نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد 32، شماره 3، مرداد – شهریور 1397، ص. 585-573

Journal of Water and Soil
Vol. 32, No. 3, Jul.-Agu. 2018, p. 573-585

اثرات آبیاری با فاضلاب تصفیه شده برغلظت، توزیع و آلودگی بعضی عناصر سنگین خاک

بهناز آتش پز[1]- سالار رضاپور[2*]- نادر قائمیان[3]

تاریخ دریافت: 1396/10/27
تاریخ پذیرش: 1397/03/09

چکیده

در طی چند دهه گذشته مطالعات قابل توجه‌ای در ارتباط با تأثیر آبیاری با فاضلاب خام بر خصوصیات خاک انجام شده است اما تحقیقات چندانی برای اثرات فاضلاب تصفیه شده صورت نگرفته است. بر این اساس به منظور بررسی اثرات آبیاری با فاضلاب خروجی از تصفیه‌خانه ارومیه بر غلظت، توزیع و آلودگی بعضی عناصر سنگین خاک، تعداد شش نقطه (پنج نقطه در اراضی آبیاری شده با فاضلاب و یک نقطه در اراضی تحت آبیاری با آب چاه به عنوان شاهد) در منطقه ارومیه تعیین و در محدوده عمق ریشه گیاهان زراعی این منطقه (افق AP، عمق 0-30 سانتی‌متری) نمونه‌برداری صورت گرفت. نتایج نشان داد که عملیات آبیاری با فاضلاب باعث افزایش قابل توجه شکل قابل استخراج توسط DTPA عناصر فوق به صورت توالی Ni (78.9-141.8 %) > Cd (54.4-125 %) > Zn (35.7-73.3 %) > Cu (13-87 %) > Pb (6-32.3 %) خاک شده است. با این وجود به استثنای کادمیم شکل قابل استفاده سایر عناصر در محدوده‌های مجاز قرار گرفتند. در مقایسه با شاهد، در اکثر خاک‌های مطالعه شده شکل کل عناصر فوق نیز (به استثنای مس) به طور معنی‌داری افزایش یافته بود و بیشترین افزایش (200 تا 300 درصد) و کمترین افزایش (10 تا 32 درصد) به ترتیب مربوط به کادمیم و مس بود. همچنین نتایج شاخص‌های آلایندگی AP، PI، PIN، PLI نشان داد که اکثر خاک‌های مورد مطالعه در دامنه آلودگی کم تا آلودگی بالا قرار داشتند و کادمیم بیشترین نقش را در افزایش کلاس شاخص‌های فوق داشت.

واژه‌های کلیدی: دشت ارومیه، شاخص آلایندگی، شکل DTPA عناصر، شکل کل عناصر

مقدمه

در طی چند دهه اخیر به علت تغییرات اقلیمی و کاهش منابع آب، بازیابی و استفاده از فاضلاب‌های شهری مخصوصا در کشورهای واقع در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک رو به افزایش نهاده است. اما از آنجایی که پساب جز منابع غیرمتعارف آب محسوب می‌شود، کاربرد آن در کشاورزی نیازمند مدیریتی خاص است که ضمن بهره‌گیری مطلوب از آن، مخاطرات زیست محیطی و بهداشتی را در خاک، گیاه و منابع آب سطحی و زیرزمینی به همراه نداشته باشد (29). از طرف دیگر، فاضلاب‌ها اغلب دارای مقادیر قابل توجهی فلزات سنگین و سمی می‌باشند (28) که نوع و مقدار آن‌ها از مکانی به مکان دیگر و حتی در یک مکان خاص، در طول زمان متفاوت است (19). رضاپور و صمدی (22) طی مطالعاتی در اراضی آهکی شمال غرب ایران گزارش کردند که آبیاری طولانی مدت با فاضلاب‌های خام شهری باعث افزایش معنی‌دار ($p<0.05$) غلظت عناصر روی، مس، سرب و کادمیم نسبت به اراضی تحت آبیاری با آب چاه شده است. به طور کلی منابع مهم فلزات سنگین فاضلاب‌ها، سیالات خروجی واحدهای تولیدی، صنعتی و تأسیسات حومه شهرها هستند. این فلزات از نظر زیستی تجزیه‌ناپذیر بوده و به شدت در محیط‌زیست ماندگار می‌باشند (26). همچنین خاک نیز دارای ظرفیت محدودی برای جذب و نگهداری این عناصر است و چنانچه غلظت آن‌ها از دامنه‌های مجاز تعیین شده بیشتر شوند می‌توانند سبب آلودگی چرخه آب، خاک، گیاه و انسان شوند. عابدی و همکاران (1) در بررسی اثرات آبیاری با فاضلاب تصفیه شده بر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک در یک منطقه خشک دریافتند که سیستم‌های آبیاری تأثیری بر تجمع فلزات سنگین در خاک نداشته، اما کاربرد فاضلاب باعث، تجمع معنی‌دار سرب، منگنز، نیکل و کبالت در مقایسه با تیمار آب زیرزمینی شده است. همچنین کلی و همکاران (11) با بررسی اثر آبیاری با فاضلاب تصفیه شده نشان دادند، غلظت فلزات سنگین در خاک به خصوص برای سرب و کادمیم با دوره آبیاری افزایش یافته است.

در ایران نیز آبیاری با فاضلاب در اراضی حومه شهرها سابقه نسبتا طولانی دارد و این رویکرد عمدتا به علت دسترسی آسان به

1 و 2- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه
(*- نویسنده مسئول: Email: S_Rezapour2000@yahoo.com)
3- کارمند سابق مؤسسه تحقیقات خاک و آب ارومیه
DOI: 10.22067/jsw.v32i3.69794

فاضلاب در حاشیه مزارع و غلظت قابل توجه عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان در فاضلاب می‌باشد. در شهرستان ارومیه نیز طی چند سال گذشته بخش زیادی از فاضلاب این شهر از طریق مجاری زیرزمینی به تصفیه‌خانه این شهر منتقل و پس از مراحل پاک‌سازی کلی از طریق کانال روباز به طرف دریاچه ارومیه هدایت می‌شود و اراضی زراعی این مسیر نیز تحت آبیاری این فاضلاب بازیافتی قرار می‌گیرند (31). چنین رویکردی برای مدت 10 سال است که انجام می‌شود اما تحقیقی در ارتباط با اثرات این نوع آبیاری بر خواص خاک‌های این منطقه انجام نشده است لذا مطالعه حاضر در جهت بررسی تأثیر آبیاری با فاضلاب‌های تصفیه شده شهرستان ارومیه بر غلظت، توزیع و آلودگی عناصر روی، مس، کادمیم، سرب و نیکل انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در منطقه دشت ارومیه واقع در بین 45 درجه و 15 دقیقه تا 45 درجه و صفر دقیقه طول و 37 درجه و 45 دقیقه تا 37 درجه و 30 دقیقه عرض جغرافیایی روستای قهرمانلو استان آذربایجان‌غربی انجام شده است. در این منطقه متوسط بارندگی سالیانه 330 میلی‌متر با متوسط درجه حرارت 13 درجه سلسیوس منجر به اقلیم نیمه‌خشک با رژیم رطوبتی خاک زریک و رژیم حرارتی مزیک شده است. مواد مادری اراضی این ناحیه از نوع رسوبات آبرفتی جوان است و خاک‌های آن‌ها نیز از رده اینسپتی‌سول‌ها می‌باشد. محصولات زراعی این منطقه گندم، ذرت و آفتاب‌گردان می‌باشد که آب مورد نیاز آن‌ها عمدتا به وسیله کانال خروجی از تصفیه‌خانه فاضلاب شهر ارومیه تأمین می‌شود و سیستم آبیاری آن‌ها نیز به صورت غرقابی با سابقه حدود 10 سال است.

