

Lead, Cadmium, and Arsenic in Instant Coffee Powder: Concentrations and Health Risk Assessment

Mohammad-Amin Heidarzadi *

Department of Food Hygiene, Faculty of Veterinary Medicine, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

(Corresponding

Author)

heidarzadi1373@gmail.com

Somayeh Tirbakhsh-Gouran Department of Biology, Faculty of Basic Sciences, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran.

Najmeh Vahed-Dehkordi

Department of Food Hygiene, Faculty of Veterinary Medicine, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran.

Seyedeh-Khadijeh

Ahmadi-

Sheikhshabani

Department of Food Hygiene, Faculty of Veterinary Medicine, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

Abstract

Background and Objective: Coffee may be contaminated with toxic metals during production and distribution. This study aimed to determine lead (Pb), cadmium (Cd), and arsenic (As) concentrations in instant coffee powder marketed in Isfahan, Iran, and assess the potential health risks associated with consumption.

Materials and Methods: In this descriptive-analytical study, 50 instant coffee powder samples were randomly collected from five stores in Isfahan. Metal concentrations were measured using atomic absorption spectrophotometry (AAS). Data normality was assessed using the Shapiro–Wilk test. Health risks were evaluated using estimated daily intake (EDI), target hazard quotient (THQ), hazard index (HI), and incremental lifetime cancer risk (ILCR). The baseline scenario assumed a daily consumption of 15 g of coffee and a body weight of 70 kg. Sensitivity analysis considered consumption rates of 15, 30, and 45 g/day and mean, 95th-percentile, and maximum measured concentrations.

Results: Mean Pb, Cd, and As concentrations were 0.03988, 0.02432, and 0.04060 mg/kg, respectively. THQ and HI values were below 1, with arsenic contributing most to the estimated non-carcinogenic risk. Arsenic and cadmium contributed more substantially to the estimated carcinogenic risk.

Conclusion: The findings indicate potential exposure to the investigated metals through the analyzed coffee samples. However, risk estimates depend on consumption assumptions and toxicological parameters. Because metal transfer from coffee powder to the prepared beverage was not directly measured, definitive conclusions about consumption safety cannot be drawn. Continued monitoring of metal contamination in coffee is recommended.

Keywords: Coffee; Heavy Metals; Health Risk Assessment; Atomic Absorption Spectrometry

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Received: 2026/02/22

Accepted: 2026/06/21

Doi:10.22038/jreh.2026.99052.1763

► **Citation:** Heidarzadi M.A, Tirbakhsh-Gouran S, Vahed-Dehkordi N, Ahmadi-Sheikhshabani S.K.H. Lead, Cadmium, and Arsenic in Instant Coffee Powder: Concentrations and Health Risk Assessment. *Journal of Research in Environmental Health*. 12(2):92-106.

غلظت سرب، کادمیوم و آرسنیک در پودر قهوه فوری و ارزیابی خطر سلامت مرتبط با مصرف آن

محمدامین حیدرزادی

* دانشجوی دکتری تخصصی، گروه بهداشت مواد غذایی، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. (نویسنده مسئول)
heidarzadi1373@gmail.com

سمیه تیربخش‌گوران

گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران.

نجمه واحددهکردی

گروه بهداشت مواد غذایی، دانشکده دامپزشکی، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران.

سیده خدیجه احمدی‌شیخ‌شبان

دانشجوی دکتری تخصصی، گروه بهداشت مواد غذایی، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

چکیده

زمینه و هدف: قهوه ممکن است در مراحل تولید و عرضه به فلزات سمی آلوده شود. این مطالعه با هدف تعیین غلظت سرب (Pb)، کادمیوم (Cd) و آرسنیک (As) در پودر قهوه فوری عرضه‌شده در شهر اصفهان و ارزیابی خطر بالقوه سلامت ناشی از مواجهه با این فلزات انجام شد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه توصیفی-تحلیلی، ۵۰ نمونه پودر قهوه فوری از پنج فروشگاه در شهر اصفهان به روش تصادفی جمع‌آوری شد. غلظت فلزات با استفاده از طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS) اندازه‌گیری شد. ارزیابی خطر سلامت بر اساس دریافت روزانه تخمینی (EDI)، ضریب خطر هدف (THQ)، شاخص خطر تجمعی (HI) و خطر سرطان‌زایی مادام‌العمر (ILCR) انجام گرفت. در سناریوی پایه، مصرف روزانه ۱۵ گرم قهوه و وزن بدن ۷۰ کیلوگرم در نظر گرفته شد. همچنین، تحلیل حساسیت با سناریوهای مصرف ۱۵، ۳۰ و ۴۵ گرم در روز و با استفاده از میانگین، صدک ۹۵ و حداکثر غلظت اندازه‌گیری‌شده انجام شد.

یافته‌ها: میانگین غلظت سرب، کادمیوم و آرسنیک به‌ترتیب ۰/۰۳۹۸۸، ۰/۰۲۴۳۲ و ۰/۰۴۰۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. مقادیر THQ و HI کمتر از یک گزارش شدند و آرسنیک بیشترین سهم را در خطر غیرسرطان‌زایی داشت. در ارزیابی سرطان‌زایی، آرسنیک و کادمیوم سهم قابل‌توجه‌تری داشتند.

نتیجه‌گیری: نتایج، مواجهه بالقوه با فلزات مورد بررسی را در نمونه‌های مطالعه نشان داد؛ با این حال، تفسیر خطر به مفروضات مصرف و پارامترهای سم‌شناختی وابسته است. با توجه به اندازه‌گیری فلزات در پودر قهوه و بررسی‌نشدن مستقیم انتقال آن‌ها به نوشیدنی، نتیجه‌گیری قطعی درباره ایمنی مصرف امکان‌پذیر نیست. پایش مستمر آلودگی فلزی قهوه توصیه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: قهوه، فلزات سنگین، ارزیابی ریسک سلامت، طیف‌سنجی جذب اتمی

◀ **استناد:** حیدرزادی م. ا.، تیربخش‌گوران س.، واحددهکردی ن.، احمدی‌شیخ‌شبان س.خ. غلظت سرب، کادمیوم و آرسنیک در پودر قهوه فوری و ارزیابی خطر سلامت مرتبط با مصرف آن. فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط. تابستان ۱۴۰۵؛ ۱۲(۲): ۹۲-۱۰۶.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۱

نوع مقاله: پژوهشی

قهوه یکی از پرمصرف‌ترین نوشیدنی‌های جهان است و نقش مهمی در الگوی مصرف غذایی جوامع مختلف دارد. بر اساس گزارش سازمان بین‌المللی قهوه (ICO)^۱، مصرف جهانی قهوه در سال زراعی ۲۰۲۴/۲۰۲۵ حدود ۱۷۵/۱ میلیون کیسه ۶۰ کیلوگرمی برآورد شده است که نشان‌دهنده جایگاه گسترده این محصول در زنجیره غذایی جهانی است (۱). قهوه علاوه بر ویژگی‌های حسی مطلوب، حاوی ترکیبات زیست‌فعال متعددی مانند کافئین، اسیدهای کلروژنیک و پلی‌فنول‌ها است که سبب شده است این نوشیدنی از دیدگاه تغذیه، سلامت عمومی و ایمنی مواد غذایی مورد توجه قرار گیرد. با این حال، کیفیت و ایمنی قهوه تنها به ترکیبات مفید آن محدود نمی‌شود و عوامل مختلفی مانند شرایط کشت، ویژگی‌های خاک، منشأ جغرافیایی، فرآوری، برشته‌کاری و شرایط نگهداری می‌توانند بر ترکیب شیمیایی نهایی و احتمال حضور آلاینده‌های شیمیایی در این محصول تأثیرگذار باشند (۲).

بر اساس نتایج یک پژوهش متاآنالیز، مصرف منظم قهوه با کاهش معنی‌دار خطر ابتلا به بیماری کبد چرب غیرالکلی (Non-alcoholic fatty liver disease) NAFLD^۲ مرتبط بوده است (۲). در خصوص ارتباط بین مصرف منظم و متعادل قهوه و کاهش خطر ابتلا به سرطان به‌طور گسترده مطالعاتی انجام شده است. نتایج این مطالعات نشان‌دهنده وجود یک ارتباط معکوس میان مصرف قهوه و خطر بروز برخی از انواع سرطان‌ها را تایید می‌کند (۹-۳). با وجود مزایای بسیار، مصرف بیش از حد قهوه به شدت با ایجاد بیماری‌های قلبی مرتبط است (۱۰). مصرف بالای قهوه به‌ویژه انواع حاوی کافستول (جزء لیپیدی قهوه) با افزایش سطح کلسترول خون و تشدید خطر بیماری‌های قلبی-عروقی مرتبط است (۱۱). مطالعات نشان داده است که مصرف قهوه می‌تواند دفع کلسیم را افزایش دهد (۱۲-۱۴). مصرف بیش از حد قهوه هم‌چنین با کاهش جذب برخی مواد معدنی ازجمله آهن و روی مرتبط است (۱۵-۱۷). در یک مطالعه متاآنالیز (۱۸) گزارش شد مصرف بیش از ۳۰۰ میلی‌گرم کافئین در روز

با افزایش معنی‌دار خطر سقط جنین همراه است (۱۸) و در صورت زنده‌ماندن جنین در طول بارداری، از پیامدهای جدی ازجمله وزن کم هنگام تولد، عقب ماندگی ذهنی و اختلال در رشد جنین تأثیر به‌سزایی دارد (۱۹، ۲۰).

