نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال هفتم، شماره ۱، صفحات ۴۴-۵۴، بهار ۱۴۰۱

Journal of Water and Wastewater
Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 7, No. 1, PP. 44-54, Spring 2022
DOI: 10.22112/JWWSE.2021.271689.1255

مقاله پژوهشی

ارزیابی ریسک غذایی فلزات سنگین (کادمیوم، سرب) برخوردار از پساب تصفیه‌خانه ناشی از مصرف محصولات زراعی توزیع شده در شهرگرگان

محمدرضا شمسایی‌فر[۱*]، علیرضا پرداختی[۲] و مهدی شمس‌آبادی‌زاده[۳]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی محیط زیست، پردیس بین‌المللی کیش، رئیس بخش فنی و اجرایی شرکت آب و فاضلاب منطقه ۵ شهر تهران، ایران.
۲- استادیار، دانشکده محیط زیست دانشکده مهندسی، دانشگاه تهران، ایران.
۳- دانشجوی دکترای مهندسی محیط زیست، پردیس بین‌المللی کیش، مشاور فنی و اجرایی مدیرعامل شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ شهر تهران، ایران.
*نویسنده مسئول، ایمیل: mohamadrezashamsaeifar@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۴
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۰/۰۵/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۳۰
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

آلودگی محیط‌زیست با فلزات سنگین و انتقال آن به محصولات به‌عنوان یک مشکل جهانی و در حال گسترش مطرح است. این مطالعه باهدف سنجش فلزات سنگین در پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهرگرگان با تعداد ۳۲ نمونه پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب گرگان طی ۶ ماه در سال ۹۵ نمونه‌برداری و غلظت فلزات سرب، کادمیوم، توسط دستگاه پلاروگراف و جذب اتمی سنجش شد. یافته‌ها نشان داد که میانگین غلظت سرب در پساب ۰/۰۰۳۹۴۳۵۴۷ mg/L بوده که این مقدار برای کادمیم ۰/۰۰۰۱۴۳۵۷۱ mg/L در لیتر اندازه‌گیری شده است. غلظت فلزات سنگین در پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب در زیر حد استاندارد بود. با توجه به مصرف طولانی، لزوم تثبیت سایر پارامترها و اثر تجمع‌پذیری فلزات در پساب، باید در کاربرد آن‌ها برای مصارف کشاورزی دقت و احتیاط لازم به‌عمل آید. به‌همین دلیل و به لحاظ اهمیت حضور این نوع از آلاینده‌ها در خاک و محصولات غذایی، پایش مستمر آن‌ها توسط شرکت‌های آب و فاضلاب ضروری است. درنهایت مشخص شد که در حالت mean به‌ازای هر یک‌صد میلیون نفر تعداد ۷/۲۱ نفر، در حالت max به‌ازای هر ده میلیون نفر تعداد ۱/۱۳ نفر و در حالت min به‌ازای هر یک‌صد میلیون نفر تعداد ۲/۸۲ نفر در معرض ریسک سرطانی قرار دارند.

واژه‌های کلیدی: پساب، فلزات سنگین، گرگان، سرب، کادمیوم، ریسک سرطان‌زایی، پساب تصفیه‌خانه فاضلاب، محصولات کشاورزی

Research Paper

Food Risk Assessment of Heavy Metals (Cadmium, Lead) in the Treatment Plant Effluent Due to the Consumption of Distributed Crops in Gorgan

Mohammad Reza Shamsaeifar[1] *, Alireza Pardakhti[2] and Mehdi Shamsabadizadeh[3]

1- Ph.D. Candidate in Environmental Engineering, Head of Technical and Executive Department of Water and Sewerage Company, District 5, Tehran, Iran.
2- Assistant Professor, School of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Iran.
3- Ph.D. Candidate in Environmental Engineering, Technical and Executive Advisor to the CEO of Water and Sewerage Company, Region 4, Tehran, Iran
*Corresponding Author, Email: mohamadrezashamsaeifar@gmail.com

Received: 22/02/2021
Revised: 29/07/2021
Accepted: 21/08/2021
© IWWA

Abstract

Pollution of environment with heavy metals and its transfer to products is a global problem. The aim was to measure heavy metals in the effluent of Gorgan wastewater treatment plant which with 32 effluent samples of Gorgan wastewater treatment plant were sampled during 6 months in 2016 and concentration of lead, cadmium by polarograph and atomic absorption was assessed. Risk of carcinogenicity and non-carcinogenicity was calculated in three cases: minimum, moderate and maximum. Average concentration of lead in the effluent was 0.003943547 mg/L, which is value for cadmium measured 0.000143571 mg/L.The concentrations of heavy metals in wastewater effluent and dried sludge, except in returned sludge, were below the standards. Due to long-term use of effluents, necessity of treatment of other parameters, and effect of bioaccumulation of metals in sludge, caution should be taken for their agricultural application. Because of importance of this type of contaminants in soil and food products, continuous monitoring by water companies is highly necessary.In mean state, for every one hundred million people, 7.21 people, in max mode, for every ten million people, 1.13 people and in the case of min, for every one hundred million people, 2.82 people are at risk of cancer.

Keywords: Water, Wastewater, Lead, Cadmium, Carcinogenic risk, Wastewater treatment effluent, Agricultural products

۱- مقدمه

در طول سی‌سال گذشته، هدف از تصفیه فاضلاب بهبود کیفیت پساب تصفیه شده، باتوجه به تحولات نظارتی و افزایش حساسیت به مسائل محیط‌زیستی و حفاظت از منابع آب بوده است. آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده یکی از جایگزین‌های عمده برای حفظ منابع آب موجود و بهبود منابع آب شهری در بسیاری از شهرها درحال انجام است. در استفاده مجدد از پساب، اگر به کیفیت میکروبی پساب و جنبه‌های بهداشتی آن توجهی نشود، خطر جدی برای بهداشت و سلامتی انسان و محیط‌زیست به‌همراه خواهد داشت. این موضوع زمانی با اهمیت‌تر خواهد بود که از پساب برای آبیاری فضای سبز عمومی و پارک‌ها و محصولات خوراکی از جمله صیفی‌جات و سبزیجات استفاده شود.

در استفاده از پساب برای آبیاری محصولات کشاورزی، توجه به کیفیت آن ضروری است. درصورت استفاده غیراصولی، مواد سمی و میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا در پساب‌های خانگی می‌تواند سلامت گیاه را به‌خطر بیندازد (Muchuweti et al., 2006). برخی از پساب‌ها که برای آبیاری استفاده می‌شوند حاوی یون‌هایی چون بر، کلر، سدیم و عناصر (آلومینیوم، بریلیوم، تیتانیوم، تنگستن و وانادیوم) در غلظتی بیش از حد نیاز گیاه هستند. این حالت باعث کاهش رشد، تغییر شکل گیاه و یا کاهش و از بین رفتن محصول می‌شود (چوپان و امامی، ۱۳۹۹). به‌علاوه، فاضلاب‌ها دارای مقدار زیادی از عناصر مغذی شامل فسفر و نیتروژن، مواد آلی و سایر مواد ضروری گیاه هستند (بینا و همکاران، ۱۳۸۳؛ Nasrazadani and Hooda, 2014). با این‌حال ممکن است فاضلاب حاوی مقادیر قابل‌توجهی از فلزات سنگین و دیگر مواد آلی سمی صنعتی باشد که می تواند تهدید جدی محیط‌زیستی برای کیفیت شیمیایی خاک و محصولات کشاورزی و همچنین بهداشتی باشد، به‌طوری‌که تجمع بیش از حد فلزات سنگین در خاک سبب کاهش کیفیت مواد غذایی، سلامت و بهداشت شود (Asgharnia et al., 2014; Villar and Garcia, 2002).