عملیات صحرایی و نمونه‌برداری

در عملیات میدانی شش نقطه جهت برداشت نمونه‌های خاک (پنج نقطه در اراضی آبیاری شده با فاضلاب و یک نقطه در اراضی تحت آبیاری با آب چاه به عنوان شاهد) درنظر گرفته شد. در مرحله بعد نمونه‌های خاک از قسمت‌های تعیین شده جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شدند. همچنین در سه مقطع زمانی در طول فصل زراعی (قبل کاشت یا مرحله آماده‌سازی زمین، مرحله رشد رویشی و مرحله قبل از رسیدن محصول) از آب فاضلاب تصفیه شده نمونه-برداری انجام شد.

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، قابلیت هدایت الکتریکی (EC[1])، کربن آلی (OC[2]) (16)، کربنات کلسیم معادل (CCE[3]) (17) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC[4]) (3) قرار گرفتند. شکل‌های کل و قابل استفاده عناصر روی، مس، کادمیم، سرب و نیکل به ترتیب به روش هضم در اسید نیتریک غلیظ (5) و DTPA (دی‌اتیلن تری‌آمین پنتا استیک اسید) (12) عصاره‌گیری شدند و غلظت آن‌ها نیز توسط دستگاه جذب اتمی مدل شیمادزو اندازه‌گیری شد. همچنین کلیه آزمایش‌های مربوط به خاک و آب در سه تکرار انجام شدند و سپس با استفاده از نرم‌افزار Excel داده‌ها دسته‌بندی، جداول و نمودارهای هر کدام ترسیم و با کمک نسخه 19 نرم‌افزار SPSS روابط بین متغییرها بررسی گردید.

شاخص‌های آلودگی خاک

برای بررسی تأثیر آبیاری بر دامنه آلودگی عناصر سنگین بعضی شاخص‌های آلایندگی مربوط به آن‌ها به شرح زیر محاسبه شد.

درصد دسترسی (Ap[5]) فلزات سنگین با استفاده از فرمول زیر:

$$Ap = \left(\frac{Cia}{Cit}\right) \times 100$$

که Cia و Cit به ترتیب غلظت شکل قابل استفاده (DTPA) و شکل کل فلزات سنگین در نمونه iام می‌باشد. از این شاخص برای مقایسه تحرک و سمیت فلزات سنگین در خاک استفاده می‌شود (20).

شاخص آلایندگی منفرد عناصر (PI[6]): این شاخص با استفاده از فرمول $PI = \frac{C_s}{C_b}$ برای فلزات سنگین این مطالعه محاسبه شد که در این فرمول C_s غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده و C_b غلظت عناصر در شاهد است (2).

شاخص آلودگی ترکیبی (PIN[7]): شاخص فوق برای عناصر کادمیم، مس، سرب، روی و نیکل با استفاده از معادله زیر تعیین شد (4).

$$PIN = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} PI_i\right)^2 + [max(PI_i)^2]}{2}}$$

که PI شاخص آلایندگی منفرد و n تعداد فلزات سنگین مطالعه شده است.

1- Electrical of conductivity
2- Organic carbon
3- Calcium carbonate equivalent
4- Cation exchange capacity
5- Availability fraction percentage
6- Single-factor pollution index
7- Nemerow pollution index

جدول 1- کلاس‌های تعریف شده برای شاخص‌های PI، PIN و PLI

Table 1- Classes defined for PI, PIN and PLI indicators

PI			PLI			PIN		
Value مقدار	Class کلاس	Pollution Level سطح آلودگی	Value مقدار	Class کلاس	Pollution Level سطح آلودگی	Value مقدار	Class کلاس	Pollution Level سطح آلودگی
PI≤1	1	Clean (بدون آلودگی)	PLI≤0.7	1	Clean (بدون آلودگی)	PIN≤0.7	1	Clean (بدون آلودگی)
1<PI≤2	2	Low Pollution (آلودگی کم)	1≤PLI≤2	2	Low Pollution (آلودگی کم)	0.7≤PIN≤1	2	Low Pollution (آلودگی کم)
2<PI≤3	3	Moderate Pollution (آلودگی متوسط)	2<PLI≤3	3	Moderate Pollution (آلودگی متوسط)	1<PIN≤2	3	Slight Pollution (آلودگی نسبتا کم)
PI>3	4	High Pollution (آلودگی زیاد)	PLI>3	4	High Pollution (آلودگی زیاد)	2<PIN≤3	4	Moderate Pollution (آلودگی متوسط)
-	-	-	-	-	-	PIN>3	5	High Pollution (آلودگی زیاد)

شاخص بار آلایندگی (PLI[1]): این شاخص نیز بر اساس فرمول $PLI = \sqrt[n]{PI_1 \times PI_2 \times \dots \times PI_n}$ برای فلزات سنگین این مطالعه محاسبه گردید (33).

با توجه به دامنه تغییرات شاخص آلایندگی منفرد عناصر (PI)، شاخص آلودگی ترکیبی (PIN) و شاخص بار آلودگی (PLI) یک سری کلاس بندی‌هایی برای توصیف شاخص‌های ذکر شده که به شرح جدول 1 ارائه شده است.

نتایج و بحث

کیفیت فاضلاب تصفیه‌شده

مشخصه‌های اندازه‌گیری شده در فاضلاب شهری به همراه استانداردهای بین‌المللی (7، 30 و 31) و داخلی (9) جهت بررسی کیفیت آب آبیاری در جدول 2 ارائه شده است. همانطوریکه مشاهده می‌شود میانگین pH آب فاضلاب مورد مطالعه در دامنه بهینه و قابل قبول قرار دارد. اما میانگین EC بیش از دو برابر استانداردهای داخلی و جهانی است که می‌تواند باعث افزایش غلظت نمک و فشار اسمزی و کاهش عملکرد گیاهان زراعی اراضی تحت آبیاری با این فاضلاب گردد.

در بین پنج عنصر مورد مطالعه نیز میانگین غلظت سرب، روی و نیکل فاضلاب کمتر از دامنه قابل قبول داخلی و بین‌المللی آنها بود اما میانگین غلظت مس و کادمیم چندین برابر بزرگتر از استانداردهای داخلی و سازمان‌های بین‌المللی بود که می‌تواند باعث تجمع آلوده کننده این عناصر در خاک شود. در حومه شهرستان ارومیه مراکز خدماتی زیادی (مانند مراکز خدمات موتوری، رنگرزی، آبکاری فلزات) فعالیت می‌کنند که فاضلاب آن‌ها احتمالا یکی از دلایل اصلی تولید و ایجاد عناصر فوق می‌باشند. اگرچه مواد شیمیایی مختلفی که در منازل مسکونی و تأسیسات شهری مصرف می‌شوند و به فاضلاب-های خروجی این شهر اضافه می‌شوند نیز تأثیر قابل توجهی دارند.