فلزات سنگین و عناصر سمی از مهم‌ترین آلاینده‌های شیمیایی در زنجیره غذا هستند، زیرا پایداری محیطی بالا، قابلیت ورود به بافت گیاه و ظرفیت ایجاد اثرات مزمن، آن‌ها را به موضوعی کلیدی در ایمنی غذایی تبدیل کرده است (۲۱). در میان این عناصر، سرب، کادمیوم و آرسنیک به‌طور ویژه مورد توجه قرار دارند، زیرا مواجهه طولانی‌مدت با آن‌ها می‌تواند با طیفی از اثرات نامطلوب ازجمله اختلالات عصبی، کلیوی، متابولیک، خونی و سرطان‌زایی همراه باشد (۲۲). ورود این عناصر به مواد غذایی می‌تواند از طریق آلودگی خاک، آب، کودهای کشاورزی، فرآیندهای تولید و تماس با تجهیزات فرآوری رخ دهد و در نهایت موجب افزایش مواجهه غذایی مصرف‌کنندگان شود (۲۳).

قهوه به‌عنوان یک محصول کشاورزی که مراحل متعددی از تولید، فرآوری، برشته‌کاری و آماده‌سازی را طی می‌کند، می‌تواند در معرض تجمع عناصر سمی قرار گیرد. مطالعات مختلف حضور فلزاتی مانند سرب، کادمیوم، آرسنیک و سایر عناصر معدنی را در دانه‌های قهوه و محصولات تجاری گزارش کرده‌اند (۲۴). در مطالعه‌ای بر روی قهوه، وجود فلزاتی مانند سرب و کادمیوم گزارش شد و تفاوت بین نمونه‌ها نشان داد که قهوه می‌تواند به‌عنوان حامل مقادیر متغیری از عناصر بالقوه سمی مطرح باشد. هم‌چنین در بررسی قهوه‌های بومی برشته‌شده، تفاوت معنی‌دار در غلظت فلزات بر اساس منشأ و ویژگی‌های نمونه مشاهده شد که بیانگر تأثیر مستقیم شرایط محیطی و فرآوری بر ترکیب نهایی محصول است (۲۵).

خطر سلامت ناشی از آلاینده‌ها نه تنها به غلظت آن‌ها، بلکه به میزان مواجهه، مقدار مصرف و ویژگی‌های جمعیت مصرف‌کننده وابسته است (۲۶). در این چارچوب، شاخص‌هایی مانند دریافت روزانه تخمینی (EDI^۳)، ضریب

^۱ International Coffee Organization

^۲ Non-alcoholic fatty liver diseases

^۳ Estimated Daily Intake

خطر هدف (THQ)^۱، شاخص خطر تجمعی (HI) و خطر سرطان‌زایی مادام‌العمر (ILCR) ابزارهایی کاربردی برای تفسیر سلامت‌محور داده‌های شیمیایی محسوب می‌شوند (۲۷). مزیت این شاخص‌ها آن است که امکان تمایز میان وجود آلاینده و وجود ریسک معنی‌دار را فراهم می‌کنند و در نتیجه، برای تصمیم‌گیری در حوزه سلامت عمومی و کنترل کیفیت مواد غذایی ارزش بالایی دارند (۲۸).

اگرچه مطالعات متعددی حضور عناصر بالقوه سمی در قهوه را بررسی کرده‌اند، بیشتر پژوهش‌ها بر تعیین غلظت فلزات تمرکز داشته‌اند و اطلاعات محدودی درباره تفسیر سلامت‌محور این داده‌ها از طریق ارزیابی مواجهه غذایی و شاخص‌های ریسک ارائه شده است. از آنجا که وجود یک آلاینده در ماده غذایی الزاماً به معنای ایجاد خطر برای مصرف‌کننده نیست، مطالعاتی که اندازه‌گیری آلاینده‌ها را با مدل‌های ارزیابی ریسک سلامت ترکیب می‌کنند، اطلاعات دقیق‌تری برای تصمیم‌گیری در حوزه ایمنی غذا فراهم می‌سازند. علاوه بر این، تفاوت در منشأ جغرافیایی، شرایط تولید و الگوی مصرف می‌تواند سبب تغییر در میزان مواجهه جمعیت‌های مختلف با فلزات موجود در قهوه شود؛ بنابراین، تولید داده‌های منطقه‌ای برای ارزیابی وضعیت ایمنی این محصول ضروری است (۶). بر همین اساس، مطالعه حاضر با هدف تعیین غلظت سرب (Pb)، کادمیوم (Cd) و آرسنیک (As) در نمونه‌های قهوه تجاری عرضه‌شده در شهرستان اصفهان و ارزیابی خطر سلامت ناشی از مصرف آن‌ها انجام شد. در این پژوهش، علاوه بر تعیین غلظت عناصر مورد مطالعه و بررسی ویژگی‌های آماری داده‌ها، شاخص‌های دریافت روزانه تخمینی (EDI)، ضریب خطر هدف (THQ)، شاخص خطر تجمعی (HI) و خطر سرطان‌زایی مادام‌العمر (ILCR) برای برآورد پیامدهای بالقوه ناشی از مواجهه مصرف‌کنندگان محاسبه گردید. نتایج این مطالعه می‌تواند اطلاعاتی درباره وضعیت آلودگی عناصر بالقوه سمی در قهوه‌های تجاری مورد بررسی و سطح خطر احتمالی ناشی از مصرف آن‌ها فراهم کند.

روش کار

در این مطالعه، تعداد ۵۰ نمونه پودر قهوه فوری به‌صورت فله‌ای و با روش نموداری تصادفی از ۵ فروشگاه عرضه این

محصولات در شهرستان اصفهان طی سه ماه فصل پاییز ۱۴۰۳، جمع‌آوری شد. در انتخاب نمونه‌ها، نام تجاری و کشور تولیدکننده به‌عنوان معیارهای محدودکننده در نظر گرفته نشد. نمونه‌ها پس از جمع‌آوری، در کیسه‌های پلی‌اتیلنی تمیز بسته‌بندی و به آزمایشگاه منتقل شدند. سپس، غلظت فلزات مورد بررسی در نمونه‌های پودر قهوه اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها به‌صورت فله‌ای عرضه می‌شدند و فاقد اطلاعات مشخص مربوط به برند تجاری بودند و تعمیم نتایج به کل بازار قهوه یا سایر مناطق جغرافیایی باید با احتیاط صورت گیرد؛ زیرا نمونه‌برداری به پنج فروشگاه در شهرستان اصفهان محدود بود.

اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین

به‌منظور تعیین غلظت فلزات سنگین سرب، کادمیوم و آرسنیک در نمونه‌های قهوه، از روش طیف‌سنجی جذب اتمی (Atomic Absorption Spectrophotometry; AAS) استفاده شد. نمونه‌ها پس از آسیاب و همگن‌سازی، مقدار ۱ گرم از هر نمونه توزین و تحت هضم اسیدی قرار گرفتند. بدین منظور، نمونه‌ها با مخلوط اسید نیتریک (HNO_3) و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) هضم شده و پس از تکمیل فرآیند هضم، محلول حاصل با آب دیونیزه به حجم نهایی رسانده شد. غلظت فلزات مورد مطالعه با استفاده از دستگاه جذب اتمی شعله‌ای^۲ مدل (Varian 240) اندازه‌گیری شد. برای هر عنصر، محلول‌های استاندارد تهیه و منحنی کالیبراسیون رسم گردید و سپس نمونه‌ها بر اساس جذب اندازه‌گیری‌شده آنالیز شدند. طول موج اختصاصی هر عنصر مطابق دستورالعمل دستگاه تنظیم شد. به‌منظور کنترل کیفیت، نمونه شاهد (Blank) و محلول‌های استاندارد هم‌زمان با نمونه‌ها مورد آنالیز قرار گرفتند. تمامی نمونه‌ها در سه تکرار اندازه‌گیری شدند و نتایج نهایی پس از اعمال ضرایب رقت بر اساس وزن خشک نمونه به‌صورت میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شد (۲۹). همچنین در این مطالعه، روش اندازه‌گیری آرسنیک در مواد غذایی با استفاده از جذب اتمی شعله‌ای همراه با تولید هیدرید اعتبارسنجی شد که محدوده کالیبراسیون ۲/۵ تا ۲۰ میکروگرم بر لیتر، ضریب تعیین منحنی

²² Flame Atomic Absorption Spectrophotometer

¹ Target Hazard Quotient

توجه و مقدار $THQ < 1$ بیانگر عدم وجود خطر قابل توجه در اثر مواجهه مزمن است. به منظور بررسی اثر تجمعی مواجهه هم‌زمان با چند فلز، شاخص خطر تجمعی (HI) به صورت مجموع مقادیر THQ برای فلزات سرب، کادمیوم و آرسنیک محاسبه شد. بنابراین

$$HI = THQ_{Pb} + THQ_{Cd} + THQ_{As}$$

در نظر گرفته شد. مقدار $HI < 1$ به عنوان سطح قابل قبول مواجهه غیرسرطانی و مقدار مقدار $HI > 1$ به عنوان احتمال خطر تجمعی ریسک سلامت تفسیر گردید.