پساب فاضلاب شهری شامل فلزات سنگین، مواد مغذی اصلی و ریزمغذی‌ها و آلاینده‌های آلی بوده و انواع میکروارگانیسم‌ها و تخم انگل‌ها، که در برابر مقادیر مرسوم گندزدا مقاومت می‌کنند، در آن وجود دارند. به‌طور کلی، فلزات سنگین، مانند کادمیوم (Cd)، کروم (Cr)، جیوه (Hg)، سرب (Pb)، مس (Cu)، روی (Zn) و نیکل (Ni) به فلزات با چگالی بیش‌تر از ۵ g/cm^3 اشاره دارد. این مواد و ترکیبات آن‌ها به‌طور طبیعی در سراسر محیط خاک و در همه جا یافت می‌شوند. حضور و پایداری فلزات سنگین در محیط و خاصیت تجمعی آن‌ها و هم‌چنین موجودات به‌ویژه انسان و عدم تجزیه آن‌ها مانند سایر ترکیبات آلی، مشکلات قابل‌ملاحظه محیط‌زیستی و بهداشتی را ایجاد می‌نماید. این درحالی است که سمیت و خطر تجمع بیولوژیکی این آلاینده‌ها در زنجیره غذایی، اهمیت بهداشتی آن‌ها را در جوامع امروزی بیش‌تر کرده است. در حال‌حاضر آلودگی به این آلاینده‌ها رو به افزایش بوده و در نتیجه تجمع این فلزات در گیاهان و حیوانات علاوه‌بر آسیب‌های جدی به موجودات، مصرف فرآورده‌های آن‌ها برای سلامت مصرف‌کنندگان نهایی یعنی انسان را بسیار مخاطره آمیز کرده است. یکی از راه‌های اصلی مواجهه انسان با فلزات سنگین، مسیر خاک به‌عنوان بستر رشد سبزیجات و موادغذایی است. در نتیجه، حضور فلزات سنگین در پساب تصفیه‌خانه‌ها همواره به‌عنوان یک منبع قابل توجه از آلاینده‌های آب و خاک مطرح است.

سازمان مواد سمی و ثبت بیماری‌های ایالات متحده آمریکا به‌دلیل آن‌که افراد در نتیجه تماس با خاک و آب آلوده آسیب بهداشتی می‌بینند، فهرستی از سایت‌های صنعتی فرآوری تهیه کرده و گزارش نموده است غلظت سرب در خون کودکانی که در مناطق آلوده زندگی می‌کنند بالاتر از کودکانی است که خارج از این مناطق زندگی می‌کنند. بنابراین آب‌های آشامیدنی آلوده یکی از منابع مورد انتظار خطر سلامتی انسان است. افزایش غلظت فلزات سنگین و ترکیبات آن‌ها از حداکثر غلظت مجاز در آب‌های آشامیدنی اثرات مضری بر سلامتی انسان داشته و اثرات سمی، جهش‌زایی یا سرطان‌زایی آن با ویژگی‌های عنصر، مرتبط است. اثرات مورد انتظار این مواد ممکن است به‌صورت ارزیابی خطرات بیان شود (Mueller and Gasteyer, 2021).

سواری و همکاران (۱۳۸۶) به بررسی پتانسیل نشت فلزات سنگین و خوردگی در شبکه توزیع آب آشامیدنی اهواز پرداختند. آن‌ها میانگین غلظت فلزات سرب، کادمیم، روی، مس، آهن و منگنز را به‌ترتیب ۸/۴۸، ۰/۹۷، ۳۱۸۰، ۱۶۸، ۲۵۷، ۳۰/۶ میکروگرم بر لیتر در آب به‌دست آوردند. هم‌چنین تحقیق میران‌زاده و همکاران (۱۳۹۰) بر روی غلظت فلزات سنگین در آب شبکه توزیع کاشان نشان داد که غلظت فلزات سنگین در آب شبکه توزیع کاشان بالاتر از حد استاندارد ملی و بین‌المللی نبوده و خطری برای مصرف‌کنندگان دربر نخواهد داشت. این درحالی است که پژوهش کریم‌پور و شریعت (۱۳۷۹) نشان داد که میانگین غلظت سرب، کادمیوم و کروم بیشتر از حد استاندارد در

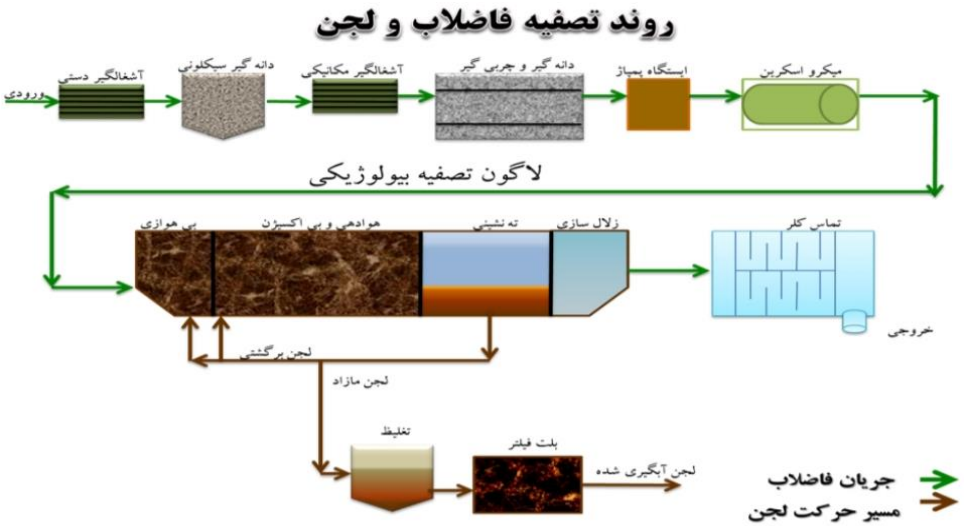
آب آشامیدنی شهر همدان بوده است.

در همین راستا، سلیمی و همکاران (۱۳۹۸) پارامترهای مختلف مثل غلظت اولیه فنول، pH، دما و مقدار جاذب بر روی مقدار جذب را بررسی کردند. بررسی‌ها نشان داد که جاذب‌های کم‌هزینه‌ای مثل جاذب‌های به‌دست آمده از مواد معدنی، پسماند کشاورزی و مواد زائد صنعتی پتانسیل بالا و انعطاف‌پذیری بیشتری را نسبت به بسیاری از روش‌های دیگر برای حذف ترکیبات فنولی دارد و جاذب‌هایی که فعالیت سطحی بیشتر، سطح و تخلخل بالایی دارند کارایی بیشتری دارند. نبوی و فهادی (۱۳۹۷) در پژوهشی دیگر دریافتند که فرآیند ازن‌زنی به‌دلیل قدرت اکسیدکنندگی بالای مولکول ازن، یک تکنولوژی امیدوارکننده در حذف آلاینده‌هایی است که با روش‌های معمولی نمی‌توان آن‌ها را از آب حذف کرد. در این مقاله پژوهش‌های انجام شده مربوط به فرآیندهای مبتنی بر ازن برای حذف آلاینده‌های دارویی از آب و فاضلاب‌های شهری گردآوری شد. علاوه‌بر این، نقش پارامترهای موثر بر میزان حذف آلاینده‌های دارویی نظیر زمان تماس ازن با آلاینده، pH محلول، دوز ازن، غلظت آلاینده و نوع دارو مورد بررسی قرارگرفت. یافته‌های قاسمی و همکاران (۱۳۹۸) نشان داد که براساس نتایج بررسی صفات فیزیولوژیکی گیاه شامل میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، قند و پرولین از نظر آماری بین تیمارهای مختلف اختلاف معنی‌دار وجود دارد. بیشترین میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل مربوط به فاضلاب تصفیه شده و بیشترین میزان قند و پرولین مربوط به فاضلاب تصفیه‌نشده بود.