خصوصیات شیمیایی خاک‌ها

عملیات آبیاری با فاضلاب یک رویکرد افزایشی در کلیه ویژگی-های شیمیایی اندازه‌گیری شده این تحقیق ایجاد کرده است (جدول 3) اگرچه اکثر این تغییرات از لحاظ آماری معنی‌دار نشده است. در مقایسه با اراضی شاهد یک افزایش 0/5 تا سه درصد در pH خاک-های تحت آبیاری با فاضلاب مشاهده شد که چنین تغییرات ناچیزی در pH این خاک‌ها به علت ظرفیت بافری بالای آن‌ها (کربنات‌کلسیم معادل در دامنه 37 تا 42 درصد) چندان دور از انتظار نیست. همچنین EC خاک‌های تحت آبیاری با فاضلاب نیز یک افزایش قابل توجه (شش تا 54 درصد) نسبت به شاهد نشان دادند که این روند می‌تواند یک تأثیر منفی بر کیفیت خاک داشته باشد. براساس نتایج اسمیت و دورن (27) 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 (یک تا 17 درصد) و CEC خاک (پنج تا 17 درصد)، اثرات مثبتی بر کیفیت خاک بجای گذاشته است. چنین مشاهداتی در مطالعات گذشته نیز گزارش شده است (23 و 24).

1- Pollution index

جدول 2- مقایسه ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در فاضلاب شهری تصفیه شده با استانداردهای بین‌المللی (7، 30 و 31) و داخلی (9)

Table 2- Comparison of measured features in refined urban wastewater with international (7, 30, 31) and domestic standards (9)

ویژگی‌ها Features	فاضلاب شهری تصفیه‌شده Urban Treated wastewater		WHO سازمان بهداشت جهانی	EPA سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا	IRNDOE سازمان حفاظت از محیط‌زیست ایران	FAO سازمان خوار و بار جهانی
	دامنه Range	میانگین ± انحراف معیار Mean ± SD				
pH	7.09 - 7.57	7.24 ± 0.29	6.5 – 8.5	6.5 – 8.4	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5
EC (dS m^{-1})	1.32 - 1.60	1.33 ± 0.28	0.7	0.7	0.7	0.7
Zn (mg L^{-1})	0.77 – 0.958	0.87 ± 0.06	2	1	2	2
Cu (mg L^{-1})	0.515 – 0.73	0.59 ± 0.07	0.2	0.2	0.2	0.2
Cd (mg L^{-1})	0.106 – 0.19	0.14 ± 0.03	0.01	0.01	0.05	0.01
Pb (mg L^{-1})	0.47 – 0.965	0.77 ± 0.15	5	5	1	5
Ni (mg L^{-1})	0.04 – 0.144	0.095 ± 0.04	0.2	0.2	2	0.2

جدول 3- مقایسه ویژگی‌های شیمیایی اندازه‌گیری شده در اراضی تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه شده و آب چاه

Table 3- Comparison of chemical features measured in irrigated lands with treated wastewater and well water

ویژگی‌ها Features	خاک منطقه یک (پروفیل یک) Soil area 1 (profile 1)		درصد تغییرات Percent change (%)
	خاک آبیاری شده با فاضلاب Irrigated soil with sewage	خاک آبیاری شده با آب چاه Irrigated soil with well water	
pH	7.93 ± 0.015	7.70 ± 0.05	2.99
EC (dS m^{-1})	2.73 ± 0.297	2.50 ± 1.75	9.20
OM (%)	2.83 ± 0.867	2.58 ± 0.86	9.69
CCE (g kg^{-1})	42.2 ± 1.39	40.7 ± 1.36	3.70
CEC (Cmol kg^{-1})	24.3 ± 1.12	21.8 ± 2.31	11.5
	خاک منطقه دو (پروفیل دو) Soil area 2 (profile 2)		
pH	7.74 ± 0.021	7.70 ± 0.047	0.52
EC (dS m^{-1})	3.64 ± 2.16	2.50 ± 1.75	45.6*
OM (%)	2.60 ± 0.91	2.58 ± 0.86	0.775
CCE (g kg^{-1})	40.4 ± 1.04	40.7 ± 1.36	-0.700
CEC (Cmol kg^{-1})	25.45 ± 0.77	21.8 ± 2.31	16.6
	خاک منطقه سه(پروفیل سه) Soil area 3 (profile 3)		
pH	7.71 ± 0.05	7.60 ± 0.047	1.46
EC (dS m^{-1})	2.59 ± 0.88	2.45 ± 1.75	5.84
OM (%)	2.76 ± 0.66	2.35 ± 0.86	17.4
CCE (g kg^{-1})	42.8 ± 1.59	40.8 ± 1.36	4.88
CEC (Cmol kg^{-1})	23.5 ± 0.40	.8 ± 2.31٦2	7.90
	خاک منطقه چهار (پروفیل چهار) Soil area 4 (profile 4)		
pH	7.77 ± 0.21	7.65 ± 0.021	1.57
EC (dS m^{-1})	3.78 ± 1.58	2.45 ± 1.47	54.3*
OM (%)	2.60 ± 0.011	2.35 ± 0.063	10.6
CCE (g kg^{-1})	37.4 ± 1.73	30.8 ± 1.23	21.5
CEC (Cmol kg^{-1})	18.16 ± 0.40	17.3 ± 0.097	4.97
	خاک منطقه پنجم (پروفیل پنجم) Soil area 5 (profile 5)		
pH	7.70 ± 0.021	7.60 ± 0.32	1.32
EC (dS m^{-1})	3.78 ± 1.58	2.46 ± 1.42	53.6*
OM (%)	2.60 ± 0.11	2.24 ± 0.05	9.70
CCE (g kg^{-1})	37.4 ± 1.73	30.3 ± 1.60	23.4
CEC (Cmol kg^{-1})	20.13 ± 0.80	17.6 ± 0.045	14.1

* معنی‌دار در سطح احتمال 5 درصد می‌باشد

* Significant at a probability level of 5%

فلزات سنگین خاک

شکل قابل استخراج با (DTPA) عناصر

مقایسه میانگین غلظت شکل DTPA عناصر پنج‌گانه (کادمیم، مس، سرب، روی و نیکل) ما بین خاک‌های تحت آبیاری با فاضلاب و خاک شاهد نشان داد که آبیاری با فاضلاب باعث افزایش قابل توجه شکل قابل استفاده عناصر فوق شده است (جدول 4). این افزایش برای نیکل بیشترین مقدار و بعد از آن به ترتیب کادمیم، روی، مس و سرب قرار دارد. چنین نتایج و داده‌هایی در مطالعات گذشته نیز گزارش شده است (24) اگرچه تحقیقات قبلی بیشتر تأثیر آبیاری با فاضلاب خام را بررسی کردند. با این وجود بر اساس منابع داخلی (13) و خارجی (10) مقدار بخش قابل استخراج با DTPA عناصر پنج‌گانه در هر دو اراضی تحت آبیاری با فاضلاب و شاهد کمتر از حد قابل قبول بود به استثنای کادمیوم که در خاک‌های منطقه دو و سه بالاتر از حد استاندارد بود. این نشان می‌دهد که کادمیم قابل جذب می‌تواند در دو سایت فوق باعث تجمع و آلودگی محصولات زراعی این منطقه شود بنابراین بایستی عملیات‌های مدیریتی مناسب برای مقابله با این پتانسیل لحاظ شود. همچنین بیشترین افزایش در مقدار کادمیم قابل استفاده در خاک منطقه دو و سه مشاهده شد جایی که بیشترین مقدار CEC نیز وجود داشت. این ممکن است ناشی از این موضوع باشد که CEC نقش موثری در نگهداری کادمیم قابل استفاده داشته است. در مطالعات گذشته نیز چنین نتیجه و ارزیابی بیان شده است (24). در خاک‌های متعلق به سایت‌های مختلف تحت نفوذ فاضلاب غلظت عناصر پنج‌گانه با روند منظم و یکسان تغییر نیافته بودند طوری‌که برای عناصر نیکل (142%) و مس (87%) بیشترین افزایش غلظت در خاک‌های سایت پنج مشاهده شد، در حالی‌که کادمیم (125%) و روی (73%) بیشترین افزایش غلظت را پس از آبیاری در خاک سایت دو نشان دادند چنین وضعیتی برای عنصر سرب (32%) در خاک منطقه چهار مشاهده گردید. این نتایج و تغییرات ممکن است مربوط به کمیت و کیفیت فاضلاب ورودی به مزارع، خصوصیات مختلف خاک‌ها و اثرات متقابل مابین فاضلاب ورودی و خاک‌های دریافت کننده این فاضلاب باشد.