ارزیابی ریسک سرطان‌زایی

برای ارزیابی ریسک سرطان‌زایی در طول عمر دوز متوسط روزانه مادام‌العمر (LADD) با در نظر گرفتن مدت مواجهه و دوره میانگین‌گیری سرطان‌زایی محاسبه شد. با توجه به دریافت روزانه برآوردشده (EDI)، رابطه زیر برای محاسبه LADD به کار رفت: $THQ = EDI \times \frac{ED}{AT}$ که EDI دریافت روزانه برآوردشده از فلز (میلی‌گرم بر کیلوگرم/وزن بدن/روز)، ED مدت مواجهه (۳۰ سال) و AT دوره میانگین‌گیری سرطان‌زایی (۷۰ سال) بود. سپس خطر افزایش سرطان در طول عمر (ILCR) از رابطه $ILCR = LADD \times CSF$ استفاده شد که CSF بیانگر شیب سرطان‌زایی خوراکی بر حسب (میلی‌گرم بر کیلوگرم/وزن بدن/روز) بود و مقدار ضریب شیب سرطان‌زایی خوراکی (CSF) برای سرب، کادمیوم و آرسنیک به ترتیب برابر 0.0085 ، 0.38 و $1/5$ (میلی‌گرم بر کیلوگرم/وزن بدن/روز) در نظر گرفته شد. از آنجا که این ضریب به آرسنیک غیرآلی مربوط است، استفاده از آن برای برآورد ریسک ناشی از آرسنیک کل مستلزم احتیاط است. زیرا در پژوهش حاضر، گونه‌بندی آرسنیک انجام نشد. بنابراین نتیجه حاصل باید به عنوان برآوردی مشروط بر مفروضات مربوط به گونه شیمیایی آرسنیک تفسیر شود. در تفاسیر مقادیر ILCR، مقادیر 10^{-6} به طور قراردادی نشان‌دهنده ریسک بسیار پایین، محدوده 10^{-4} تا 10^{-6} به عنوان دامنه‌ای از ریسک قابل مدیریت یا قابل قبول در بسیاری از چارچوب‌های ریسک، و مقادیر بالاتر از 10^{-4} به عنوان ریسک قابل توجه سرطان‌زایی تفسیر شدند (۳۲، ۳۵). این حدود، معیارهای قراردادی ارزیابی ریسک هستند و نباید به عنوان مرزهای قطعی بین ایمنی و بیماری تفسیر شوند. در ارزیابی خطر سرطان‌زایی، ضریب

کالیبراسیون (R^2) برابر با 0.997 ، حد تشخیص (LOD) برابر با 0.16 میکروگرم بر لیتر و حد اندازه‌گیری کمی (LOQ) برابر با $2/1$ میکروگرم بر لیتر گزارش شد.

ارزیابی مواجهه و ریسک سلامت ناشی از مصرف قهوه

برای ارزیابی ریسک سلامت ناشی از مصرف قهوه فوری، دریافت روزانه تخمینی فلزات سنگین (EDI)، شاخص خطر هدف (THQ)، شاخص خطر تجمعی (HI)، و خطر سرطان‌زایی مادام‌العمر (ILCR) محاسبه شد. مسیر مواجهه در این مطالعه، مصرف پودر قهوه فوری در نظر گرفته شد. دریافت روزانه تخمینی فلزات با استفاده از رابطه $EDI = \frac{C \times IR}{BW}$ محاسبه گردید؛ که در آن C غلظت فلز در پودر قهوه فوری (میلی‌گرم بر کیلوگرم)، IR بیانگر مقدار فرض‌شده مصرف روزانه قهوه (کیلوگرم/روز)، و BW وزن بدن مصرف‌کننده (کیلوگرم) است. در سناریوی پایه، وزن بدن بزرگسالان برابر با 70 کیلوگرم و میزان مصرف روزانه قهوه برابر 15 گرم در روز (0.15 کیلوگرم در روز) در نظر گرفته شد. از آنجا که میزان انتقال فلزات از پودر به نوشیدنی آماده‌شده به‌طور تجربی اندازه‌گیری نشد، در این ارزیابی، غلظت کل فلزات اندازه‌گیری‌شده در پودر مبنای محاسبات قرار گرفت. بنابراین، برآوردهای حاصل مبتنی بر سناریوی مواجهه محاسباتی بر اساس مقدار فرض‌شده پودر مصرفی هستند و باید با در نظر گرفتن عدم اندازه‌گیری مستقل انتقال فلزات به نوشیدنی و عدم قطعیت در مقدار واقعی مصرف روزانه تفسیر شوند.

ارزیابی خطر غیر سرطان‌زایی

ریسک غیرسرطانی برای هر فلز با استفاده از شاخص THQ محاسبه شد. این شاخص از رابطه $THQ = \frac{EDI}{RfD}$ به دست آمد؛ که در آن RfD دوز مرجع خوراکی فلز مورد نظر بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز است (۳۰). طبق منابع مندرج در مقاله حاضر که مبتنی بر پژوهش‌های انجام گرفته پیشین (۳۱، ۳۲) و با بهره‌گیری از رویکردهای توصیه شده توسط USEPA است مقادیر RfD برای سرب (۳۳)، کادمیوم و آرسنیک (۳۴) به ترتیب برابر با 0.0035 ، 0.0010 و 0.0003 (میلی‌گرم بر کیلوگرم/وزن بدن/روز) در نظر گرفته شد. مقدار $THQ > 1$ نشان‌دهنده احتمال خطر غیرسرطان‌زایی قابل

شیب سرطان‌زایی آرسنیک معدنی برای محاسبه خطر احتمالی ناشی از مواجهه با آرسنیک به کار گرفته شد. با این حال، در پژوهش حاضر اندازه‌گیری به صورت آرسنیک کل انجام شد و گونه‌های آرسنیک به طور جداگانه تعیین نشدند. بنابراین، کاربرد این ضریب برای غلظت آرسنیک کل بر این فرض محافظه کارانه استوار است که آرسنیک اندازه‌گیری شده از نظر ارزیابی خطر، معادل آرسنیک معدنی در نظر گرفته شود. این فرض ممکن است خطر سرطان‌زایی را بیش‌برآورد کند؛ از این رو، نتایج باید با توجه به این عدم قطعیت تفسیر شوند.

تحلیل حساسیت

به منظور بررسی تأثیر میزان مصرف قهوه و تغییرپذیری غلظت فلزات بر برآورد مواجهه، تحلیل حساسیت با در نظر گرفتن سه سناریوی فرضی مصرف روزانه شامل ۱۵، ۳۰ و ۴۵ گرم قهوه و با فرض وزن بدن ۷۰ کیلوگرم انجام شد. برای هر فلز، دریافت روزانه تخمینی (EDI) بر اساس سه مقدار غلظت شامل میانگین، صدک ۹۵ و حداکثر غلظت اندازه‌گیری شده در ۵۰ نمونه محاسبه شد. صدک ۹۵ با استفاده از روش درون‌یابی خطی از داده‌های خام به دست آمد. محاسبات EDI با استفاده از رابطه $EDI = \frac{C \times IR}{BW}$ انجام شد؛ در این رابطه، (C) غلظت فلز در قهوه بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم، (IR) میزان مصرف روزانه قهوه بر حسب کیلوگرم در روز و (BW) وزن بدن بر حسب کیلوگرم است. این سناریوها به منظور بررسی حساسیت برآورد مواجهه به مفروضات مصرف و غلظت طراحی شدند و لزوماً نشان‌دهنده الگوی واقعی مصرف در جمعیت نیستند.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

داده‌های حاصل از اندازه‌گیری غلظت سرب، کادمیوم و آرسنیک در نمونه‌های قهوه با استفاده از شاخص‌های آمار

توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار، میانه و دامنه تغییرات (حداقل و حداکثر) توصیف شدند. به منظور بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها، از آزمون شاپیرو ویلک استفاده شد. نتایج آزمون نرمالیتی در انتخاب روش مناسب برای توصیف و تفسیر داده‌ها مدنظر قرار گرفت. تمامی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS - نسخه ۲۱ انجام شد و سطح معنی‌داری آماری کمتر از ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

بر اساس نتایج ارائه شده در **جدول ۱**، بیشترین میانگین غلظت مربوط به آرسنیک با مقدار ۰/۰۴۰۶۰ mg/kg و پس از آن سرب با مقدار ۰/۰۳۹۸۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود، در حالی که کادمیم کمترین میانگین غلظت را با مقدار ۰/۰۲۴۳۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم نشان داد. از نظر دامنه تغییرات، آرسنیک با دامنه ۰/۰۷۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بیشترین پراکندگی را در بین سه فلز داشت و پس از آن سرب با دامنه ۰/۰۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم قرار گرفت. این موضوع نشان می‌دهد که تغییرپذیری غلظت آرسنیک در میان نمونه‌ها بیشتر از دو فلز دیگر بوده است. همچنین، مقادیر ضریب تغییرات نشان داد که هر سه فلز دارای پراکندگی نسبتاً قابل توجهی در نمونه‌ها بوده‌اند. ضریب تغییرات برای سرب ۴۵/۳۱ درصد، برای کادمیم ۵۳/۷۱ درصد و برای آرسنیک ۵۵/۹۱ درصد به دست آمد. مقادیر بالای ضریب تغییرات نشان‌دهنده پراکندگی نسبی بیشتر داده‌ها و ناهمگنی بالاتر غلظت فلزات در بین نمونه‌ها است. نزدیکی میانگین و میانه در فلز سرب نشان‌دهنده توزیع متقارن‌تر داده‌های این فلز نسبت به سایر عناصر بود، در حالی که پراکندگی بیشتر مشاهده شده در کادمیم و آرسنیک بیانگر تغییرپذیری بالاتر غلظت این عناصر در نمونه‌ها است.