هم‌چنین درک جامع از منابع این نوع از آلودگی‌ها و روند تغییرات و حذف آن‌ها در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب برای به حداقل رساندن اثر آن‌ها بر محیط‌زیست آبی و خاکی و استفاده مجدد ضروری است. با این‌حال، ارزیابی و شناسایی منابع فلزات سنگین در فاضلاب شهری به‌دلیل تغییرات زمانی کیفیت فاضلاب، پراکندگی جمعیت و مکان منابع ورود آلاینده‌ها، کار پیچیده‌ای است و نیاز به پایش مستمر دارد. به‌طوری‌که فقدان نظارت کافی بر کیفیت پساب و لجن‌های دفعی از تصفیه‌خانه‌های کشور موجب شده که در بیش‌تر موارد این مواد به‌صورت تجمع‌یافته به محیط راه پیدا نموده و خسارات زیادی را بر منابع طبیعی وارد نمایند و آلودگی آب، خاک و محصولات کشاورزی و شیوع بیماری مزمن را به‌وجود آورند. لذا این تحقیق با هدف ارزیابی ریسک غلظت فلزات سنگین مهم در پساب دفعی تصفیه‌خانه فاضلاب و تأثیر آن بر میزان وجود آلاینده های ناشی از غلظت فلزات موردنظر در سبزیجات شهر گرگان انجام شده است.

۲- مواد و روش‌ها

روش تحقیق پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از منظر ماهیت مطالعه توصیفی-تحلیلی است. ابزار مورد استفاده در این پژوهش، مشاهده‌ای است. مورد مطالعه این پژوهش، فاضلاب تصفیه‌خانه شهری گرگان است که در آن غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیم در پساب فاضلاب تصفیه‌خانه به‌مدت ۶ ماه و با سه تکرار در ماه، در سال ۱۳۹۵ سنجش شد. سیستم تصفیه فاضلاب شهر گرگان از نوع لجن فعال هوادهی گسترده است که شامل چهار مرحله تصفیه مقدماتی آشغال‌گیری، دانه‌گیری، تصفیه بیولوژیکی، ته‌نشینی و ضدعفونی است. در شکل ۱، شماتیک روند تصفیه فاضلاب شهر گرگان نشان داده شده است.



شکل ۱- روند تصفیه فاضلاب شهر گرگان (منبع: مطالعات محقق)

۲-۱- نمونه‌گیری

در این مطالعه میزان غلظت کادمیم و سرب در تمام نمونه‌های گرفته شده اندازه‌گیری شد. جدول ۱ مقادیر غلظت دو نمونه اندازه‌گیری شده در پساب را نشان می دهد. براساس نتایج جدول ۱، میزان میانگین غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در پساب به‌ترتیب برابر ۰/۰۸۷۶۳۴۳۷۵ و ۰/۰۱۱۴۸۵۷۱۴ میلی‌گرم بر لیتر است. میزان حداکثر غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در پساب هم به‌ترتیب برابر ۰/۱۳۸۳ و ۰/۰۲۶۹ میلی‌گرم بر لیتر است. میزان حداقل غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در پساب نیز برابر ۰/۰۲۹۴ و ۰/۰۰۲۳ میلی‌گرم بر لیتر است.

جدول ۱- مقادیر غلظت در نمونه‌های اندازه‌گیری شده در پساب

ردیف	سرب (mg/L)	کادمیوم (mg/L)	ردیف	سرب (mg/L)	کادمیوم (mg/L)
۱	۰/۰۴۱۲	۰/۰۰۰۸۲	۹	۰/۰۹۷۰۵	۰/۰۰۴۸
۲	۰/۰۶۵۲	N.D.*	۱۰	۰/۰۲۹۴	۰/۰۰۴
۳	۰/۰۷۵۳	N.D.	۱۱	۰/۱۰۸۹	۰/۰۰۹۶
۴	۰/۰۹۳۴	۰/۰۱۱۱	۱۲	۰/۰۴۱۵	۰/۰۱۱۲
۵	۰/۰۷۰۳	۰/۰۰۳۷	۱۳	۰/۱۲۷۱	۰/۰۲۶۹
۶	۰/۰۷۱۵	۰/۰۰۲۳	۱۴	۰/۱۱۷۲	۰/۰۱۹۵
۷	۰/۱۳۶۷	۰/۰۲۰۳	۱۵	۰/۰۶۱۴	۰/۰۰۹۲
۸	۰/۱۳۸۳	۰/۰۲۱۸	۱۶	۰/۱۲۷۷	۰/۰۰۸۲

* N.D = غیرقابل تشخیص

باتوجه به این‌که از پساب این تصفیه‌خانه برای آبیاری سبزیجات استفاده می‌شود، ابتدا باید ضریب جذب خاک در گیاهان خشک را در فلزات سرب و کادمیوم در سه حالت میانگین، حداکثر و حداقل اعداد ضرب نموده و سپس باتوجه به این‌که سبزیجات از راه بلع وارد بدن می شود ضریب Absorbed در همان غلظت مجددا در سه حالت میانگین، حداکثر و حداقل اعداد ضرب شود (جدول ۲).

جدول ۲- ضرایب جذب پساب به گیاه خشک و دستگاه گوارش برای سرب و کادمیوم

ضریب (فارسی)	ضریب (لاتین)	سرب	کادمیوم
ضریب جذب پساب به گیاه خشک	Soil to dry plant uptake factor	۰/۰۴۵	۰/۰۵
ضریب جذب از طریق بلع (دستگاه گوارش)	Absorbed in gastrointestinal tract	۰/۵	۰/۰۲۵

نتایج جدول ۲ نشان داد که با استفاده از فرمول (۱)، میزان میانگین غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در پساب به‌ترتیب معادل ۰/۰۰۳۹۴۳۵۴۷ و ۰/۰۰۰۱۴۳۵۷۱ میلی‌گرم بر لیتر است.

$$C_{mean} = C_{Pb\ average} \times 0.45 \times 1 = 0.0039435\ 47\ (mg/L) \quad (۱)$$

که C_{mean}: میزان میانگین غلظت بعد از اعمال ضریب جذب و $C_{Pb\ average}$: میزان میانگین غلظت سرب قبل از اعمال ضریب جذب می باشد.

در این مطالعه میزان حداقل و حداکثر غلظت فلزات سنگین در پساب برای دو عنصر سرب و کادمیم اندازه‌گیری شد. براساس نتایج به‌دست آمده، میزان حداکثر غلظت فلزات سنگین سرب کادمیوم در پساب به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۶۲۲۳۵ و ۰/۰۰۰۳۳۶۲۵ میلی‌گرم بر لیتر است. میزان حداقل غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در پساب نیز به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۱۳۲۳ و ۰/۰۰۰۰۲۸۷۵ میلی‌گرم بر لیتر است.