شکل کل عناصر

آبیاری با فاضلاب باعث افزایش قابل ملاحظه شکل کل عناصر مس، روی، کادمیم، سرب و نیکل خاک نسبت به خاک شاهد شده است (جدول 4) و این افزایش برای این عناصر به صورت Cd> Zn >Pb >Ni >Cu بود. این نتایج می‌تواند ناشی از ورود عناصر فوق از طریق فاضلاب و بر همکنش فاضلاب و خاک‌های دریافت کننده آن باشد. افزایش معنی‌دار غلظت کل عناصر سنگین پس از آبیاری با فاضلاب در سایر تحقیقات مربوط به ایران نیز گزارش شده است (22 و 23). میانگین مس کل از 10 تا 32 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 خطرآفرین نیست. در مقایسه با شاهد، مقدار روی کل در اراضی تحت آبیاری با فاضلاب در اکثر خاک‌ها به طور معنی‌داری به صورت خاک منطقه دو (157 %) > خاک منطقه سه (112 %) > خاک منطقه پنج (64 %) > خاک منطقه چهار (54 %) > خاک منطقه یک (12 %) افزایش یافته بود. اما با این وجود میانگین عنصر نیز 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 مقادیر عنصر کادمیم ایجاد کرده است به طوری‌که در خاک‌های مناطق مختلف یک افزایش دو تا سه برابر در غلظت کادمیم کل نسبت به اراضی تحت آبیاری با آب چاه اتفاق افتاده بود. از طرف دیگر غلظت کادمیم در اراضی تحت آبیاری با فاضلاب بیش از دو برابر حد مجاز این عنصر در منابع مختلف بین‌المللی و داخلی است (جدول 4) که می‌تواند بسیار نگران-کننده باشد. این نگرانی می‌تواند بیشتر شود با در نظر گرفتن این حقایق که : 1- کادمیم در بین عناصر سنگین به عنوان متحرک‌ترین عنصر شناخته شد (15) و 2- شکل قابل استفاده این عنصر نیز در بعضی خاک‌های این منطقه بالاتر از حد مجاز می‌باشد. بنابراین کادمیم خطرناک‌ترین عنصر این مطالعه است که می‌تواند تبعات ناگواری را در چرخه خاک، آب، گیاه، حیوان و انسان ایجاد کند. افزایش معنی‌دار و نگران‌کننده کادمیم پس از آبیاری با فاضلاب در حومه مناطق شهری توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (6 و 11). همچنین پس از حدود 10 سال آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده میانگین نیکل کل در دامنه 14 تا 127 درصد (در مقایسه با شاهد) افزایش یافته است. اگرچه این افزایش نگران‌کننده 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 می‌باشد. همانند سایر عناصر این مطالعه سرب کل نیز به‌طور قابل‌توجه و نگران‌کننده (در دامنه 11 تا 203 درصد) در اثر عملیات آبیاری با فاضلاب تصفیه شده افزایش یافته است و بیشترین میزان این عنصر در خاک‌های منطقه سه (همانند کادمیم) مشاهده شد. با این وجود دامنه تغییرات آن براساس منابع داخلی و خارجی در آستانه قابل قبول بود (جدول 4). به‌طور کلی آبیاری با فاضلاب تصفیه شده در طی یک دوره حدود 10 ساله در بخشی از اراضی حومه شهر ارومیه باعث افزایش قابل‌توجه و نگران کننده شکل‌های قابل استفاده و کل عناصر مس، روی، کادمیم، نیکل و سرب شده است اگرچه این افزایش برای عناصر فوق در دامنه‌های کاملا مختلفی اتفاق افتاده است که می‌تواند ناشی از

کیفیت و منابع فاضلاب و خصوصیات متفاوت خاک‌های دریافت کننده این فاضلاب باشد (6 و 23). ازطرف دیگر در مقایسه با مطالعات مشابه (23) غلظت عناصر پنج‌گانه مورد تحقیق در فاضلاب تصفیه شده این مطالعه به‌طور معنی‌داری بیشتر است و این رفتار می‌تواند ناشی از این حقیقت باشد که فاضلاب تصفیه شده شهر ارومیه 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 می‌گردد.

جدول 4- اثرات آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده بر غلظت شکل‌های قابل استفاده و کل عناصر کادمیوم، مس، سرب، روی و نیکل
Table 4- Effects of irrigation with treated wastewater on the concentration of DTPA and Total elements of Cd, Cu, Pb, Zn and Ni