جدول ۱. شاخص‌های آمار توصیفی غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های مورد بررسی

فلز	تعداد نمونه (n)	حداقل (mg/kg)	حداکثر (mg/kg)	دامنه تغییرات (mg/kg)	میانگین (mg/kg)	میانه (mg/kg)	انحراف معیار	خطای استاندارد	ضریب تغییرات (%)
سرب (Pb)	۵۰	۰/۰۱۱	۰/۰۷۹	۰/۰۶۸	۰/۰۳۹۸۸	۰/۰۳۸۵	۰/۰۱۸۰۷	۰/۰۰۲۵۶	۴۵/۳۱
کادمیم (Cd)	۵۰	۰/۰۰۲	۰/۰۴۵	۰/۰۴۳	۰/۰۲۴۳۲	۰/۰۲۴۰	۰/۰۱۳۰۶	۰/۰۰۱۸۵	۵۳/۷۱
آرسنیک (As)	۵۰	۰/۰۰۶	۰/۰۷۸	۰/۰۷۲	۰/۰۴۰۶۰	۰/۰۳۸۰	۰/۰۲۲۷۰	۰/۰۰۳۲۱	۵۵/۹۱

بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها

پیش از تحلیل آماری داده‌ها، نرمال بودن توزیع غلظت فلزات سنگین با استفاده از آزمون شاپیرو ویلک بررسی شد (جدول ۲). نتایج نشان داد که توزیع غلظت سرب نرمال بود ($p=0/1118$)، در حالی که غلظت کادمیوم ($p=0/0213$) و آرسنیک ($p=0/0120$) از توزیع نرمال

پیروی نکردند. بنابراین، تفاوت در الگوی توزیع عناصر مورد بررسی باید در تفسیر آماری نتایج مورد توجه قرار گرفت.

جدول ۲. نتایج آزمون Shapiro-Wilk برای بررسی نرمال بودن توزیع غلظت فلزات

فلز	تعداد نمونه (n)	آماره Shapiro-Wilk (W)	مقدار p	وضعیت توزیع
سرب (Pb)	۵۰	۰/۹۶۲۴	۰/۱۱۱۸	نرمال
کادمیوم (Cd)	۵۰	۰/۹۴۵۰	۰/۰۲۱۳	غیرنرمال
آرسنیک (As)	۵۰	۰/۹۳۸۷	۰/۰۱۲۰	غیرنرمال

نتایج شاخص‌های ارزیابی ریسک سلامت

به‌منظور ارزیابی پیامدهای بالقوه مواجهه با فلزات سنگین در نمونه‌های قهوه فوری، شاخص‌های ریسک سلامت شامل دریافت روزانه تخمینی (EDI)، ضریب خطر هدف (THQ)، شاخص خطر تجمعی (HI) و خطر سرطان‌زایی مادام‌العمر (ILCR) محاسبه شد. این شاخص‌ها امکان تبدیل داده‌های غلظتی به یک چارچوب کاربردی برای تفسیر ریسک انسانی را فراهم می‌کنند. نتایج محاسبات در جدول ۳ و به‌صورت بصری در شکل ۱ و شکل ۲ ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، ترکیب جدول و نمودار، درک دقیق‌تر از سهم نسبی هر فلز در بار ریسک کلی را تسهیل می‌کند. بر اساس نتایج جدول ۳، مقدار EDI برای آرسنیک اندکی فراتر از سرب بود در حالی که مقدار EDI در کادمیوم پائین‌تر بود، که نشان می‌دهد سهم این دو فلز در دریافت روزانه تخمینی بیشتر است. باین‌حال، ارزیابی ریسک سلامت صرفاً بر اساس دریافت روزانه تخمینی کافی نیست و باید تفاوت دوزهای مرجع و ضرایب سم‌شناختی فلزات نیز در نظر گرفته شود. در میان فلزات بررسی‌شده، آرسنیک با THQ برابر با $2/90 \times 10^{-2}$ ، بیشترین مقدار را نشان داد؛ پس از آن، کادمیوم با مقدار $5/211 \times 10^{-3}$ ، و سرب با مقدار $2/422 \times 10^{-3}$ قرار گرفتند. از آن‌جا که مقادیر THQ برای هر سه فلز کمتر از ۱ بود، در سناریوی مواجهه مورد بررسی، نگرانی قابل توجهی از نظر اثرات غیرسرطان‌زای هر فلز به‌تنهایی پیش‌بینی نمی‌شود. هم‌چنین، شاخص خطر تجمعی (HI) برابر با $0/36653$ به‌دست آمد که کمتر از

مقدار مرجع ۱ است. این یافته نشان می‌دهد که بر اساس مفروضات و محدودیت‌های ارزیابی حاضر، احتمال بروز اثرات نامطلوب غیرسرطان‌زا ناشی از مواجهه هم‌زمان با این سه فلز پایین برآورد می‌شود. در میان فلزات بررسی‌شده، آرسنیک بیشترین سهم را در HI داشت و از این نظر شایسته توجه بیشتری در پایش و ارزیابی ایمنی است.

برای ارزیابی خطر سرطان‌زایی در طول عمر، مقادیر ILCR با در نظر گرفتن مدت مواجهه ۳۰ سال و دوره میانگین‌گیری سرطان‌زایی ۷۰ سال مجدداً محاسبه شدند. مقادیر محاسبه‌شده ILCR برای سرب، کادمیوم و آرسنیک به‌ترتیب برابر با $8/687 \times 10^{-7}$ ، $3/113 \times 10^{-8}$ و $5/593 \times 10^{-6}$ بودند. از منظر خطر سرطان‌زایی مادام‌العمر، مقادیر ILCR برای سرب، کمتر از 10^{-6} بود. مقدار ILCR کادمیوم نیز با مقدار $8/687 \times 10^{-7}$ اندکی کمتر از 10^{-6} بود. در حالی که مقدار آرسنیک $5/593 \times 10^{-6}$ بود. این حدود، معیارهای قراردادی ارزیابی ریسک هستند و نباید به‌عنوان مرز قطعی میان ایمنی و خطر تفسیر شوند. افزون بر این، از آن‌جا که گونه‌بندی آرسنیک در پژوهش حاضر انجام نشد، برآورد ILCR آرسنیک به فرض استفاده از ضریب شیب سرطان‌زایی مربوط به آرسنیک غیرآلی وابسته است و باید با احتیاط تفسیر شود. در مجموع، نتایج ارزیابی حاضر نشان‌دهنده مقادیر پایین شاخص‌های ریسک غیرسرطان‌زا در سناریوی بررسی‌شده است؛ با این‌حال، آرسنیک و کادمیوم به‌دلیل مقادیر ILCR

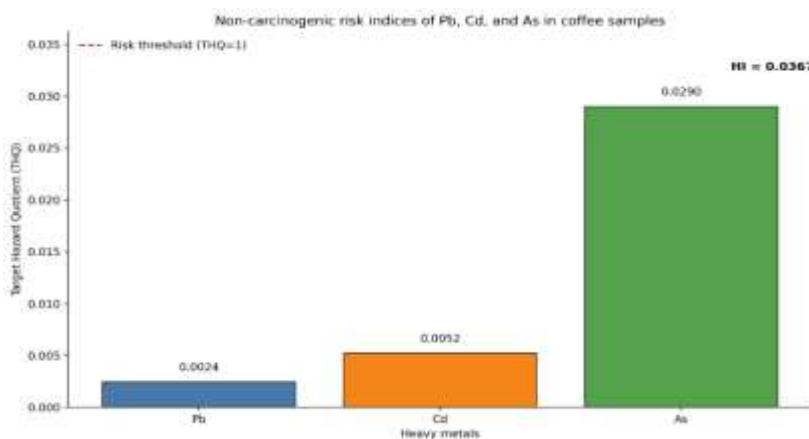
محاسبه شده، مستلزم توجه بیشتر در ارزیابی مواجهه و تفسیر ریسک هستند.

