصد هستند

جدول ۴. تأثیر آبیاری با فاضلاب تصفیه شده بر فاکتور آلودگی (fi)

شماره خاک	Cd	Cu	Pb	Zn	Ni
خاک منطقه ۱	۳/۷۹ (۳)	۱/۱۴ (۲)	۱/۱۲۴ (۲)	۱/۹۸ (۲)	۱/۱۳۷ (۲)
خاک منطقه ۲	۳/۴۳ (۳)	۱/۱۱۳ (۲)	۱/۱۰۶ (۲)	۲/۵۷ (۲)	۱/۷۳ (۲)
خاک منطقه ۳	۴/۰۹ (۳)	۱/۱۰ (۲)	۱/۱۶ (۲)	۲/۱۲ (۲)	۱/۱۸۵ (۲)
خاک منطقه ۴	۴/۰۲ (۳)	۱/۲۴ (۲)	۱/۲۸ (۲)	۱/۵۱(۲)	۲/۲۷ (۲)
خاک منطقه ۵	۴/۰۷ (۳)	۱/۳۲ (۲)	۱/۲۷ (۲)	۱/۶۴ (۲)	۱/۲۳ (۲)
میانگین	۳/۸۸ (۳)	۱/۱۸ (۲)	۱/۱۹ (۲)	۱/۹۶ (۲)	۱/۵۱ (۲)

2: class2: Low pollution, 3: class 3: Moderate pollution



شکل ۲. تأثیر آبیاری با فاضلاب تصفیه شده بر فاکتور آلودگی کل خاک

باشد که فاضلاب تصفیه شده شهر ارومیه که پس از خروج از تصفیه‌خانه از طریق یک کانال روباز به طرف دریاچه ارومیه و مزارع مسیر هدایت می‌شود، به احتمال زیاد در این مسیر مقداری فاضلاب خام نیز از منابع مختلف به آن افزوده می‌شود.

شاخص ریسک اکولوژیکی فلزات سنگین خاک

مقادیر فاکتور آلودگی (fi) برای خاک‌های مورد مطالعه در جدول (۴) نشان داده شد. بر اساس این جدول بیشترین مقدار fi برای عنصر کادمیوم در خاک منطقه ۳، مس در خاک منطقه ۵، سرب در خاک منطقه ۴، روی در خاک منطقه ۲ و نیکل در خاک منطقه ۴ مشاهده شد. همچنین میانگین فاکتور آلودگی عناصر پنج‌گانه به‌صورت توالی Cd> Zn> Ni> Pb> Cu مشاهده شد. عنصر کادمیوم در خاک‌های مطالعه شده دارای کلاس آلودگی متوسط (کلاس ۴) بوده و وضعیت مابقی عناصر در سطح آلودگی کم (کلاس ۲) گزارش شدند که این امر ناشی از مصرف یک دهه آب فاضلاب حاوی این عناصر برای آبیاری اراضی کشاورزی است.

مقادیر فاکتور آلودگی کل (f_{deg}) برای عناصر مورد مطالعه (کادمیوم، مس، سرب، روی و نیکل) در خاک‌های تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه شده محاسبه شد (شکل ۲). بر این اساس بیشترین و کمترین میزان فاکتور f_{deg} به‌ترتیب در خاک‌های مناطق ۳ و ۱ مشاهده شد و توزیع آن نیز به‌صورت خاک منطقه ۳> خاک منطقه ۴> خاک منطقه ۲> خاک منطقه ۵> خاک منطقه ۱ بود.