عناصر سنگین Heavy metals	خاک منطقه یک (پروفیل یک) Soil area 1 (profile 1)		درصد تغییرات Percent change (%)	استاندارد Standard	
	خاک آبیاری شده با فاضلاب Irrigated soil with sewage	خاک آبیاری شده با آب چاه Irrigated soil with well water		داخلی Domestic	خارجی Foreign
DTPA – Cd (mg.kg^{-1})	0.44 ± 0.10	0.285 ± 0.04	54.386*	0.5	0.2 – 0.6
DTPA – Cu (mg.kg^{-1})	2.49 ± 0.275	2.213 ± 0.11	12.94	0.2 – 2	0.2 – 5
DTPA – Pb (mg.kg^{-1})	2.043 ± 0.49	1.85 ± 0.17	10.43	-	5.2 – 10
DTPA – Zn (mg.kg^{-1})	1.893 ± 0.49	1.395 ± 0.24	35.7*	0.2 – 6	0.6 – 10
DTPA – Ni (mg.kg^{-1})	1.39 ± 0.114	0.764 ± 0.07	81.94**	-	0.2 – 2
Total – Cd (mg.kg^{-1})	10.62 ± 1.53	2.8 ± 1.52	279.3***	5	3
Total – Cu (mg.kg^{-1})	56.62 ± 2.71	49.75 ± 0.99	13.81	200	100
Total – Pb (mg.kg^{-1})	55.71 ± 5.98	49.56 ± 0.824	12.41	75	-
Total – Zn (mg.kg^{-1})	40.16 ± 3.19	20.204 ± 1.76	98.77**	360	300
Total – Ni (mg.kg^{-1})	21.14 ± 3.32	18.59 ± 1.36	13.72	110	110
		خاک منطقه دو (پروفیل دو) Soil area 2 (profile 2)			
DTPA – Cd (mg kg^{-1})	0.63 ± 0.13	0.28 ± 0.034	125***	0.5	0.2 – 0.6
DTPA – Cu (mg kg^{-1})	3.14 ± 0.31	2.65 ± 0.412	18.5	0.2 – 2	0.2 – 5
DTPA – Pb (mg kg^{-1})	1.96 ± 0.41	1.85 ± 0.17	5.95	-	5.2 – 10
DTPA – Zn (mg kg^{-1})	2.42 ± 0.24	1.39 ± 0.24	73.35**	0.2 – 6	0.6 – 10
DTPA – Ni (mg kg^{-1})	1.34 ± 0.32	0.75 ± 0.10	78.9**	-	0.2 – 2
Total – Cd (mg kg^{-1})	۰9.63 ± 1.7	2.81 ± 1.56	243***	5	3
Total – Cu (mg kg^{-1})	۰55.6 ± 2.6	49.9 ± 0.68	11.3	200	100
Total – Pb (mg kg^{-1})	± 4.25۱54.	48.9 ± 1.86	10.6	75	-
Total – Zn (mg kg^{-1})	51.95 ± 2.35	20. 2 ± 1.76	157***	360	300
Total – Ni (mg kg^{-1})	50.7 ± 20.1	29.3 ± 1.96	73.1**	110	110
		خاک منطقه سه (پروفیل سه) Soil area 3 (profile 3)			
DTPA – Cd (mg kg^{-1})	0.615 ± 0.15	0.28 ± 0.03	119***	0.5	0.2 – 0.6
DTPA – Cu (mg kg^{-1})	2.78 ± 0.25	2.32 ± 0.19	19.8	0.2 – 2	0.2 – 5
DTPA – Pb (mg kg^{-1})	2.22 ± 0.11	1.85 ± 0.17	20	-	5.2 – 10
DTPA – Zn (mg kg^{-1})	2.25 ± 0.19	1.39 ± 0.24	61.3*	0.2 – 6	0.6 – 10
DTPA – Ni (mg kg^{-1})	1.75 ± 0.19	0.75 ± 0.10	133***	-	0.2 – 2
Total – Cd (mg kg^{-1})	11.7 ± 0.92	2.85 ± 1.56	310***	5	3
Total – Cu (mg kg^{-1})	55.0 ± 2.8	49.9 ± 0.68	10.1	200	100
Total – Pb (mg kg^{-1})	56.4 ± 3.12	18.6 ± 4.3	203***	75	-
Total – Zn (mg kg^{-1})	42.8 ± 3.7	20.2 ± 1.76	112***	360	300
Total – Ni (mg kg^{-1})	34.7 ± 1.79	29.3 ± 1.96	18.5	110	110

خاک منطقه چهار (پروفیل چهار) Soil area 4 (profile 4)					
DTPA – Cd (mg kg^{-1})	0.42 ± 0.045	0.21 ± 0.017	100**	0.5	0.2 – 0.6
DTPA – Cu (mg kg^{-1})	3.47 ± 0.285	1.86 ± 0.11	86.6**	0.2 – 2	0.2 – 5
DTPA – Pb (mg kg^{-1})	2.88 ± 0.20	2.18 ± 0.37	32.4*	-	5.2 – 10
DTPA – Zn (mg kg^{-1})	2.47 ± 0.442	1.73 ± 0.06	42.8*	0.2 – 6	0.6 – 10
DTPA – Ni (mg kg^{-1})	1.57 ± 0.27	0.67 ± 0.28	135***	-	0.2 – 2
Total – Cd (mg kg^{-1})	11.6 ± 2.09	2.90 ± 1.45	302***	5	3
Total – Cu (mg kg^{-1})	57.2 ± 2.32	46.21± 3.16	23.8	200	100
Total – Pb (mg kg^{-1})	60.5 ± 0.66	37.16 ± 1.4	62.7*	75	-
Total – Zn (mg kg^{-1})	41.1 ± 2.79	27.2 ± 1.88	51.1*	360	300
Total – Ni (mg kg^{-1})	41.7 ± 3.68	18.4 ± 2.41	127***	110	110
خاک منطقه پنج (پروفیل پنج) Soil area 5 (profile 5)					
DTPA – Cd (mg kg^{-1})	0.39 ± 0.045	0.21 ± 0.017	85.7**	0.5	0.2 – 0.6
DTPA – Cu (mg kg^{-1})	3.48 ± 0.453	1.86 ± 0.12	87.1**	0.2 – 2	0.2 – 5
DTPA – Pb (mg kg^{-1})	2.55 ± 0.36	2.18 ± 0.37	16.9	-	5.2 – 10
DTPA – Zn (mg kg^{-1})	2.59 ± 0.4	1.73 ± 0.06	50.1*	0.2 – 6	0.6 – 10
DTPA – Ni (mg kg^{-1})	1.62 ± 0.14	0.67 ± 0.28	142***	-	0.2 – 2
Total – Cd (mg kg^{-1})	11.8 ± 2.65	2.90 ± 1.45	307***	5	3
Total – Cu (mg kg^{-1})	60.9 ± 1.80	46.2 ± 3.16	31.9*	200	100
Total – Pb (mg kg^{-1})	59.9 ± 0.61	37.2 ± 1.40	61.1*	75	-
Total – Zn (mg kg^{-1})	44.7 ± 4.37	27.2 ± 1.80	64.3*	360	300
Total – Ni (mg kg^{-1})	22.6 ± 5.80	18.4 ± 2.42	22.9	110	110

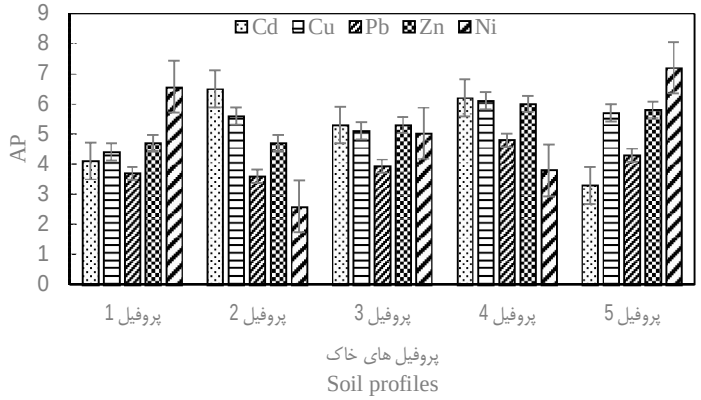
*، ** و *** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال 5 درصد، 1 درصد و 0/1 درصد می‌باشند.

*, ** and *** significantly, at a probability levels of 5%, 1% and 0.1% respectively

ارزیابی شاخص‌های آلودگی خاک

شاخص درصد دسترسی فلزات سنگین (AP)

شاخص AP به عنوان یک شاخص مناسب برای مقایسه پتانسیل تحرک و سمیت فلزات سنگین در خاک می‌باشد (14 و 20). مقادیر این شاخص برای فلزات سنگین این مطالعه (کادمیم، مس، سرب، روی و نیکل) در خاک‌های تحت نفوذ فاضلاب تصفیه شده محاسبه و در شکل 1 ارائه شده است. در اکثر پروفیل‌های مطالعه شده بیشترین مقدار AP مربوط به کادمیم بود که بیانگر سمیت و تحرک بیشتر این عنصر در مقایسه با سایر عناصر می‌باشد و در مقابل در اکثر خاک‌ها کم‌ترین مقدار شاخص فوق مربوط به سرب بود که نشان دهنده حداقل تحرک این عنصر در مقایسه با سایر عناصر می‌باشد. تحرک‌پذیری بیشتر کادمیم نسبت به سایر عناصر در مطالعات و تحقیقات گذشته نیز گزارش شده است به عنوان مثال راموس و همکاران (20) در خاک‌هایی از اسپانیا و رضاپور و همکاران (25) در خاک‌های ایران براساس محاسبه شاخص Ap کادمیم را به‌عنوان متحرک‌ترین عنصر و منگنز را به‌عنوان کم‌تحرک‌ترین عنصر در خاک‌های آهکی و قلیایی گزارش کردند. از طرف دیگر در هر پروفیل بین مقادیر Ap عناصر کادمیم، مس، سرب، روی و نیکل از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. اما در سایت‌های 1 و 5 مقدار Ap نیکل به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر عناصر بود.