جدول ۳. شاخص های ارزیابی ریسک سلامت ناشی از فلزات سنگین در نمونه های مورد مطالعه

فلز	میانگین غلظت (mg/kg)	EDI (mg/kg/day)	LADD (mg/kg/day)	CSF	THQ	ILCR
Pb	۰/۰۳۹۸۸	$۸/۶۴۵ \times ۱۰^{-۶}$	$۳/۶۶۳ \times ۱۰^{-۶}$	۰/۰۰۸۵	$۲/۴۴۲ \times ۱۰^{-۳}$	$۳/۱۱۳ \times ۱۰^{-۸}$
Cd	۰/۰۲۴۳۲	$۵/۲۱۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۲/۲۳۳ \times ۱۰^{-۶}$	۰/۳۸	$۵/۲۱۱ \times ۱۰^{-۳}$	$۸/۶۸۷ \times ۱۰^{-۷}$
As	۰/۰۴۰۶۰	$۸/۷۰۰ \times ۱۰^{-۶}$	$۳/۷۲۹ \times ۱۰^{-۶}$	۱/۵	$۲/۹۰۰ \times ۱۰^{-۲}$	$۵/۵۹۳ \times ۱۰^{-۶}$
HI	—	—	—	—	۰/۰۳۶۶۵۳	—

مقایسه مقادیر ضریب خطر هدف (THQ) برای سرب، کادمیوم و آرسنیک و همچنین شاخص خطر تجمعی (HI) در شکل ۱ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، آرسنیک بیشترین مقدار THQ را در میان

فلزات مورد بررسی داشت؛ با این حال، تفسیر این شاخص ها باید با توجه به اعتبار مقادیر دوز مرجع استفاده شده انجام شود.

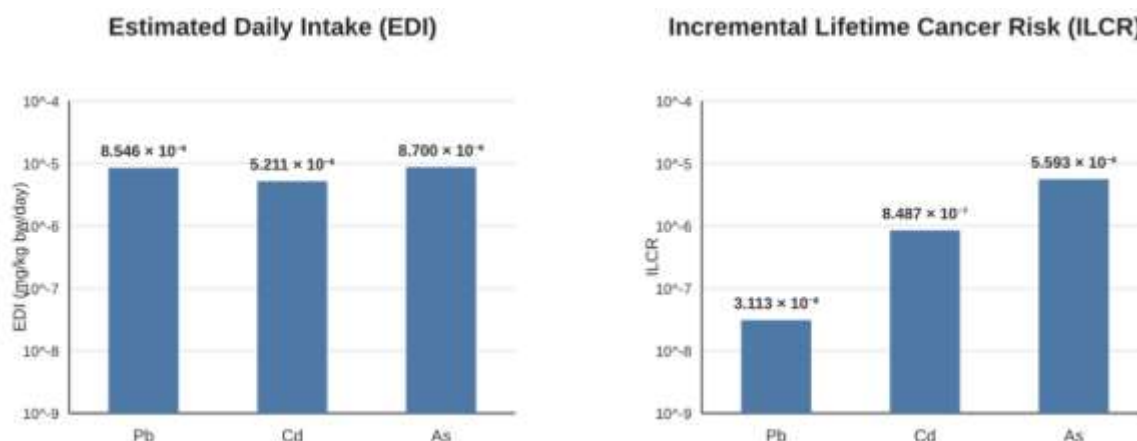


شکل ۱. مقایسه شاخص های THQ فلزات و شاخص خطر تجمعی (HI)

شکل ۲ نشان می دهد که مقدار دریافت روزانه تخمینی (EDI) برای آرسنیک و سرب تقریباً مشابه و اندکی بالاتر از کادمیوم است؛ در حالی که شاخص خطر افزایشی سرطان زایی در طول عمر (ILCR) برای آرسنیک بیشترین مقدار و برای سرب کمترین مقدار را نشان می دهد. این تفاوت بیانگر آن است که برآورد خطر سرطان زایی صرفاً به میزان دریافت روزانه فلزات وابسته نیست، بلکه ضریب شیب سرطان زایی (CSF) مورد استفاده برای هر فلز نیز در مقدار نهایی این شاخص نقش دارد. پس از اعمال مدت مواجهه ۳۰ سال و دوره میانگین گیری سرطان زایی ۷۰ سال، مقادیر ILCR برای سرب، کادمیوم و آرسنیک به ترتیب برابر با $۳/۱۱۳ \times ۱۰^{-۸}$ ، $۸/۶۸۷ \times ۱۰^{-۷}$ و $۵/۵۹۳ \times ۱۰^{-۶}$ محاسبه شدند. بر اساس ضرایب به کاررفته در این مطالعه، آرسنیک بیشترین و

سرب کمترین مقدار ILCR را داشت. با این حال، از آن جا که در این پژوهش گونه بندی آرسنیک انجام نشد، برآورد خطر سرطان زایی آن با استفاده از ضریب مربوط به آرسنیک غیرآلی بر یک فرض محافظه کارانه استوار است و ممکن است خطر را بیش برآورد کند؛ بنابراین، این نتیجه باید با احتیاط تفسیر شود. در مجموع، مقادیر شاخص های غیرسرطان زایی در سناریوی مواجهه بررسی شده پایین تر از آستانه متداول یک بودند؛ با این حال، مقدار ILCR آرسنیک در محدوده $۱۰^{-۶}$ تا $۱۰^{-۴}$ قرار گرفت که در بسیاری از چارچوب های ارزیابی ریسک به عنوان محدوده ای برای بررسی و مدیریت ریسک در نظر گرفته می شود، نه مرزی قطعی میان ایمنی و خطر؛ بنابراین از این رو، پایش مستمر فلزات، به ویژه آرسنیک، و

اندازه‌گیری جداگانه گونه‌های آن می‌تواند به ارزیابی دقیق‌تر خطرات بالقوه سلامت کمک کند.



شکل ۲. مقایسه شاخص‌های EDI و ILCR در فلزات سنگین مورد مطالعه

مواجهه را به همراه داشت. این افزایش نشان می‌دهد که محاسبه مواجهه صرفاً بر اساس میانگین غلظت‌ها ممکن است میزان مواجهه افرادی را که قهوه بیشتری مصرف می‌کنند یا محصولاتی با غلظت بالاتری از فلزات دریافت می‌کنند، کمتر از مقدار برآوردشده در سناریوهای بالاتر نشان دهد. با این حال، سناریوهای مصرف به کاررفته فرضی هستند و نتایج آن‌ها را نمی‌توان بدون اطلاعات جمعیتی درباره الگوی واقعی مصرف، به تمام مصرف‌کنندگان تعمیم داد (جدول ۴).

تحلیل حساسیت دریافت روزانه تخمینی سرب، کادمیوم و آرسنیک بر اساس سناریوهای مختلف مصرف قهوه و غلظت فلزات

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که میزان مصرف روزانه قهوه و غلظت فلزات اندازه‌گیری شده بر مقدار دریافت روزانه تخمینی (EDI) تأثیر دارند. با افزایش مصرف روزانه از ۱۵ به ۴۵ گرم، مقدار EDI برای هر سه فلز سه برابر شد. همچنین، استفاده از صدک ۹۵ و حداکثر غلظت مشاهده شده به جای میانگین غلظت‌ها، مقادیر بالاتری از

جدول ۴. تحلیل حساسیت دریافت روزانه تخمینی سرب، کادمیوم و آرسنیک بر اساس سناریوهای مختلف مصرف قهوه و غلظت فلزات

مصرف قهوه (گرم در روز)	مبنای غلظت	سرب (Pb)	کادمیوم (Cd)	آرسنیک (Cd)
۱۵	میانگین	8.546×10^{-4}	5.211×10^{-4}	8.700×10^{-4}
۱۵	صدک ۹۵	1.426×10^{-5}	9.429×10^{-6}	1.611×10^{-5}
۱۵	حداکثر	1.693×10^{-5}	9.643×10^{-6}	1.671×10^{-5}
۳۰	میانگین	1.709×10^{-5}	1.042×10^{-5}	1.740×10^{-5}
۳۰	صدک ۹۵	2.852×10^{-5}	1.886×10^{-5}	3.223×10^{-5}
۳۰	حداکثر	3.386×10^{-5}	1.929×10^{-5}	3.343×10^{-5}
۴۵	میانگین	2.564×10^{-5}	1.563×10^{-5}	2.610×10^{-5}
۴۵	صدک ۹۵	4.278×10^{-5}	2.829×10^{-5}	4.834×10^{-5}
۴۵	حداکثر	5.079×10^{-5}	2.893×10^{-5}	5.014×10^{-5}

سلامت محور رفتار یکسانی نداشتند. آرسنیک بالاترین میانگین غلظت را نشان داد و پس از آن سرب قرار گرفت، در حالی که کادمیوم کمترین میانگین آلودگی را داشت.