باتوجه به این‌که ضریب جذب سرب در بزرگسالان بین ۱۰-۱۵٪ است، لذا با اعمال ضریب ۱۵٪ مجددا مقادیر غلظت سرب در سه حالت میانگین، حداکثر و حداقل محاسبه می‌شود.

جدول ۳ پس از اعمال ضریب ۱۵٪، میزان جذب آلاینده سرب از گیاه خشک در دستگاه گوارش را نشان می‌دهد. با استفاده از فرمول (۲)، که ضریب درصد جذب سرب در بزرگسالان را محاسبه می کند، میزان میانگین غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در پساب به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۰۵۹۱۵۳۲ و ۰/۰۰۰۱۴۳۵۷۱ میلی‌گرم بر لیتر است.

$$C_{mean} = C_{Pb\ average} \times 0.45 \times 1 \times 0.15 = 0.000591532\ (mg/L) \quad (۲)$$

همچنین میزان حداکثر غلظت فلزات سنگین سرب و

کادمیوم در پساب به‌ترتیب معادل ۰/۰۰۰۹۳۳۵۲۵ و ۰/۰۰۰۳۳۶۲۵ میلی‌گرم بر لیتر است. میزان حداقل غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در پساب نیز به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۰۱۹۸۴۵ و ۰/۰۰۰۰۲۸۷۵ میلی‌گرم بر لیتر است.

جدول ۳- محاسبه غلظت سرب و کادمیوم در سه حالت میانگین، حداکثر و حداقل

حالت	سرب				کادمیوم	
	میزان غلظت پس از اعمال ضریب جذب (mg/L)	ضریب جذب سرب در بزرگسالان (mg/L)	بعد از اعمال ضرایب C (mg/L)	قبل از اعمال ضرایب C (mg/L)	بعد از اعمال ضرایب C (mg/L)	قبل از اعمال ضرایب C (mg/L)
میانگین	۰/۰۰۰۵۹۱۵۳۲	۰/۱۵	۰/۰۰۳۹۴۳۵۴۷	۰/۰۸۷۶۳۴۳۷۵	۰/۰۰۰۱۴۳۵۷۱	۰/۰۱۱۴۸۵۷۱۴
حداکثر	۰/۰۰۰۹۳۳۵۲۵	۰/۱۵	۰/۰۰۶۲۲۳۵	۰/۱۳۸۳	۰/۰۰۰۳۳۶۲۵	۰/۰۲۶۹
حداقل	۰/۰۰۰۱۹۸۴۵	۰/۱۵	۰/۰۰۱۳۲۳	۰/۰۲۹۴	۰/۰۰۰۰۲۸۷۵	۰/۰۰۲۳

۲-۲- مشخصات فلزات مورد استفاده

۲-۲-۱- کادمیوم

کادمیوم از فلزات سمی، خطرناک و سرطان‌زای موجود در محیط‌زیست است. این فلز بر بافت‌های مختلف بدن از جمله کلیه‌ها و کبد تأثیر سوء دارد. کادمیوم قادر است که به‌طرز جبران ناپذیری صدمات کلیوی به بزرگسالان وارد نماید. هم‌چنین غلظت غیر مجاز کادمیوم باعث بروز بیماری های شدید گوارشی می‌شود. غلظت کشنده حاد خوراکی کادمیوم برای انسان ثبت نشده است (Biggs and Jiang, 2009; Dadban Shahamat et al., 2017).

۲-۲-۲- سرب

سرب از طریق پوست، دستگاه گوارش و تنفس جذب می‌شود. مهم‌ترین راه های ورود سرب به بدن تنفس و پس از آن گوارش است. هیچ‌گونه عملکرد مثبتی در بدن نداشته به‌گونه‌ای که در غلظت‌های پایین سبب کاهش فعالیت آنزیم پروفوبیلینوژن سنتاز و در غلظت‌های بالا سبب عقب‌ماندگی ذهنی در کودکان، کم‌خونی، اختلال شنوایی، کلیوی-کبدی و سیستم ایمنی بدن، کاهش وزن هنگام تولد، سقط جنین و زایمان پیش از موعد می‌شود. وجود سرب در خون و ادرار از رایج‌ترین نشانه های آلودگی به این عنصر است. عمده منبع ورودی سرب به محیط‌زیست ناشی از فعالیت‌های انسانی است (Carrow et al., 2008; Martinez et al., 2011; Palese et al., 2009).

در محاسبات این مطالعه فرض بر این بوده است که اثر فلزات سنگین (سرب و کادمیوم) و میزان آن آلاینده در پساب خروجی تصفیه‌خانه شهری و سنجش میزان دریافت دوز آلاینده به سبزیجات به‌واسطه دریافت پساب است.

از آن‌جایی‌که ارزیابی تماس با آلاینده‌ها برای انسان از طریق بلع باتوجه به خوردن سبزیجات صورت می‌گیرد این مورد لحاظ شد. هم‌چنین با توجه به پارامترها و فلزات مورد بررسی، ارزیابی اثرات غیر سرطانی برای فلزات صورت پذیرفت. در خصوص سرب نیز با توجه به فاکتور شیب سرطان باید ارزیابی ریسک سرطانی انجام شود.

بعد از مشخص شدن غلظت جذب در دستگاه گوارش باید نسبت به محاسبه غلظت آلاینده دریافت شده از طریق بلع که CDI نام دارد برای دو حالت غیر سرطانی وسرطانی برای گروه بزرگسال اقدام نمود. فرمول (۳) محاسبه CDI غیرسرطانی را نشان می‌دهد. جدول ۴ پارامترها و مقادیر مورد نیاز در محاسبه CDI را مشخص می‌نماید.

$$CDI = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{At \times BW} \quad \left(\frac{\text{mg}}{\text{Kg}}.\text{day}\right) \qquad (۳)$$

جدول ۴- مقادیر موردنیاز در محاسبه CDI غیرسرطانی

مقدار	نماد	کمیت	مورد نیاز
سرانه میزان مصرف سبزیجات	IR	(gr/day)	۸۲
فرکانس در معرض قرارگیری (برحسب روز)	EF	(day)	۳۶۵
طول مدت در معرض قرارگیری (برحسب سال)	ED	(year)	۶۰
طول مدت عمر	BW adult	(year)	۷۰
وزن بدن بزرگسال (برحسب کیلوگرم)		(kg)	۷۰
مدت زمان در معرض قرارگیری (برحسب روز-سرطانی)	AT = (365 × 70)	(day)	۲۵۵۵۰
مدت زمان در معرض قرارگیری (برحسب روز-غیرسرطانی)	AT = (365 × 70)	(day)	۲۱۹۰۰

۳- نتایج

در این تحقیق دو فلز شاخص کادمیم و سرب مورد بررسی قرار گرفتند. با استفاده از جدول ۴ و فرمول (۳) غلظت آلاینده دریافت شده از طریق بلع برای دوحالت سرطانی و غیر سرطانی بررسی شد. با مشخص شدن مقادیر CDI غیرسرطانی برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز، نتایج محاسبه در جدول ۵ ارائه شده است.