مقادیر شاخص ریسک اکولوژیکی منفرد (E_i) برای عناصر پنج‌گانه مورد مطالعه در دامنه ۱۰۳ تا ۱۲۳ (Cd)، ۵/۵ تا ۶/۶

جدول ۵. تأثیر آبیاری با فاضلاب تصفیه شده بر شاخص ریسک اکولوژیکی منفرد و فاکتور آلودگی کل فلزات سنگین خاک

شماره منطقه نمونه‌برداری	فاکتور آلودگی کل (f_{deg})	شاخص ریسک اکولوژیکی منفرد (E_i)				
		Cd	Cu	Pb	Zn	Ni
خاک منطقه ۱	۹/۱۸۵ (۲)	۱۱۳/۷۹ (b)	۵/۷ (a)	۵/۶۲ (a)	۱/۹۸۸ (a)	۵/۷ (a)
خاک منطقه ۲	۹/۹۵۲ (۲)	۱۰۲/۹ (b)	۵/۵۶۵ (a)	۵/۵۳ (a)	۲/۵۷۲ (a)	۸/۶۵۵ (a)
خاک منطقه ۳	۱۱/۵۴ (۳)	۱۲۳ (b)	۵/۵۰۵ (a)	۱۵/۱۷ (a)	۲/۱۲ (a)	۵/۹۲۵ (a)
خاک منطقه ۴	۱۰/۶۴ (۳)	۱۱۹/۵۸ (b)	۶/۲ (a)	۸/۱۵ (a)	۱/۵۱ (a)	۱۱/۳۵ (a)
خاک منطقه ۵	۹/۸۷۱ (۲)	۱۲۲/۱ (b)	۶/۶ (a)	۸/۰۵۵ (a)	۱/۶۴ (a)	۶/۱۵ (a)

2: class 2: Moderate pollution, 3: class 3: High pollution, a: Low risk, b: Considerable risk

شکل ۳. شاخص ریسک اکولوژیکی (RI) در خاک‌های تحت نفوذ فاضلاب

(Cu)، ۵/۵ تا ۲/۱۵ (Pb)، ۱/۵ تا ۲/۶ (Zn) و ۵/۷ تا ۱۱/۴ (Ni) قرار داشتند (جدول ۵) که بیانگر کلاس آلایندگی قابل ملاحظه ($80 \leq E_i \leq 160$) بـرای عنصـر کـادمیوم و کـلاس آلـوگی کـم ($E_i \leq 40$) برای مابقی عناصر است.

مقـادیر شـاخص ریسـک اکولـوژیکی (کمینـه = ۱۲۵، بیشینه = ۱۵۲ و میانگین = ۱۴۰) در همه مناطق تحـت آبیـاری با فاضلاب تصفیه شده کلاس ریسک زیـاد ($100 \leq RI \leq 200$) را نشان دادند (شکل ۳). در بین عناصر مورد مطالعـه، کـادمیوم بیشترین تأثیرگذاری را بر کمیت شـاخص ریسـک اکولـوژیکی داشت و بعد از آن بـه‌ترتیب سـرب، نیکـل، مـس و روی قـرار داشتند. به‌طور مشابه‌ای رضـاپور و همکـاران (۲۳) بـا محاسـبه شاخص ریسک اکولوژیکی اراضی بـا بـیش از ۵۰ سـال سـابقه عملیات زراعی در منطقه پیرانشهر، ترتیب تأثیر پذیری عناصـر مختلـف بـر ایـن شـاخص را به‌صـورت Cd> Pb> Cu> Zn گزارش کردند. همچنین همانند مقدار فاکتور آلودگی کل خاک، بیشترین مقدار این شاخص در خاک‌های منطقه ۳ مشاهده شـد (شکل ۳) جائی که بیشترین مقدار رس و مـواد آلـی نیـز در آن وجود داشت (جدول ۲) که از فاکتورهـای اصـلی در جـذب و نگهداری عناصر سنگین خاک هستند. رضاپور و همکـاران (۲۰ و ۲۳) و رضاپور و موذنی (۲۲) طی مطالعات مختلف در شمال غرب ایران گزارش کردند که توزیع اندازه ذرات، آهـک، CEC، مواد آلی، کانی‌های رسی، لنـدفرم و موقعیـت لندسـکیپ نقـش بسیار چشـمگیر در توزیـع، رفتـار، پـراکنش و تحـرک عناصـر سنگین خاک دارند.