بحث

نتایج این مطالعه نشان داد که هر سه فلز سرب، کادمیم و آرسنیک در نمونه‌های قهوه مورد بررسی قابل اندازه‌گیری بودند، اما از نظر الگوی غلظت، پراکندگی داده‌ها و اهمیت

تفسیر وضعیت آلودگی تنها بر اساس میانگین غلظت کافی نیست، زیرا دامنه تغییرات و ضرایب تغییرات بالا نشان دادند که نمونه‌ها از نظر محتوای فلزی دارای ناهمگنی قابل توجهی بودند. این ناهمگنی در محصولات کشاورزی با زنجیره تولید چندمرحله‌ای مانند قهوه می‌تواند تحت تأثیر عواملی نظیر منشأ جغرافیایی، شرایط

کشت، فراوری و زنجیره تأمین قرار گیرد (۲۱). نتایج آزمون نرمالیتی نشان داد که سرب از توزیع نرمال پیروی می‌کند، در حالی که کادمیم و آرسنیک دارای توزیع غیرنرمال بودند. این تفاوت نشان می‌دهد که فلزات مختلف در یک ماتریکس واحد الزاماً از منطق توزیعی مشابهی تبعیت نمی‌کنند و بنابراین تحلیل آن‌ها نیز نباید با یک رویکرد یکنواخت انجام شود. پیچیدگی شیمیایی قهوه و تنوع عوامل مؤثر بر کیفیت آن نیز این مسئله را تقویت می‌کند (۲۳). نتایج این مطالعه با یافته‌های مطالعات پیشین همخوانی دارد. در بررسی نذرارک و همکاران، حضور چند فلز سنگین از جمله سرب در قهوه گزارش شد و نشان داده شد که ترکیب فلزی این نوشیدنی می‌تواند متغیر باشد (۲۴). آدلر و همکاران نیز در نمونه‌های قهوه، وجود سرب و کادمیم را تأیید کردند و تفاوت بین نمونه‌ها را نشان دادند (۲۵). یافته‌های ما در کلیت با این مطالعات همسو است، زیرا نشان می‌دهد قهوه می‌تواند حامل مقادیر قابل اندازه‌گیری از فلزات بالقوه سمی باشد. با این حال، در مطالعه حاضر آرسنیک از نظر میانگین غلظت و سهم در ریسک، برجسته‌تر از سایر فلزات ظاهر شد؛ موضوعی که احتمالاً به تفاوت در منشأ نمونه‌ها و شرایط زنجیره تولید مربوط است. مطالعات دیگر نیز نقش منشأ و فراوری را در تغییرات غلظت فلزات تأیید کرده‌اند. گیور و همکاران در ارزیابی قهوه‌های بومی برشته‌شده اتیوپی نشان دادند که سطوح فلزات می‌تواند به‌طور معنی‌داری با منشأ نمونه مرتبط باشد (۳۶). در مطالعه نوگایم و همکاران نیز وجود فلزات سنگین در قهوه سبز یمنی گزارش شد (۳۷). این هم‌راستایی نشان می‌دهد که یافته‌های حاضر را باید در چارچوب تنوع طبیعی و صنعتی قهوه تفسیر کرد. به بیان دیگر، اختلاف بین مقادیر گزارش‌شده در مطالعات مختلف لزوماً نشان‌دهنده تناقض نیست، بلکه بازتاب تفاوت در محیط رشد، نوع محصول، فراوری و حتی شرایط نگهداری است

(۲۰). پراکندگی نسبتاً زیاد داده‌ها در مطالعه حاضر نیز از نظر تفسیری مهم است. ضرایب تغییرات بالا، به‌ویژه برای کادمیم و آرسنیک، نشان می‌دهد که میانگین به‌تنهایی نمی‌تواند توصیف‌کننده کامل وضعیت آلودگی باشد. پیگازی و همکاران نیز در بررسی کیفیت قهوه‌های تجاری، ناهمگنی در محتوای فلزات را گزارش کردند (۳۸). هم‌چنین، تونی و همکاران نشان دادند که در محصولات پیش بسته‌بندی‌شده، برخی آلاینده‌های شیمیایی ممکن است علاوه بر منشأ اولیه، تحت تأثیر تماس با محیط فراوری و بسته‌بندی نیز قرار گیرند (۳۹).

بخش مهم این پژوهش، تفسیر سلامت‌محور یافته‌ها بود. محاسبه EDI نشان داد که دریافت روزانه تخمینی هر سه فلز در سطح پایینی قرار دارد. به‌طور مشابه، مقادیر THQ برای سرب، کادمیم و آرسنیک همگی کمتر از ۱ بودند و شاخص HI نیز به‌وضوح زیر آستانه نگران‌کننده قرار گرفت. این نتایج نشان می‌دهد که در سناریوی مصرف مورد بررسی، قهوه‌های مطالعه‌شده از نظر ریسک غیرسرطان‌زایی در محدوده کم‌خطر قرار دارند. این نکته با اصول ارزیابی ریسک غذایی هم‌خوان است که تأکید می‌کنند وجود آلاینده لزوماً به معنای خطر سلامت قابل توجه نیست و باید مواجهه واقعی مصرف‌کننده در محاسبات لحاظ شود. با وجود پایین بودن کلی THQ و HI، نتایج نشان داد که آرسنیک بیشترین سهم را در بار غیرسرطان‌زا دارد. این یافته قابل تأمل است، زیرا اهمیت آرسنیک را نه فقط در سطح غلظت، بلکه در سطح تفسیر ریسک نیز برجسته می‌کند. یزدان‌پناه و همکاران نیز در بررسی قهوه فوری تجاری، توجه به عناصر سرب و آرسنیک را از منظر ایمنی غذایی ضروری دانستند (۲۷). در مطالعه حاضر نیز اگرچه HI بسیار کمتر از ۱ بود، اما سهم بالاتر آرسنیک در THQ نشان می‌دهد که این عنصر باید در اولویت برنامه‌های پایش قرار گیرد. این نتیجه از نظر سیاست‌گذاری غذایی مهم است، زیرا در شرایطی که ریسک کلی پایین است، مدیریت مؤثر باید بر عناصر دارای سهم بیشتر در خطر متمرکز شود (۲۱). یافته‌های مربوط به ILCR نیز نشان داد که خطر سرطان‌زایی مادام‌العمر برای عناصر بررسی‌شده پایین است. با این حال، سهم کادمیم و آرسنیک در ILCR بیشتر از سرب بود، در حالی که از نظر غلظت خام، سرب یکی از عناصر غالب

محسوب می‌شد. این تفاوت نشان می‌دهد که رابطه بین غلظت، دریافت و ریسک سرطان‌زا خطی و ساده نیست. در واقع، ویژگی‌های سم‌شناختی ذاتی هر عنصر می‌تواند باعث شود فلزی با غلظت کمتر، سهم بیشتری در ریسک نهایی داشته باشد (۲۲). این نکته از منظر علمی اهمیت زیادی دارد، زیرا تأکید می‌کند که رتبه‌بندی فلزات تنها بر اساس غلظت برای قضاوت سلامت‌محور کافی نیست. یافته‌های این پژوهش هم‌چنین باید در بستر الگوی واقعی مصرف قهوه تفسیر شوند. قهوه نوشیدنی‌ای است که در بسیاری از جوامع به‌صورت مزمن و روزانه مصرف می‌شود، بنابراین حتی سطوح پایین آلاینده‌ها نیز از منظر مواجهه طولانی‌مدت قابل توجه هستند (۳). در عین حال، مطالعات متعددی نشان داده‌اند که قهوه می‌تواند با پیامدهای سودمند سلامت نیز همراه باشد، از جمله در زمینه مرگ‌ومیر کلی و برخی پیامدهای کبدی (۱۶) از این‌رو، ارزیابی فلزات سنگین در قهوه نباید به‌گونه‌ای تفسیر شود که ارزش تغذیه‌ای یا آثار بالقوه مفید این نوشیدنی نادیده گرفته شود. نگاه دقیق‌تر آن است که قهوه به‌عنوان یک ماده غذایی پرمصرف، هم از نظر ترکیبات مفید و هم از نظر آلاینده‌های احتمالی به‌صورت هم‌زمان بررسی شود (۹). از منظر روش‌شناختی نیز باید توجه داشت که غلظت فلزات در نمونه خشک یا پودر قهوه، الزاماً معادل مقدار انتقال‌یافته به نوشیدنی نهایی نیست. نوع دم‌آوری، نسبت آب به قهوه، زمان استخراج، درجه آسیاب و نوع فیلتر می‌توانند بر میزان انتقال فلزات اثر بگذارند. ولنا و همکاران اهمیت اندازه‌گیری دقیق مقادیر ناچیز عناصر در محصولات قهوه را نشان دادند (۲۶). هم‌چنین اعظم و همکاران گزارش کردند که برخی مداخلات فناورانه مانند فیلتراسیون می‌توانند غلظت بعضی آلاینده‌ها را کاهش دهند (۲۸). بنابراین، اگرچه نتایج حاضر تصویری ارزشمند از وضعیت آلودگی در نمونه‌های بررسی‌شده ارائه می‌دهد، اما برای برآورد دقیق‌تر مواجهه واقعی، مطالعه قهوه دم‌شده نیز ضروری است (۴۰). از دیدگاه کاربردی، نتایج این مطالعه چند دلالت مهم دارد. نخست، وجود هم‌زمان Cd، Pb و As در نمونه‌ها نشان می‌دهد که پایش روتین این فلزات هم‌چنان ضروری است، حتی اگر سطح ریسک فعلی پایین باشد. دوم، آرسنیک باید به‌عنوان عنصر اولویت‌دار در کنترل

کیفیت مدنظر قرار گیرد. سوم، ناهمگنی بین نمونه‌ها نشان می‌دهد که ارزیابی ایمنی قهوه نباید فقط بر پایه میانگین کلی انجام شود، بلکه باید ویژگی‌های منشأ، دسته تولید و فرآوری نیز مورد توجه قرار گیرد (۴۱). در نهایت، کنترل دقیق‌تر مواد اولیه، شرایط فرآوری، تجهیزات تماس با محصول و بسته‌بندی می‌تواند در کاهش بار فلزی مؤثر باشد (۳۹).