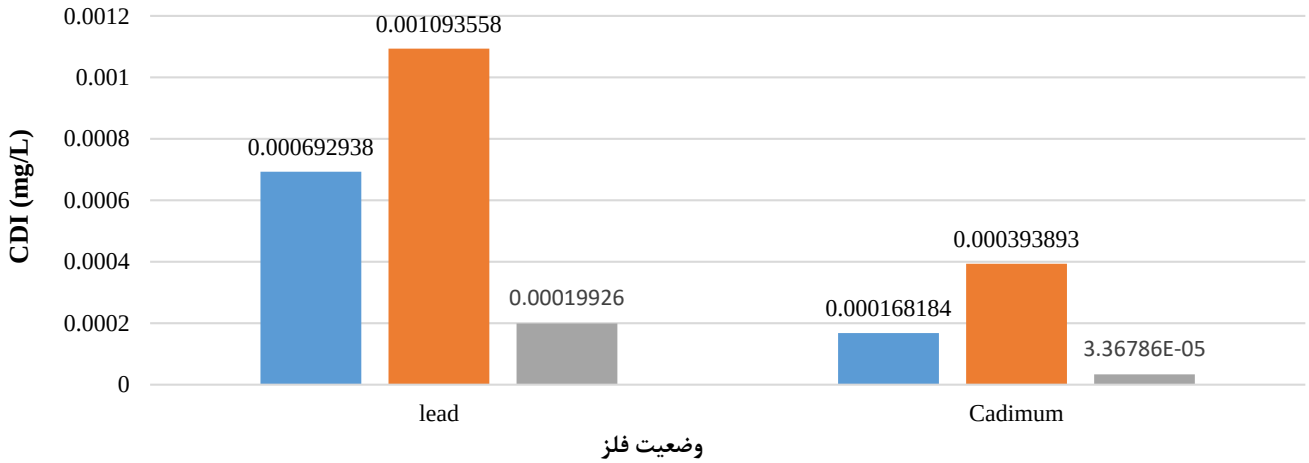
محاسبه CDI غیرسرطانی و مشخص کردن میزان دوز مرجع (حد آستانه بلع) نتایج از طریق سایت RAIS و سازمان حفاظت محیط‌زیست امریکا به شرح جدول ۶ است. در شکل ۲، نمودار CDI برای سه حالت حداقل (خاکستری)، حداکثرم (نارنجی) و میانگین (آبی) نشان داده شده است. فرمول (۴) CDI غیرسرطانی را نشان می‌دهد.

جدول ۵- محاسبه CDI غیرسرطانی در بزرگسالان در سه حالت میانگین، حداکثر و حداقل

	حداقل	حداکثر	میانگین
Lead	۰/۰۰۰۰۱۹۹۲۶	۰/۰۰۱۰۹۳۵۵۸	۰/۰۰۰۶۹۲۹۳۸
Cadmium	۳/۳۶۷۸۶E-05	۰/۰۰۰۳۹۳۸۹۳	۰/۰۰۰۱۶۸۱۸۴

$$CDI_{Pb\,mean} = \frac{C_{Pb\,mean} \times IR \times EF \times ED}{AT \times BW} = \frac{0.000591532 \times 82 \times 365 \times 60}{21900 \times 60} = 0.000692938 \left(\frac{\text{mg}}{\text{Kg}}.\text{day}\right) \quad (۴)$$

پارامترهای فرمول (۴) بر پایه پارامترهای ذکر شده در جدول ۴ هستند. نتایج جدول ۲ نیز نشان می‌دهد میزان غلظت دوز سرطانی و غیرسرطانی در سرب برای سه حالت حداقل، حداکثر و میانگین از کادمیوم بیشتر بوده است.



شکل ۲- نمودار CDI برای سه حالت حداقل (خاکستری)، حداکثر (نارنجی) و میانگین (آبی)

باتوجه به نیاز محاسبات اثرات غیر سرطانی و سرطانی فلزات سرب و کادمیوم موارد ذیل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد:

الف) ارزیابی اثرات غیر سرطانی: حد آستانه بلع[1] (RFD) (mg/Kg.day)

ب) ارزیابی اثرات سرطانی: فاکتور شیب سرطان[2] (CSF) (mg/Kg.day)

جدول ۶- منابع مرجع برای علائم حاد فلزات کادمیوم و سرب (Shahamat et al., 2016)

آنالیز	دوز مراجع مزمن خوراکی (mg/kg-day)	مراجع مزمن خوراکی مرجع دوز	دوز مرجع خوراکی نیمه مزمن (میلی‌گرم/کیلوگرم در روز)	فاکتور شیب خوراکی (mg/kg-day)	مرجع فاکتور شیب دهانی	زیر حد آستانه بلع	مرجع زیر حد آستانه بلع	حد آستانه بلع سرطانی	
کادمیم	۰/۰۰۱	IRIS	۰/۰۰۰۵	-	-	۰/۰۰۰۵	RAIS	۰/۰۰۱	RAIS
سرب	۰/۰۰۴	CALEPA	-	۰/۰۰۸۵	CALEPA	-	-	۰/۰۰۴	RAIS

باتوجه به جدول ۶، براساس منابع مرجع در سایت ایریس مشخص شد که مقادیری برای علایم حاد برای فلزات کادمیوم و سرب و درحالت نیمه مزمن تنها برای کادمیوم اطلاعات موجود است. بنابراین برای به‌دست آوردن مخاطره به‌روش مزمن و نیمه مزمن محاسبات به‌روش ذیل انجام شده است.

الف) غیرسرطانی:

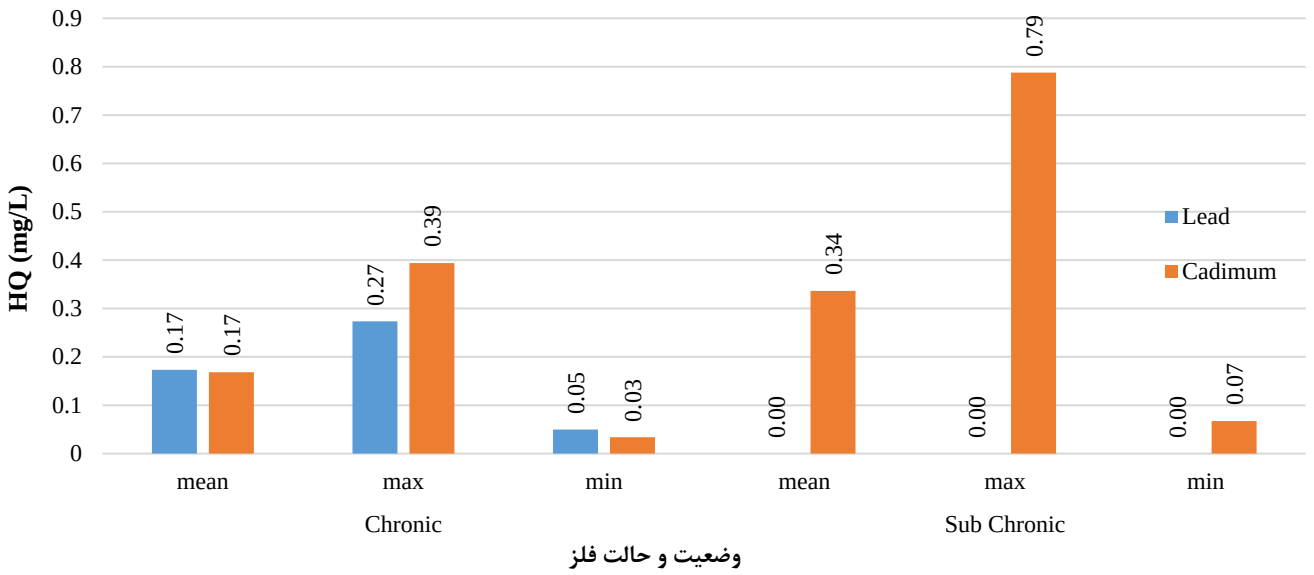
در مرحله غیرسرطانی میزان خطر را باید برای فلزات محاسبه کرد، که به‌طور مثال برای یک نمونه محاسبه شده است. جدول ۷ محاسبه HQ غیرسرطانی درحالت‌های Chronic و Sub Chronic را نشان می‌دهد. در شکل ۳، نمودار HQ غیرسرطانی در حالت Chronic و Sub Chronic در سه حالت میانگین، حداقل و حداکثر، نشان داده شده است. فرمول (۵)، میزان خطر فلزات را در مرحله غیر سرطانی محاسبه می‌کند.