شکل 1- مقادیر درصد دسترسی فلزات کادمیم، مس، سرب، روی و نیکل در پروفیل‌های مختلف
Figure 1- Percentage of Cd, Cu, Pb, Zn and Ni in various profiles

شاخص آلایندگی منفرد عناصر (PI)

مقادیر فاکتور آلایندگی منفرد عناصر (PI) برای خاک‌های مورد مطالعه در جدول 5 نشان داده شد. براساس این جدول بیشترین مقدار PI برای عناصر کادمیم در پروفیل سه، مس در پروفیل چهار، سرب در پروفیل چهار، روی در پروفیل دو و نیکل در پروفیل چهار مشاهده شد. همچنین میانگین فاکتور آلایندگی منفرد عناصر پنج‌گانه به صورت توالی Cd> Zn> Ni> Pb> Cu بود. عنصر کادمیم در خاک-های مطالعه شده دارای بالاترین کلاس فاکتور آلایندگی منفرد عناصر (کلاس 4) و از لحاظ آلودگی در سطح آلودگی بالا قرار داشت و وضعیت مابقی عناصر در سطح آلودگی کم تا متوسط قرار داشت که این امر احتمالا ناشی از مصرف یک دهه آب فاضلاب حاوی این عناصر برای آبیاری این اراضی کشاورزی است. چنین نتایجی با مطالعات پارسفر و همکاران (18) مطابقت دارد. ازطرف دیگر علت افزایش کادمیم و افزایش کلاس آلایندگی آن می‌تواند ناشی از ترکیبات موجود در فاضلاب مصرفی باشد.

شاخص آلودگی ترکیبی (PIN)

مقادیر شاخص آلودگی ترکیبی برای عناصر مورد مطالعه (کادمیم، مس، سرب، روی و نیکل) در خاک‌های تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده محاسبه گردید (شکل 2).

جدول 5- شاخص PI
Table 5- PI index

Ni	Zn	Pb	Cu	Cd	شماره پروفیل Profile number
1.14 (2)	1.98 (2)	1.12 (2)	1.14 (2)	3.79 (4)	پروفیل یک Profile 1
1.73 (2)	2.57 (3)	1.11 (2)	1.11 (2)	3.43 (4)	پروفیل دو Profile 2
1.18 (2)	2.12 (3)	1.16 (2)	1.10 (2)	4.09 (4)	پروفیل سه Profile 3
2.27 (3)	1.51(2)	1.28 (2)	1.24 (2)	4.02 (4)	پروفیل چهار Profile 4
1.23 (2)	1.64 (2)	1.27 (2)	1.32 (2)	4.07 (4)	پروفیل پنج Profile 5
1.51 (2)	1.96 (2)	1.19 (2)	1.18 (2)	3.88 (4)	میانگین Mean

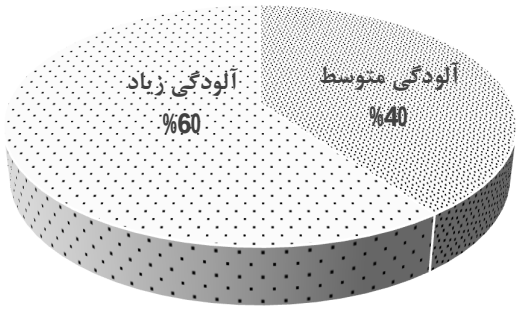
2: class2: Low pollution, 3: class 3: Moderate pollution, 4: class 4: High pollution

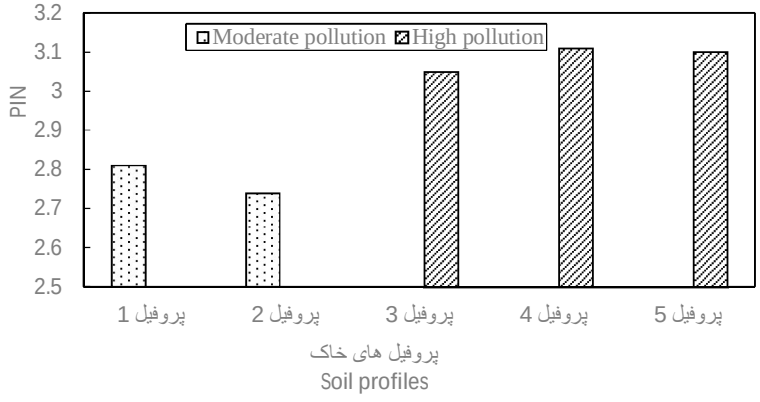
بر این اساس بیشترین و کم‌ترین میزان شاخص PIN به ترتیب در پروفیل‌های چهار و دو مشاهده شد و توزیع آن نیز به صورت پروفیل چهار> پروفیل پنج> پروفیل سه> پروفیل یک> پروفیل دو بود. همچنین 60 درصد از خاک‌های تحت نفوذ فاضلاب این منطقه در سطح آلودگی بالا (کلاس 5) و 40 درصد در سطح آلودگی متوسط (کلاس 4) قرار داشتند (شکل 2). بیشترین تأثیر از بین عناصر پنج-گانه این مطالعه مربوط به عناصر کادمیم و بعد روی در ایجاد این سطح آلودگی بوده و این امر نشان دهنده بالا بودن میزان این فلزات در فاضلاب و تجمع آن ها در قسمت‌های سطحی خاک است.

شاخص بار آلایندگی (PLI)

شاخص بار آلایندگی عناصر پنج‌گانه مورد مطالعه در خاک‌های تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه شده به گونه‌ای بود که به مانند شاخص آلودگی ترکیبی بیشترین میزان آن در پروفیل چهار مشاهده شد. توزیع پروفیلی این شاخص در منطقه مورد مطالعه به صورت پروفیل چهار> پروفیل دو> پروفیل پنج> پروفیل سه> پروفیل یک بود (شکل 3). همچنین شاخص فوق در خاک‌های مورد مطالعه در سطح آلودگی کم (کلاس 2) قرار داشت. اما اگر چنین روندی ادامه یابد آلودگی در سطح بالای خاک‌های این منطقه در آینده محتمل است. به‌طور کلی با در نظر گرفتن سه شاخص PI، PIN و PLI می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که خاک متعلق به پروفیل چهار با داشتن بیشترین کمیت شاخص‌های فوق در مقایسه با سایر خاک‌ها از آلودگی بیشتری برخوردار بود و کادمیم بیشترین نقش را در افزایش مقدار این شاخص نشان داد. بنابراین کادمیم خطرناک‌ترین عنصر برای سیستم آب، خاک و گیاه اراضی این منطقه است که بایستی عملیات مدیریتی مناسب برای کاهش مقدار آن در نظر گرفته شود.