محدودیت‌های مطالعه: مطالعه حاضر با وجود نقاط قوت خود، محدودیت‌هایی نیز دارد. نخست، ارزیابی ریسک بر اساس غلظت متوسط فلزات انجام شد و ممکن است شرایط مصرف‌کنندگان با دریافت بالاتر را به‌طور کامل بازتاب ندهد. دوم، فقط سه فلز بررسی شدند، در حالی که عناصر دیگری نیز ممکن است در قهوه حضور داشته باشند (۲۴). سوم، متغیرهایی مانند منشأ دقیق، درجه برشته‌کاری، نوع دانه و روش دم‌آوری در این تحلیل تفکیک نشدند. چهارم، انتقال فلزات به نوشیدنی نهایی به‌طور مستقیم سنجیده نشد. با این حال، ترکیب تحلیل آماری، توصیف پراکندگی و برآورد شاخص‌های ریسک باعث شد مطالعه حاضر تصویری نسبتاً جامع از وضعیت آلودگی فلزی و اهمیت سلامت‌محور آن در قهوه ارائه دهد (۴۲). در مجموع، نتایج این مطالعه نشان داد که قهوه‌های بررسی‌شده حاوی مقادیر قابل اندازه‌گیری از سرب، کادمیم و آرسنیک بودند، اما در سناریوی مواجهه مورد استفاده، ریسک غیرسرطان‌زا و سرطان‌زای آن‌ها پایین بود. در این میان، آرسنیک مهم‌ترین عنصر از نظر سهم در THQ و HI بود و کادمیم نیز در ILCR سهم قابل توجهی داشت. بنابراین، هرچند یافته‌ها از منظر سلامت عمومی اطمینان‌بخش هستند، اما ادامه پایش منظم، تحلیل‌های منشأ‌محور و بررسی انتقال فلزات به نوشیدنی نهایی برای تکمیل ارزیابی ایمنی قهوه ضروری به نظر می‌رسد (۲۹). یکی دیگر از محدودیت‌های پژوهش حاضر، اندازه‌گیری آرسنیک کل بدون تعیین جداگانه گونه‌های آرسنیک بود. از آن‌جا که سمیت و پتانسیل سرطان‌زایی آرسنیک معدنی و آلی متفاوت است، استفاده از ضریب شیب سرطان‌زایی آرسنیک معدنی برای غلظت آرسنیک کل می‌تواند موجب بیش‌برآورد خطر شود، به‌ویژه اگر بخشی از آرسنیک موجود در نمونه‌ها به شکل‌های آلی با سمیت متفاوت باشد. بنابراین، مقادیر محاسبه‌شده باید به‌عنوان برآوردهای محافظه‌کارانه و همراه با عدم قطعیت

دانشگاه‌ها، مؤسسات پژوهشی یا سایر سازمان‌ها برخوردار نبوده است. بدین‌وسیله از تمامی افرادی که در روند انجام این پژوهش همکاری و مساعدت نمودند، قدردانی می‌شود.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌کنند که در ارتباط با این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافع وجود ندارد.

حمایت مالی: این پژوهش بدون دریافت هرگونه حمایت مالی، گرنت یا کمک‌هزینه از دانشگاه‌ها، مؤسسات پژوهشی، سازمان‌های دولتی یا خصوصی و سایر نهادهای تأمین‌کننده مالی انجام شده است.

ملاحظات اخلاقی: این پژوهش با رعایت اصول اخلاقی پژوهش انجام شد. در این مطالعه از نمونه‌های تجاری قهوه استفاده شد و هیچ‌گونه نمونه‌گیری یا مداخله مستقیم بر روی انسان یا حیوان انجام نشد؛ بنابراین، ملاحظات مربوط به رضایت آگاهانه و مداخلات انسانی یا حیوانی موضوعیت نداشت.

سهم نویسندگان: محمدمین حیدرزادی: طراحی مطالعه، گردآوری و تحلیل داده‌ها، تفسیر نتایج و نگارش نسخه اولیه مقاله؛ سمیه تیربخش‌گوران: مشارکت در تحلیل داده‌ها، همکاری در نگارش و بازبینی مقاله و تفسیر نتایج؛ نجمه واحددهکردی و سیده‌خدیجه احمدی‌شیخ‌شبنانی: مشارکت در بازبینی و ویرایش مقاله. تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید کردند.

References

1. International Coffee Organization (ICO). Beyond Coffee: Towards a Circular Coffee Economy. Coffee Development Report 2022–23. London: International Coffee Organization; 2024. <https://ico.org/coffee-development-report-2/>
2. Hayat U, Siddiqui AA, Okut H, Afroz S, Tasleem S, Haris A. The effect of coffee consumption on the non-alcoholic fatty liver disease and liver fibrosis: A meta-analysis of 11 epidemiological studies. *Annals of hepatology*. 2021;20:100254. <https://doi.org/10.1016/j.aohp.2020.08.071> PMID:32920163
3. Liu D, Li Z-H, Shen D, Zhang P-D, Song W-Q, Zhang W-T, et al. Association of sugar-sweetened, artificially sweetened, and unsweetened coffee consumption with all-

تفسیر شوند. انجام مطالعات آینده با استفاده از روش‌های گونه‌سنجی، مانند کروماتوگرافی مایع متصل به طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی HPLC–ICP-MS، می‌تواند امکان برآورد دقیق‌تر خطر ناشی از آرسنیک معدنی را فراهم کند.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که پودر قهوه فوری نمونه‌برداری‌شده حاوی مقادیر قابل‌اندازه‌گیری از سرب، کادمیوم و آرسنیک بود. بر اساس مفروضات مواجهه و پارامترهای سم‌شناختی به‌کاررفته، شاخص‌های خطر غیرسرطان‌زایی در محدوده کمتر از یک قرار گرفتند. با این‌حال، این یافته‌ها صرفاً بیانگر برآورد مدل‌محور خطر تحت سناریوهای بررسی‌شده هستند و به‌تنهایی ایمنی مصرف قهوه یا نبود پیامدهای نامطلوب سلامت را اثبات نمی‌کنند. هم‌چنین، اندازه‌گیری فلزات در پودر قهوه بدون بررسی مستقیم میزان انتقال آن‌ها به نوشیدنی آماده‌شده، از محدودیت‌های مطالعه حاضر است. بنابراین، انجام مطالعات تکمیلی، پایش مستمر آلودگی فلزی و ارزیابی مواجهه بر اساس الگوهای واقعی مصرف برای تفسیر دقیق‌تر خطر سلامت توصیه می‌شود.

تشکر و قدردانی: این پژوهش به‌صورت مستقل انجام شده و از هیچ‌گونه حمایت مالی، تجهیزاتی یا آزمایشگاهی از سوی

- cause and cause-specific mortality: a large prospective cohort study. *Annals of internal medicine*. 2022;175(7):909-17. <https://doi.org/10.7326/M21-2977> PMID:35635846
4. Lin P, Liang Z, Wang M. Caffeine consumption and mortality in populations with different weight statuses: An analysis of NHANES 1999-2014. *Nutrition*. 2022;102:111731. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2022.111731> PMID:35810576
 5. Shin S, Lee JE, Loftfield E, Shu X-O, Abe SK, Rahman MS, et al. Coffee and tea consumption and mortality from all causes, cardiovascular disease and cancer: A pooled

analysis of prospective studies from the Asia Cohort Consortium. *International journal of epidemiology*. 2022;51(2):626-40.

<https://doi.org/10.1093/ije/dyab161>

PMid:34468722 PMCID:PMC9308394

6. Torres-Collado L, Compañ-Gabucio LM, González-Palacios S, Notario-Barandiaran L, Oncina-Cánovas A, Vioque J, et al. Coffee consumption and all-cause, cardiovascular, and cancer mortality in an adult mediterranean population. *Nutrients*. 2021;13(4):1241.

<https://doi.org/10.3390/nu13041241>

PMid:33918797 PMCID:PMC8070495

7. Carter P, Yuan S, Kar S, Vithayathil M, Mason AM, Burgess S, et al. Coffee consumption and cancer risk: a Mendelian randomisation study. *Clinical Nutrition*. 2022;41(10):2113-23.

<https://doi.org/10.1016/j.clnu.2022.08.019>

PMid:36067583 PMCID:PMC7613623

8. Kim SY, Yoo DM, Min C, Choi HG. Association between coffee consumption/physical exercise and gastric, hepatic, colon, breast, uterine cervix, lung, thyroid, prostate, and bladder cancer. *Nutrients*. 2021;13(11):3927.

<https://doi.org/10.3390/nu13113927>

PMid:34836181 PMCID:PMC8620757

9. Safe S, Kothari J, Hailemariam A, Upadhyay S, Davidson LA, Chapkin RS. Health Benefits of Coffee Consumption for Cancer and Other Diseases and Mechanisms of Action. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(3):2706.