$$HQ_{Pb\ mean} = \frac{CDI_{Pb\ mean}}{RFD} = \frac{0.000692938}{0.004} = 0.173234381 \quad (۵)$$

که HQ: میزان نسبت خطر، RFD: حد آستانه بلع و CDI: غلظت آلاینده دریافت شده از طریق بلع هستند.

جدول ۷- محاسبه میزان نسبت ریسک فلز درحالت Chronic و Sub Chronic

میزان نسبت ریسک فلز	مزمن			نیمه مزمن		
	میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل
سرب	۰/۱۷۳۲۳۴۳۸۱	۰/۲۷۳۳۸۹۴۶۴	۰/۰۴۹۸۱۵	۰	۰	۰
کادمیم	۰/۱۶۸۱۸۳۶۷۳	۰/۳۹۳۸۹۲۸۵۷	۰/۰۳۳۶۷۸۵۷۱	۰/۳۳۶۳۶۷۳۴۷	۰/۷۸۷۷۸۵۷۱۴	۰/۰۶۷۳۵۷۱۴۳



شکل ۳- نمودار HQ غیر سرطانی در حالت Chronic و Sub Chronic

باتوجه به مقدار خطر محاسبه شده در بزرگسالان به‌صورت مزمن و نیمه مزمن، مشخص شد مقدار خطر برای عناصر در سه حالت میانگین، حداقل و حداکثر برای بزرگسالان بالای یک نیست. هم‌چنین برای به‌دست آوردن میزان مخاطرات برای بزرگسالان، باید مجموع خطرها را در دو عنصر مزمن و نیمه مزمن محاسبه نمود. فرمول (۶) مجموع خطرات دو عنصر را درحالت غیر سرطانی محاسبه می‌کند. جدول ۸ نتایج محاسبه Hi غیرسرطانی درحالت‌های Chronic و Sub Chronic را نشان می‌دهد. در شکل ۴، نمودار Hi غیرسرطانی در حالت‌های Chronic و Sub Chronic نشان داده شده است.

$$Hi\ (mean) = HQ_{Pb\ mean} + HQ_{Cd\ mean} = 0.173234381 + 0.168183673 = 0.341418054 \quad (۶)$$

که Hi: مجموع خطرات محاسبه شده در بزرگسالان را نشان می‌دهد (در این‌جا مجموع خطرات دو عنصر سرب و کادمیم).

باتوجه به شکل ۴، مخاطرات عناصر کادمیوم و سرب در حالت مزمن و نیمه مزمن کمتر از یک ($Hi < 1$) است.

جدول ۸- محاسبه مجموع خطرات عناصر (*Hi*) درحالت **Chronic** و **Sub Chronic** غیرسرطانی

مجموع خطرات	مزمن			نیمه مزمن		
	میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل
کادمیم + سرب	۰/۳۴۱۴۱۸۰۵۴	۰/۶۶۷۲۸۲۳۲۱	۰/۰۸۳۴۹۳۵۷۱	۰/۳۳۶۳۶۷۳۴۷	۰/۷۸۷۷۸۵۷۱۴	۰/۰۶۷۳۵۷۱۴۳

ب) سرطانی:

در مرحله سرطانی باید میزان خطر را برای فلزات محاسبه کرد. به‌طور مثال با استفاده از فرمول (۷) برای یک نمونه محاسبه شده است. جدول ۹ محاسبه CDI سرطانی در بزرگسالان را نشان داده است. هم‌چنین در شکل ۵ نیز، نمودار مقادیر CDI برای فلز سرب ارائه شده است.

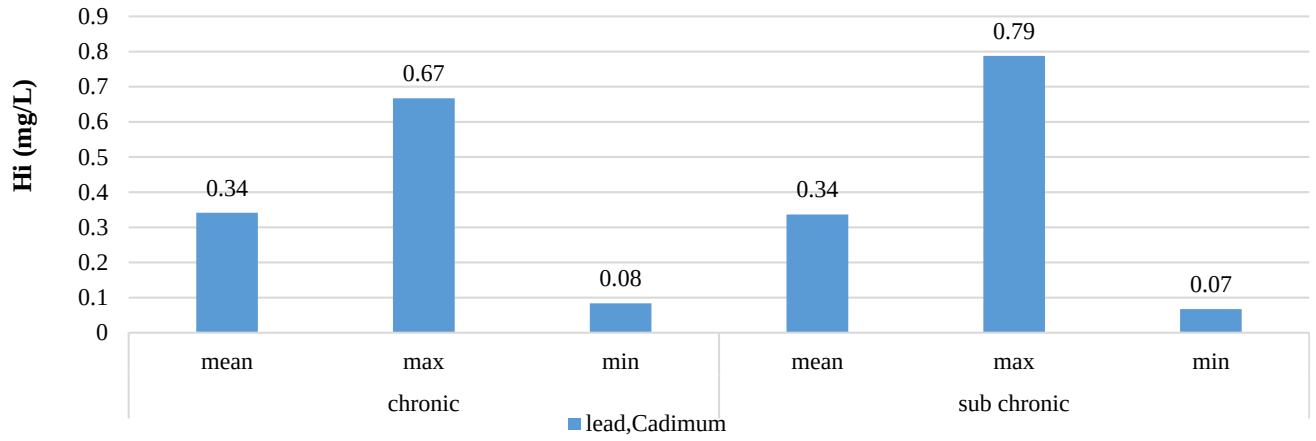
$$CDI_{Pb\ mean} = \frac{C(Pb\ mean) \times IR \times EF \times ED}{At \times BW} \quad (۷)$$

$$= \frac{\frac{0}{000591532} \times 82 \times 365 \times 60}{25550 \times 70}$$

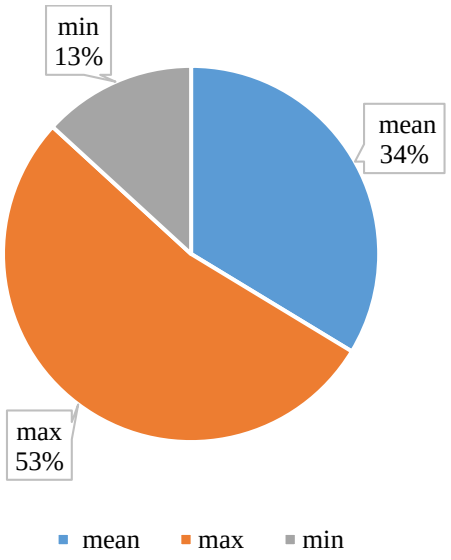
$$= 0.000593946\ \ (\mathrm{mg/Kg.day})$$