نتیجه‌گیری

آبیاری با فاضـلاب در خاک‌هـای منطقـه تحـت مطالعـه باعـث افزایش معنی‌دار شکل کل اکثر عناصر شده اسـت، بـه اسـتثنای

کادمیوم غلظت سایر عناصر بر اساس منابع داخلی و خارجی در آستانه قابل قبول قرار داشت. همچنین با توجه به بالا بودن سطح آلودگی کادمیوم از لحاظ شاخص ریسک اکولوژیکی عنصر خطرناکی برای زنجیره خاک- آب- گیاه- انسان در این منطقه است که نیاز به برنامه مدیریتی به شرح زیر دارد:

۱. در صورت امکان از این فاضلاب برای مصارف غیر کشاورزی مانند آبیاری فضای سبز حومه شهر استفاده شود.
۲. استفاده از تکنیک‌های دقیق‌تر برای تصفیه فاضلاب‌های شهر ارومیه، طوری که قادر به حذف عناصر سنگین و املاح محلول موجود در فاضلاب باشند.
۳. ممانعت از ورود فاضلاب‌های خام به کانال انتقالی فاضلاب تصفیه شده در مسیر خروجی از تصفیه‌خانه تا مزارع زراعی این منطقه.
۴. پایش دوره‌ای غلظت عناصر سنگین موجود در فاضلاب، خاک و گیاهان تحت آبیاری با این فاضلاب.
۵. اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین این مطالعه در قسمت‌های مصرفی محصولات زراعی این منطقه.
۶. محاسبه فاکتور غلظت و فاکتور انتقال عناصر فوق از خاک به بخش‌های مختلف گیاهان (ریشه، ساقه و دانه) زراعی غالب این منطقه.

منابع مورد استفاده

1. Abedi-Koupai, J., B. Mostafazadeh-Farid, M. Afyuni and M. R. Bagheri. 2006. Effect of treated wastewater on soil chemical and physical properties in an arid region. *Plant, Soil and Environmental* 52(8): 335-344.
2. Adriano, D. C. 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risk of Metal. 2nd Springer-Verlag. New York, Berlin, Heidelberg, 223-232.
3. Akoto, O., D. Addo, E. Baidoo, E. A. Agyapong, J. Apau and B. Fei-Baffoe. 2015. Heavy metal accumulation in untreated wastewater-irrigated soil and lettuce (*Lactuca sativa*). *Environmental Earth Science* 74: 6193–6198.
4. Banaei, M. H., A. S. Momeni, M. Bai Bourdi and M. C. Malkuti. 2004. Soils of Iran, Agricultural Research and Training Organization, Soil and Water Research Institute, Senate Publications, Tehran, Iran. (In Farsi).
5. Chapman, H. D. 1965. Cation exchange capacity. pp: 891-900. *In:* Black, C. A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part2. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
6. Dahnke, W. C and G. V. Journal. 1990. In Westerman RL (ed) soil Testing and plant Analysis: American Society of Agronomy Inc. Madison, Wisconsin, USA.
7. Farahat, E. and W. Linderholm. 2015. The effect of long-term wastewater irrigation on accumulation and transfer of heavy metals in Cupressus sempervirens leaves and adjacent soils. *Science of Total Environment* 513: 1-7.
8. Hakanson, L. 1980. Ecological risk index for aquatic pollution control. *A Sedimentological Approach Water Resources* 14: 975-1001.
9. Human Environment Deputy. 2013. Soil Quality Standards and Guidelines, Tehran, Iran. (In Farsi).
10. Kabata-Pendias A. 2010. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Raton.
11. Kalavrouziotis, I. A., S. Rezapour and P. H.Koukoulakis. 2012. Wastewater status in Greece and Iran. *Fresenius Environmental Bulletin* 22: 11-21.
12. 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.
13. Kelepertizis, E. 2014. Accumulation of heavy metals in agricultural soils of Mediterrane. Insights from Argolida basin, peloponn ese, Greece. *Geoderma* 221: 82-90.
14. Mc Bride, M. B., B. K. Richards, T. Steenhuis, J. J. Russo and S. Save. 1997. Mobility and solubility of toxic metals and nutrients in soil fifteen years after sludge application. *Soil Science* 7: 487-500.
15. Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1996. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. Methods of Soil Analysis. Part, 3(3), 961-1010.
16. Nelson, R. E. 1982. Carbonate and gypsum. pp: 181-199. *In:* Page, P. L. (Ed), Methods of Soil Analysis, Part 2. American Society of Agronomy, Madison.
17. Qadir, M., B. R. Sharma, A. Bruggeman, R. Choukr-Allah and F. Karajeh. 2007. Nonconventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries. *Agricultural Water Management* 87: 2-22.
18. Radcliffe, J. C. 2004. Water recycling in Australia. Australia Academic of Technology Science and Engineer,