<https://doi.org/10.3390/ijms24032706>

PMid:36769029 PMCID:PMC9916720

10. Mesas AE, Leon-Muñoz LM, Rodriguez-Artalejo F, Lopez-Garcia E. The effect of coffee on blood pressure and cardiovascular disease in hypertensive individuals: a systematic review and meta-analysis. *The American journal of clinical nutrition*. 2011;94(4):1113-26.

<https://doi.org/10.3945/ajcn.111.016667>

PMid:21880846

11. Mukamal KJ, Maclure M, Muller JE, Sherwood JB, Mittleman MA. Caffeinated coffee consumption and mortality after acute myocardial infarction. *American heart journal*. 2004;147(6):999-1004.

<https://doi.org/10.1016/j.ahj.2003.12.038>

PMid:15199347

12. Frost L, Vestergaard P. Caffeine and risk of atrial fibrillation or flutter: the Danish Diet, Cancer, and Health Study. *The American*

journal of clinical nutrition. 2005;81(3):578-82.

<https://doi.org/10.1093/ajcn/81.3.578>

PMid:15755825

13. Berman N, Honig S, Cronstein B, Pillinger M. The effects of caffeine on bone mineral density and fracture risk. *Osteoporosis International*. 2022;33(6):1235-41.

<https://doi.org/10.1007/s00198-021-05972-w>

PMid:34981132

14. Chen C-C, Shen Y-M, Li S-B, Huang S-W, Kuo Y-J, Chen Y-P. Association of coffee and tea intake with bone mineral density and hip fracture: a meta-analysis. *Medicina*. 2023;59(6):1177.

<https://doi.org/10.3390/medicina59061177>

PMid:37374383 PMCID:PMC10301353

15. Dewey KG, Romero-Abal ME, Quan de Serrano J, Bulux J, Peerson JM, Eagle P, et al. Effects of discontinuing coffee intake on iron status of iron-deficient Guatemalan toddlers: a randomized intervention study. *The American journal of clinical nutrition*. 1997;66(1):168-76.

<https://doi.org/10.1093/ajcn/66.1.168>

PMid:9209186

16. Lim KH, Riddell LJ, Nowson CA, Booth AO, Szymlek-Gay EA. Iron and zinc nutrition in the economically-developed world: a review. *Nutrients*. 2013;5(8):3184-211.

<https://doi.org/10.3390/nu5083184>

PMid:23945676 PMCID:PMC3775249

17. Singh P, Prasad S. A review on iron, zinc and calcium biological significance and factors affecting their absorption and bioavailability. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2023;123:105529.

<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105529>

18. Ayoub A, Yaseen M. Relationship between caffeine or coffee consumption and Miscarriage: Findings from systematic review and meta-analysis. *Journal of Health Informatics in Developing Countries*. 2022;16(1).

19. Jafari A, Naghshi S, Shahinfar H, Salehi SO, Kiany F, Askari M, et al. Relationship between maternal caffeine and coffee intake and pregnancy loss: A grading of recommendations assessment, development, and evaluation-assessed, dose-response meta-analysis of observational studies. *Frontiers in nutrition*. 2022;9:886224.

<https://doi.org/10.3389/fnut.2022.886224>

PMid:36017225 PMCID:PMC9396037

20. Rohweder R, de Oliveira Schmalfuss T, dos Santos Borniger D, Ferreira CZ, Zanardini MK, Lopes GPTF, et al. Caffeine intake

during pregnancy and adverse outcomes: An integrative review. *Reproductive Toxicology*. 2024;123:108518.

<https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2023.108518>
PMid:38042437

21. Qin G, Niu Z, Yu J, Li Z, Ma J, Xiang P. Soil heavy metal pollution and food safety in China: Effects, sources and removing technology. *Chemosphere*. 2021;267:129205.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129205> PMid:33338709

22. da Silva EB, Gao P, Xu M, Guan D, Tang X, Ma LQ. Background concentrations of trace metals As, Ba, Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Se, and Zn in 214 Florida urban soils: Different cities and land uses. *Environmental Pollution*. 2020;264:114737.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114737>
PMid:32559860

23. de Melo Pereira GV, de Carvalho Neto DP, Júnior AIM, do Prado FG, Pagnoncelli MGB, Karp SG, et al. Chemical composition and health properties of coffee and coffee by-products. *Advances in food and nutrition research*. 2020;91:65-96.

<https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2019.10.002>
PMid:32035601

24. Nędzarek A, Tórz A, Karakiewicz B, Clark JS, Laszczyńska M, Kaleta A, et al. Concentrations of heavy metals (Mn, Co, Ni, Cr, Ag, Pb) in coffee. *Acta Biochimica Polonica*. 2013;60(4).

https://doi.org/10.18388/abp.2013_2031

25. Adler G, Nędzarek A, Tórz A. Concentrations of selected metals (Na, K, Ca, mg, FE, CU, Zn, al, Ni, PB, cd) in coffee. *Slovenian Journal of Public Health*. 2019;58(4):187-93.

<https://doi.org/10.2478/sjph-2019-0024>
PMid:31636727 PMCid:PMC6778417

26. Welna M, Szymczycha-Madeja A, Pohl P. Improvement of determination of trace amounts of arsenic and selenium in slim coffee products by HG-ICP-OES. *Food Analytical Methods*. 2014;7:1016-23.

<https://doi.org/10.1007/s12161-013-9707-4>

27. Yazdanpanah S, Jokar S, Zandilak T, Haghighi M. Evaluation and comparison of ochratoxin a contamination and metallic elements lead and arsenic in commercial instant coffee powders. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*. 2022;18(1):81-95.

28. Azam K, Akhtar S, Gong YY, Routledge MN, Ismail A, Oliveira CA, et al. Evaluation

of the impact of activated carbon-based filtration system on the concentration of aflatoxins and selected heavy metals in roasted coffee. *Food Control*. 2021;121:107583.

<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107583>

29. Nkansah MA, Opoku F, Ackumey AA. Risk assessment of mineral and heavy metal content of selected tea products from the Ghanaian market. *Environmental monitoring and assessment*. 2016;188(6):332.

<https://doi.org/10.1007/s10661-016-5343-y>
PMid:27154053

30. Emergency USEPAOo, Response R. Risk Assessment Guidance for Superfund: Environmental evaluation manual: Office of Emergency and Remedial Response, US Environmental Protection Agency; 1989.

31. Algreiby AA, Makawi S, Bakheit AH, Alluhayb AH. Heavy Metal Contamination in Commercial Coffee Products in Saudi Arabia: Prevalence, Carcinogenic and Non-Carcinogenic Risk Assessment, and Implications for Diabetes and Cardiovascular Disease. *Toxics*. 2026;14(9):761.

<https://doi.org/10.3390/toxics14090761>
PMid:42797680 PMCid:PMC13611764

32. Guadalupe GA, Chavez SG, Arellanos E, Doménech E. Probabilistic Risk Characterization of Heavy Metals in Peruvian Coffee: Implications of Variety, Region and Processing. *Foods*. 2023;12(17):3254.

<https://doi.org/10.3390/foods12173254>
PMid:37685188 PMCid:PMC10487125

33. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Guidelines for Exposure Assessment. Washington, DC: Risk Assessment Forum, U.S. Environmental Protection Agency; 1992. EPA/600/Z-92/001. Available online:

<https://www.epa.gov/risk/guidelines-exposure-assessment>

34. Epa U. EPA Integrated Risk Information System (IRIS) electronic database. US Environmental Protection Agency, Washington, DC. 1996.

35. Assessment PR. Risk Assessment guidance for superfund: volume III-part a. Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment Unites States Environmental Protection Agency Washington. 2001.

36. Gure A, Chandravanshi BS, Godeto TW. Assessment of metals in roasted indigenous coffee varieties of Ethiopia. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*. 2018;32(1):27-38.

<https://doi.org/10.4314/bcse.v32i1.3>

37. Nogaim Q, Al-Dalali S, Al-Badany A, Farh M. Determination of some heavy metals in Yemeni green coffee. *Journal of Applied Chemistry*. 2014;2(4):13-8.
38. Pigozzi MT, Passos FR, Mendes FQ. Quality of commercial coffees: heavy metal and ash contents. *Journal of food quality*. 2018;2018.
<https://doi.org/10.1155/2018/5908463>
39. De Toni L, Tisato F, Seraglia R, Roverso M, Gandin V, Marzano C, et al. Phthalates and heavy metals as endocrine disruptors in food: a study on pre-packed coffee products. *Toxicology reports*. 2017;4:234-9.
<https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.05.004>
PMid:28959644 PMCID:PMC5615111
40. Gökçen BB, Şanlıer N. Coffee consumption and disease correlations. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2019;59(2):336-48.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1369391> PMid:28853910
41. Paul M, Thriveni V, Niharika M, Upadhyay D, Kiro D, Verma A, et al. A review on biofortification of crops: A nutritional strategy for combating malnutrition. *European Journal of Nutrition & Food Safety*. 2024;16(11):63-77.
<https://doi.org/10.9734/ejnfs/2024/v16i111577>
42. Rehman K, Fatima F, Waheed I, Akash MSH. Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. *Journal of cellular biochemistry*. 2018;119(1):157-84.
<https://doi.org/10.1002/jcb.26234>
PMid:28643849