جدول ۹- محاسبه **CDI** سرطانی در بزرگسالان

CDI	میانگین	حداکثر	حداقل
Lead	۰/۰۰۰۵۹۳۹۴۶	۰/۰۰۰۹۳۷۳۳۵	۰/۰۰۰۲۳۲۴۷



شکل ۴- نمودار *Hi* غیر سرطانی در حالت‌های **Chronic** و **Sub Chronic**



شکل ۵- نمودار مقادیر **CDI** برای فلز سرب

باتوجه به این‌که فاکتور شیب سرطان (CSF) تنها برای فلز سرب موجود است، لذا باید مقدار تماس با آلاینده سرب را به‌روش سرطانی با داشتن دوز مرجع (CSF = 0.0085) به‌دست آورد. سپس میزان ریسک را برای بزرگسالان محاسبه و بر طول عمر بزرگسالان (۷۰) تقسیم و نتایج را در جمعیت کل بزرگسال ضرب کرد. جدول ۱۰ ضریب شیب سرطانی را نشان می‌دهد. فرمول (۸) میزان ریسک را از طریق غلظت آلاینده دریافت شده از طریق بلع درغلظت آلاینده نشان می‌دهد.

جدول ۱۰- مقادیر ضریب شیب سرطانی (CSF)

فلز	سرب	کادمیم
ضریب شیب سرطانی	۰/۰۰۸۵	N.d

جدول ۱۱ میزان ریسک سرطانی مصرف سبزیجات آغشته به سرب را نشان می‌دهد. با استفاده از فرمول (۸) محاسبه مقدار تماس با آلاینده به‌شرح جدول ۱۱ خواهد بود.

$$Risk = CDI \times C \quad (۸)$$

جدول ۱۱- میزان ریسک سرطانی مصرف سبزیجات آغشته به سرب

ریسک - جمعیت	میانگین	حداقل	حداکثر
برای ۷۰ سال- جمعیت بزرگسال	۵/۰۴۸۵۴E-۰۶	۱/۹۷۶E-۰۶	۷/۹۶۷۳۵E-۰۶
برای یک‌سال- جمعیت بزرگسال	۷/۲۱۲۲۱E-۰۶	۲/۸۲۲۸۵E-۰۸	۱/۱۳۸۱۹E-۰۷
ریسک اضافی سالانه	۰/۰۱۸۹۳۲۰۴۳	۰/۰۰۷۴۰۹۹۸۱	۰/۰۲۹۸۷۷۵۶۳

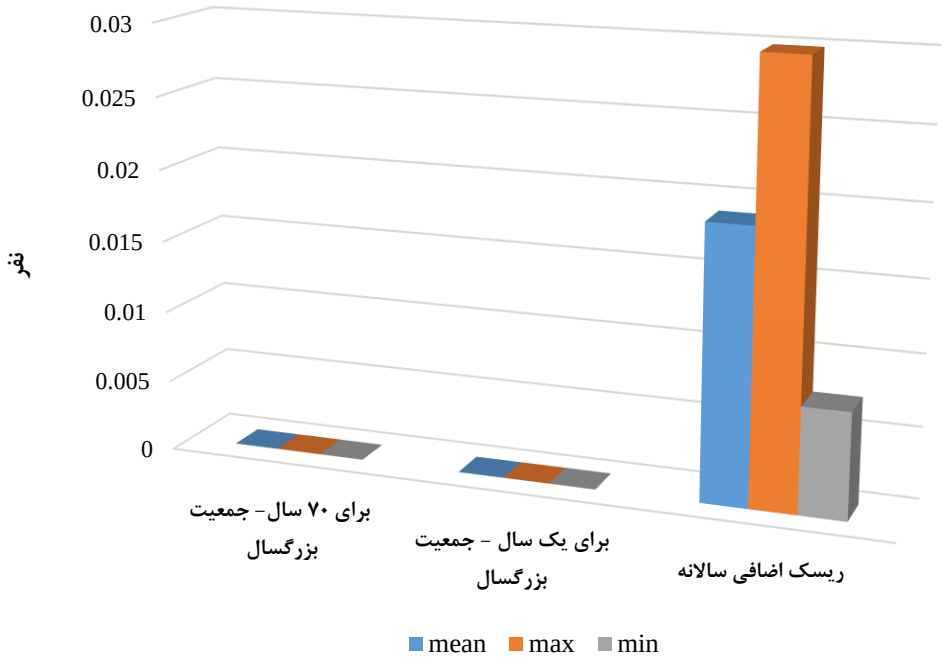
طبق آمار سرشماری سال ۱۳۹۵ جمعیت گرگان بالغ بر ۳۵۰ هزار نفر است که مبنای ۷۵٪ (۲۶۲۵۰۰ نفر) برای جمعیت بزرگسال درنظر گرفته شده است. در شکل ۶، ریسک سرطانی مصرف سبزیجات آغشته به Lead نشان داده شده است.

فرمول‌های (۹) تا (۱۱) ریسک سرطانی مصرف سبزیجات آغشته به سرب را برای شهر گرگان نشان می‌دهد. میزان ریسک براساس میزان خطر برای فلزات در ضریب ریسک سرطانی به‌دست می آید. بعد از آن با توجه به این‌که برای جمعیت بزرگسال محاسبه شده، تا سن ۷۰ سال برآورد شده است. بعد از آن برای ریسک اضافی سالانه نیز محاسبه شد.

$$Risk_{mean} = CDI_{mean} \times CSF = 0.148486612 \times 0.0085 = 5.04854E\text{-}6 \quad (۹)$$

$$\text{Risk}_{\text{mean}} = \text{Risk}_{\text{mean}}/70 = 5.04854\ \text{E-}\ 6\ /\ 70 = 7.21221\text{E-}8 \quad (۱۰)$$

$$The\ Annual\ Extra\ Risk_{mean} = 7E\text{-}8 \times 26250 \quad (۱۱)$$
$$0.018932043$$



شکل ۶- ریسک سرطانی مصرف سبزیجات آغشته به سرب

۴- نتیجه‌گیری

سرب و کادمیوم از مهم‌ترین عناصر سنگین و سمی هستند که از طریق خوردن آب و غذا و از راه تنفس وارد بدن می‌شود. به‌محض بلعیدن، این فلز با بیومولکول‌های بدن مانند پروتئین‌ها و آنزیم‌ها به‌شکل ترکیبات بیوتوکسیک پایدار در می‌آید. در نتیجه، ساختار آن‌ها تغییر کرده و فعل و انفعالات زیستی آن‌ها با مشکل مواجه می‌شود. آلودگی سرب باعث جلوگیری از سنتز هموگلوبین، آسیب به عملکرد کلیه‌ها، سیستم باروری، مفاصل، سیستم قلبی‌عروقی، آسیب حاد و مزمن به سیستم عصبی مرکزی و سیستم عصبی جانبی می‌شود.

نتایج این پژوهش در راستای سایر پژوهش‌هایی بوده که نشان داد غلظت فلزات سرب و کادمیوم در حد استاندارد (می‌توان گفت در سطح بین‌المللی) قرار دارد. هم‌چنین نتایج این پژوهش از نظر بازه مقدار عددی ریسک سرطانی با پژوهش‌های Sarvestani and Aghasi (2019)، Korte et al. (2020) و Boev et al. (2019) تطبیق دارد.