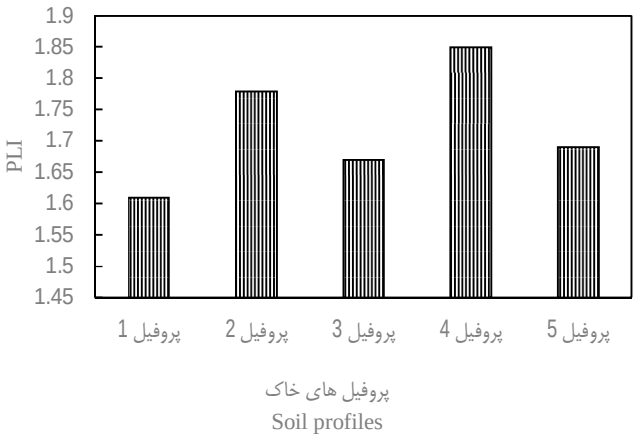
با در نظر گرفتن مطالب فوق به نظر می‌رسد که کادمیم در شرایط حاضر عنصر خطرناکی برای زنجیره خاک، آب، گیاه و انسان در این منطقه می‌باشد که نیاز به برنامه مدیریتی و حفاظتی برای کاهش دامنه این عنصر ضروری به نظر می‌رسد.





شکل 2- شاخص آلودگی ترکیبی (PIN) در خاک‌های تحت نفوذ فاضلاب

Figure 2- Nemerow pollution index (PIN) in sewage-affected soils



شکل 3- شاخص بار آلایندگی (PLI) در خاک های تحت نفوذ فاضلاب
Figure 3- Pollution index (PLI) in sewage-affected soils

نتیجه‌گیری

براساس یافته‌های این تحقیق یک تجمع معنی‌داری از شکل‌های قابل استفاده و کل عناصر کادمیم، مس، سرب، روی و نیکل در اثر آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده در خاک‌های مختلف این منطقه اتفاق افتاده است و چنانچه این روند آبیاری ادامه داشته باشد قطعا در آینده صدمات جبران‌ناپذیری به اکوسیستم این اراضی وارد می‌شود. همچنین در بین این عناصر کادمیم در همه خاک‌های تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه شده این مطالعه بیشترین افزایش را نشان داد. از طرفی کادمیم بیشترین تأثیر را نیز در ایجاد کلاس شاخص‌های آلودگی خاک داشت. بنابراین با توجه به این نتایج برای جلوگیری از تخریب سیستم آب، خاک و گیاه این منطقه بایستی در صورت امکان از این فاضلاب برای مصارف غیرکشاورزی مانند آبیاری فضای سبز حومه شهر استفاده شود و یا تکنیک‌های دقیق‌تری برای تصفیه فاضلاب‌های شهر ارومیه به کار گرفته شود، طوری‌که قادر به حذف عناصر سنگین و املاح محلول موجود در فاضلاب شده و مانع از افزایش آلودگی این فلزات در خاک شوند. همچنین بایستی از ورود فاضلاب‌های خام به کانال انتقالی فاضلاب تصفیه شده در مسیر خروجی از تصفیه‌خانه تا مزارع زراعی این منطقه ممانعت شود و به صورت دوره‌ای غلظت عناصر سنگین موجود در فاضلاب، خاک و گیاهان تحت آبیاری با این فاضلاب آنالیز شوند. ازطرفی غلظت عناصر پنج‌گانه این مطالعه بایستی در قسمت‌های مصرفی محصولات زراعی این منطقه اندازه‌گیری و همچنین فاکتور غلظت و فاکتور انتقال عناصر فوق نیز از خاک به بخش‌های مختلف (ریشه، ساقه و دانه) گیاهان زراعی غالب این منطقه محاسبه شوند.

منابع

1- Abedi-Koupai J.B., Mostafazadeh-Farid M., Afyuni and Bagheri M.R. 2006. Effect of treated wastewater on soil chemical and physical properties in an arid region. Plant, soil and Environmental, 52(8):335-344.
2- Bai J., Yang Z., Cui B., Gao H., Ding Q. 2010. Some heavy metals distribution in wetland soilsunder different land use types along a typical plateau lake, China. Soil & Tillage Research, 106: 344–348.
3- Chapman H.D. 1965. Cation exchange capacity. In: Black CA (ed) Methods of soil analysis, Part2. American Society of Agronomy, Madison, pp: 891-900.
4- Cheng J.L., Shi Z., Zhu Y.W. 2007. Assessment and mapping of environmental quality in agricultural soils of ZhejiangProvince, China. Journal Environmental Science, 19: 50–54.
5- Dahnke W.C., and Journal G.V. 1990. In Westerman RL (ed) soil Testing and plant Analysis: American Society of Agronomy Inc. Madison, Wisconsin, USA, 6, 120-140.
6- Farahat E., and Linderholm W. 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. SID, 513: 1-7.
7- FAO. 1992. Wastewater Treatment and Use in Agriculture. Irrigation and Drainage Paper, No 47, FAO, Rome, Italy.
8- Hati K.M., Biswas A.K., Bandyopadhyay K.K., and Misra A.K. 2007. Soil properties and crop yilds on a vertisol in India with application of distillery effluent. Soil & Tillage Research, 92(1-2):60-68.
9- Iranian Environmental Protection Agency Research Deputy. 1992. Sewage outlet standard. Environmental Education Office. (In Persian).

10- Kabata-Pendias A. 2010. Trace elements in soils and plants. Boca Raton (FL): CRC Press, 157-166.
11- Klay S.A., Charef A., Ayed B., Houman and Rezgu F. 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.
12- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. Soil science society of America Journal, 42(3), 421-428.
13- Malakouti M.J., and Gheibi M.N. 2000. Determination of critical levels of nutrients in soils, plant and fruit for the quality and yield improvements of Iran،s strategic crops. Applied Agriculture Science Publishers, Tehran, Iran. (In Persian).
14- Massas I., Ehaliotis C., Gerontidis S., and Sarris E. 2009. Elevated heavy metal concentrations in top soils of an Aegean islandtown (Greece): total and available forms, origin and distribution. Environmental Monitoring Assessment. 151: 105–116.
15- Mc Bride M.B., Richards B.K., Steenhuis T., Russo J.J., and Save S. 1997. Mobility and solubility of toxic metals and nutrients in soil fifteen years after sludge application, Soil Science. 7: 487-500. Nelson RE. 1982. Carbonate and gypsum. In: Page PL (ed) Methods of soil analysis, Part 2. American Society of Agronomy, Madison, pp: 181-199.
16- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1996. Total Carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of soil analysis. Part, 3(3), 961-1010.
17- Nelson R.E. 1982. Carbonate and gypsum. In: Page PL (ed) Methods of soil analysis, Part 2. American Society of Agronomy, Madison, pp: 181-199.
18- Parsfar N., Maroufi S., Rahimi A.H., and Maroufi H. 2015. Evaluation of the rate of Cd, Zn, Cu and Pb in irrigation soil with municipal wastewater. Journal of Water and Soil Science, Vol. 25, No.1, Page 1 to 25. (In Persian with English abstract).
19- Rattan R.K., Datta S.P., Chhonkar P.K., SuribabuK 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, Ecosystems and Environmental, 109:310-322.
20- Ramos-Miras J.J., Roca-Perez L., Guzmán-Palomino M., Boluda R., and Gil C. 2011. Background levels and baseline values of available heavy metals in Mediterranean greenhouse soils (Spain). Journal of Geochemical Exploration, 110(2), 186-192.
21- Rezapour S., Jafarzadeh A.A., Samadi A., and Oustan S. 2010. Distribution of iron oxides forms on A transect of calcareous soils, north-west of Iran. Archives of Agronomy and Soil Science, 56:165-182.
22- Rezapour S., and Samadi A. 2011. Soil quality response to long-term wastewater irrigation in Inceptisols from a semi-arid environment. Nutrient cycling in Agroecosystems, 91(3), 269-2.
23- Rezapour S., Samadi A., and Khodaverdiloo H. 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.
24- Rezapour S., Kouhinezhad P., Samadi P., and Rezapour M. 2015. Level, pattern, and risk assessment of the selected soil trace metals in the calcareous-cultivated Vertisols. Chemical Ecology, 8:692-706.80.
25- Rezapour S., Kouhinezhad P., and Samadi A. 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.
26- Sharma R.K., Agrawal M., and Marshall F. 2007. Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India. Ecotooxicology and Environmental Safety, 66(2):258-266.
27- Smith J.L., and Doran J.W. 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). Madison: Soil Science Society of America.
28- Tabari M., Salehi A., and Ali-Arab A.R. 2008. Effects of wastewater application on heavy metals (Mn, Fe, Cr and Cd) contamination in a black locust stand in semi-arid zone of Iran. Research Journal of Environmental Science, 7(4): 382-388.
29- Toze S. 2006. Reuse of effluent water (benefit and risks). Agriculture Water Management, 80(1-30):147-59.
30- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 1993. Standards for use of disposal of sewage sludge, Final reles, 40 CFR, Parts 257, 403 and 503. Federal Register, 58 (32): 9248 – 9415.
31- Urmia Environmental Organization. 2008. Archive of figures.
32- WHO. 2006. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and grey water, part II, Geneva.
33- Yu L., Zhang B., and Zhang S.Q. 2004. Heavy metal elements pollution evaluation on the ecological environment of the Sanjiang Plain based on GIS. Chinese Journal of Soil Science, 35(5), 529-532.