Parkville.
19. Rezapour, S. and A. Samadi. 2011. Soil quality response to long-term wastewater irrigation in Inceptisols from a semi-arid environment. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 91(3): 269-281.
20. Rezapour, S., A. Samadi and H. Khodaverdiloo. 2012. An Investigation of the soil property changes and Heavy metal accumulation in relation to long-term wastewater irrigation in the semi-arid Region of Iran. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* 20: 841-856.
21. Rezapour, S., P. Kouhinezhad, P. Samadi and M. Rezapour. 2015. Level, pattern, and risk assessment of the selected soil trace metals in the calcareous-cultivated Vertisols. *Chemical Ecology* 8: 692-706.
22. Rezapour, S. and H. Moazzeni. 2016. Assessment of the selected trace metals in relation to long-term agricultural practices and landscape properties. *International Journal of Environmental Science and Technology* 3: 2939-2950.
23. Rezapour S., P. Kouhinezhad and A. Samadi. 2017. The potential ecological risk of soil trace metals following over five decades of agronomical practices in a semi-arid environment. *Chemistry and Ecology* 68-78.
24. Sharma, R. K., M. Agrawal and F. Marshall. 2007. Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India. *Ecotooxicology and Environmental Safety* 66(2): 258-266.
25. Smith, J. L. and J. W. Doran. 1996. Measurements and Use of pH and Electrical Conductivity for Soil Quality Analysis. In Methods for Assessing Soil Quality. SSSA special publication 49 (pp. 169-185). Soil Science Society of America Madison.
26. Xu, J., L. Wu, A. C. Chang and Y. Zhang. 2010. Impact of long-term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils. A preliminary assessment. *Journal of Hazardous Materials* 183: 780-786.
27. Zhao, Q., Q. Xu and K. Yang. 2005. Application of potential ecological risk index in soil pollution of typical polluting industries. *Journal of East China Normal University* (*Natural Science*) 1: 110-115.

Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)
Vol. 23, No. 2, Summer 2019, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Evaluation of the Ecological Risk Indicators of Cd, Cu, Pb, Zn and Ni in the Irrigated Areas with the Treated Wastewater

B. Atashpaz and S. Rezapour[1*]

(Received: February 7-2018 ; Accepted: August 12-2018)

Abstract

The present study was conducted to evaluate the ecological risk indices of Zn, Cu, Cd, Pb and Ni in the soils from Urmia region (Ghahramanloo village), as irrigated with treated wastewater. Accordingly, six different soil sites (five soil sites under wastewater irrigation and one soil site under well water irrigation as the control) were selected and sampled (AP horizon, 0-30 cm depth). Soil samples were air dried, passed through a 2-mm sieve, and analysed to determine the chemical properties and the studied heavy metals. The results showed that irrigation with the treated wastewater significantly increased the total elements in the order of Cd (228%)> Zn (118.5%)> Ni (81.5%)> Pb (54.2%)> Cu (23.5%). Nevertheless, with the exception of cadmium, other elements were within the admissible range based on the national and international standards. Ecological risk index (min = 125, max = 152, mean = 140) showed a considerable risk in all studied soils and Cd could be regarded as the major metal affecting the index yield.

Keywords: Treated waste water, Heavy metals, Ecological risk indexes, Urmia plain

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
*: Corresponding Author, Email: S-rezapour2000@yahoo.com