در آب تصفیه شده که برای آبیاری گیاهان استفاده می‌شود و انسان از آن استفاده می‌کند، سمیت سرب باعث رشد ضعیف سلول‌های خاکستری مغز و در نتیجه بهره هوشی کم می‌شود. هم‌چنین سمیت حاد و مزمن سرب باعث بروز بیماری‌های روانی می‌شود. درنهایت موارد زیر از انجام این پژوهش مشخص شد:

- در حالت میانگین، به‌ازای هر یک‌صد میلیون نفر تعداد ۷/۲۱ نفر در معرض ریسک سرطانی قرار دارند.
- در حالت حداکثر، به‌ازای هر ده میلیون نفر تعداد ۱/۱۳ نفر در معرض ریسک سرطانی قرار دارند.
- در حالت حداقل، به‌ازای هر یک‌صد میلیون نفر تعداد ۲/۸۲ نفر در معرض ریسک سرطانی قرار دارند.

۵- تقدیر و تشکر

از شرکت آب و فاضلاب و تصفیه‌خانه شهر گرگان که نهایت همکاری را با نویسندگان این مقاله داشتند تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- پی‌نوشت‌ها

1- Refrence Dose (RFD)
2- Cancer Slope Factor (CSF)

۷- مراجع

بینا، ب.، موحدیان عطار،ح.، و امینی، ا. ع.، (۱۳۸۳)، "بررسی کیفیت لجن خشک‌شده تصفیه‌خانه‌های فاضلاب اصفهان و کاربرد آن برای مصارف مختلف"، *مجله آب و فاضلاب*، ۱۵(۱)، ۳۴-۴۲.

چوپان، ی.، و امامی، س.، (۱۳۹۹)، "بررسی امکان‌سنجی بهره‌گیری از پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری تربت‌حیدریه برای آبیاری محصولات کشاورزی"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۵(۱)، ۳۹-۴۵.

سلیمی، ف.، سلیمی، ج.، و گل محمدی، ف.، (۱۳۹۸)،" مروری برکاربردهای جاذب‌ها برای حذف ترکیبات فنولی از پساب"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۴(۴)، ۱۶-۳۳.

سواری، ج.، جعفرزاده حقیقی فرد، ن.، حسنی، ا.ح.، و شمس آبادی، ق.، (۱۳۸۶)، "بررسی پتانسیل نشت فلزات سنگین و خوردگی در شبکه توزیع آب آشامیدنی شهر اهواز"، *آب و فاضلاب*، ۱۸، ۴(۶۴)، ۱۶-۲۴.

قاسمی، ز.، کریمیان، ع. ا.، عظیم زاده، ح. ر.، و سودایی زاده، ح.، (۱۳۹۷)، "تأثیر آبیاری با فاضلاب بر برخی خصوصیات فیزیولوژیکی و مرفولوژیکی رزماری (مطالعه موردی: فاضلاب شهر یزد)". *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۳(۳)، ۲۹-۳۸.

کریم پور، م.، و شریعت، م.، (۱۳۷۹)، "بررسی مقدار فلزات سنگین در شبکه آب آشامیدنی شهر همدان"، *نشریه دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی همدان*، ۳(۱۷)، ۴۴-۴۷.

میران‌زاده، م.، محمودزاده، ع.،حسن‌زاده، م.، و بیگدلی، م.، (۱۳۹۰)، "بررسی غلظت فلزات سنگین در شبکه نوزیع آب شهر کاشان در سال ۱۳۸۹"، *مجله سلامت و بهداشت اردبیل*، ۲(۳)، ۵۶-۶۶.

نبوی، س. ر.، و فهادی، م.، (۱۳۹۷)، "مروری بر حذف آلاینده‌های دارویی از پساب توسط فرآیندهای ازن‌زنی و اکسایش پیشرفته"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۳(۴)، ۵-۱۷.

Asgharnia, H., Jafari, A.J., Kalantary, R.R., Nasseri, S., Mahvi, A., Yaghmaeian, K., Esrafili, A., and Shahamat, Y.D., (2014), "Influence of bioaugmentation on biodegradation of phenanthrene-contaminated soil by earthworm in lab scale", *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(1), 1-7.

Biggs, T.W., and Jiang, B., (2009), "Soil salinity and exchangeable cations in a wastewater irrigated area, India", *Journal of Environmental Quality*, 38(3), 887-896.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.

Boev, V.M., Kryazheva, E.A., Begun, D.N., Borshchuk, E.L., and Kryazhev, D.A., (2019), "Hygienic assessment of population health risks caused by combined oral introduction of heavy metals", *Health Risk Analysis*, 2019(2), 35-43.

Carrow, R., Duncan, R.R., and Huck, M.T., (2008), *Turfgrass and landscape irrigation water quality: Assessment and management*, CRC Press.

Dadban Shahamat, Y., Sangbari, N., Zafarzadeh, A., and Beirami, S., (2017), "Heavy metal contamination in the effluent and sludges of wastewater treatment plant in Gorgan, Iran", *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*, 27(150), 158-169.

Kortei, N.K., Heymann, M.E., Essuman, E.K., Kpodo, F.M., Akonor, P.T., Lokpo, S.Y., and Tettey, C., (2020), "Health risk assessment and levels of toxic metals in fishes (Oreochromis noliticus and Clarias anguillaris) from Ankobrah and Prabasins: Impact of illegal mining activities on food safety", *Toxicology Reports*, 7, 360-369.

Martinez, C.J., Clark, M.W., Toor, G.S., Hochmuth, G.J., and Parsons, L.R., (2011), "Accounting for the nutrients in reclaimed water for landscape irrigation", Institute of Food and Agricultural Sciences, Florida.

Muchuweti, M., Birkett, J., Chinyanga, E., Zvauya, R., Scrimshaw, M.D., and Lester, J., (2006), "Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: Implications for human health", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112(1), 41-48.

Mueller, J.T., and Gasteyer, S., (2021), "The widespread and unjust drinking water and clean water crisis in the United States", *Nature Communications*, 12(1), 1-8.

Nasrazadani, A., and Hoodaji, M., (2014), "Evaluation of the effect of an industrial wastewater sample on heavy metals contaminated soil", *Journal of Environmental Science and Technology*, 16(1), 437-450.

Palese, A., Pasquale, V., Celano, G., Figliuolo, G., Masi, S., and Xiloyannis, C., (2009), "Irrigation of olive groves in Southern Italy with treated municipal wastewater: Effects on microbiological quality of soil and fruits", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 129(1-3), 43-51.

Sarvestani, R.A., and Aghasi, M., (2019), "Health risk assessment of heavy metals exposure (lead, cadmium, and copper) through drinking water consumption in Kerman city, Iran", *Environmental Earth Sciences*, 78(24), 1-11.

Shahamat, Y.D., Zazouli, M.A., Asgharnia, H., and Dehghanifard, E., (2016), "Evaluation of rapid purification of high concentrations of 2, 4-dinitrophenol in wastewater using catalytic ozonation with carboneus nanocomposite", *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*, 25(133), 138-149.

Villar, L.D., and Garcia, O., (2002), "Solubilization profiles of metal ions from bioleaching of sewage sludge as a function of pH", *Biotechnology Letters*, 24(8), 611-614.