Journal of Water and Soil
Vol. 32, No. 3, Jul.-Agu. 2018, p. 573-585

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد 32، شماره 3، مرداد – شهریور 1397، ص. 585-573

Effects of Treated Wastewater Irrigation on Heavy Metals Concentration, Distribution and Contamination of Soil

B. Atashpaz[1]- **S. Rezapour***[2]- **N. Ghaemian**[3]
Received: 17-01-2018
Accepted: 30-05-2018

Introduction: Over the past decades, due to climate change and water scarcity, the recovery and use of urban wastewater, especially in arid and semi-arid climates, has increased. But since wastewater is considered as an unconventional source of water, its use in agriculture requires special management which, while benefiting from it, does not have environmental and health hazards in soil, plant and surface water and underground water resources. On the other hand, sewage systems often have significant amounts of heavy and toxic metals, the type and amount of which varies from place to place, and even in the specific location, over time. The soil also has a limited capacity to absorb and maintain these elements, and if their concentration exceeds the permitted range, they can cause pollution of the water, soil, plant and human cycle. Therefore, the present study was conducted to investigate the effect of irrigation with treated wastewater in Urmia city on concentrations, distribution and contamination of Zn, Cu, Cd, Pb and Ni elements.

Materials and Methods: In field work, 6 soil profiles (5 profiles from the wastewater-irrigated soils and a profile from the well-irrigated soil as control soil) were dug, described, and sampled. At around each profile, composite soil samples were also obtained in the root depth of the area (Ap horizon, the depth of 30 cm). Soil samples were first air-dried and passed through a 2-mm sieve and then analyzed for the determination of heavy metals. The available and total fraction of zinc (Zn), copper (Cu), cadmium (Cd), leads (Pb), and nickel (Ni) were extracted by DTPA method and concentrated acid (HNO_3) procedure, respectively. The content of Zn, Cu, Cd, Pb and Ni were determined by an atomic absorption spectrophotometer (Shimadzu AA-6300). Descriptive statistics were conducted using SPSS 16 for Windows. In order to study the effect of irrigation with treated wastewater on the extent of contamination of heavy metals, the AP (availability percentage), PI (Single-factor pollution index), NPI (Nemerows pollution index), and PLI (Pollution load index) in the affected soils with this wastewater was calculated. Also, all soil and water experiments were performed in 3 replicates and then, using the excel data software category, tables and charts were plotted.

Results and Discussion: The soils were alkaline and calcareous as characterized by high pH, ranging from 7.6 to 8, and calcium carbonate equivalent, ranging from 30 to 42%. On average, the value of the available fraction of the examined metals in the wastewater-irrigated soils ranged from 1.9 to 3.5 mg $kg^{-1}$for Zn, 2.5- to 3.5 mg $kg^{-1}$for Cu, 0.4 to 0.62 mg $kg^{-1}$for Cd, 2 to 2.9 mg $kg^{-1}$for Pb, and 1.34 to 1.75 mg $kg^{-1}$for Ni. Comparing to the control, irrigation with wastewater resulted in a considerable build-up in the available fraction of the metals in the rank of Ni (79-142%)> Cd (54-125%)> Zn (35-73%)> Cu (13-87%)>Pb (6-32%). These patterns can be due to the quality and quantity of the used wastewater and impact of the used wastewater with its receiving soils. Similar to the available fraction, there was an increasing trend in the total fraction of metals in the order of Cd> Zn>Pb> Ni> Cu following wastewater irrigation. In this context, the mean content of total Zn, Cu, Cd, Pb, and Ni in wastewater-irrigated soils was as 51-157%, 10-32%, 243-310, 11-203%, and 13-126% higher than those of control soil, respectively. In spite of such enrichment, only the Cd values exceeded the maximum acceptable limits. The AP index is an appropriate index to compare the mobility potential and the toxicity of heavy metals in soil. In this study, the highest rate of this index among the heavy metals was related to Cd and its lowest level was related to Pb, which showed more toxicity and more mobility of Cd compared with other elements. The average of single-factor pollution index of five elements was observed in sequence Cd> Zn> Ni>Pb> Cu that the element of Cd had the highest class of PI (class 4). The highest and lowest of NPI values of five elements were observed in profiles 4 and 2, respectively. Also, the greatest effect of the five elements of this study is on the elements of Cd and Zn in the generation of this level of contamination. The pollution index of the five studied elements in irrigated soils with treated wastewater was similar to the NPI, its maximum was observed in profile 4 and Cd showed the highest effect on increasing the value of this index.

1 and 2- Former M.Sc. Student of Agriculture Engineering Science and Associate Professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Urmia University
(*- Corresponding Author Email: S_Rezapour2000@yahoo.com)
3- Former Employee of Urmia Soil and Water Research Institute

Conclusions: The results of this study showed that irrigation with sewage significantly increased the available fraction of the metals in the order of Ni (78.9-141.8%)> Cd (54.4-125%)> Zn (35.7-73.3%>Cu (13-87%)>Pb (6-32.3%) compared to the control. However, with the exception of cadmium, the available fraction of other elements was within the permissible limit. Compared to the control, in the majority of studied soils, the total fraction of the metals (with the exception of copper) was significantly increased and the lowest and highest increase associated with Cu (10-32%) and Cd (2 - 3 times). Also, the results of pollutant indices showed that the majority of the studied soils were in the low to high contamination and Cd was known as the major metal affecting the indices yield.

Keywords: DTPA fraction, Pollution index, Total metal fraction, Urmia plain