



Investigation of heavy metals (Cadmium, Lead, and Arsenic) status in Iranian agricultural products and a critique of published studies – a review study

Meysam Cheraghi¹ | Karim Shahbazi² | Arzhang Fathi-Gerdelidani³ | Mojgan Yeganeh⁴ | Kobra Sadat Hasheminasab Zavareh⁵ | Mostafa Marzi⁵ | Mehdi Beheshti⁷ | Roya Toluee⁸ | Ayoub Avizhgan⁹ | Meisam Rezaei¹⁰ | Kambiz Bazargan¹¹

1. Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Soil and Water Research Institute (SWRI), Karaj, Iran. Email: my1374ch@gmail.com
2. Corresponding author, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Soil and Water Research Institute (SWRI), Karaj, Iran. Email: shahbazikarim@yahoo.com
3. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: arzhangfathi@ut.ac.ir
4. Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Soil and Water Research Institute (SWRI), Karaj, Iran. Email: yeganehmojan@yahoo.com
5. Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Soil and Water Research Institute (SWRI), Karaj, Iran. Email: k.hasheminasab@gmail.com
6. Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Soil and Water Research Institute (SWRI), Karaj, Iran. Email: mostafamarzi69@gmail.com
7. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: mehdibeheshti8@gmail.com
8. Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Soil and Water Research Institute (SWRI), Karaj, Iran. Email: roya.toluee@gmail.com
9. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: a.avizhgan@ut.ac.ir
10. Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Soil and Water Research Institute (SWRI), Karaj, Iran. Email: meisam.rezaei1@gmail.com
11. Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Soil and Water Research Institute (SWRI), Karaj, Iran. Email: bazargan_k@yahoo.com

Article Info

Article type: Review

Article history:

Received: July. 1, 2025

Revised: Aug. 17, 2025

Accepted: Aug. 26, 2025

Published online: Nov. 2025

Keywords:

*Standard methods,
Product safety,
Heavy metals,
Quality control,
Agricultural products.*

ABSTRACT

For this study, all research published up to the end of 2024 regarding the monitoring of heavy metal concentrations in Iranian agricultural products was collected, evaluated in terms of methodology and quality control, and compared against the benchmarks of a standard study. Subsequently, the assessment of heavy metal concentrations in Iranian agricultural products was carried out using data only from reports that met the minimum standards of a valid study. The methodological evaluation revealed that only 70.4% of the studies had applied proper sampling and sample preparation methods, and just 28.6% had used validated measurement techniques. Furthermore, quality assurance and control indicators were considered in only 24.1% of the studies. The concentration analysis showed that the weighted mean concentration of cadmium (mg/kg fresh weight) was as follows: rice 0.0376, wheat 0.0111, barley 0.0097, maize 0.0129, bean 0.0256, chickpea <LOQ, potato 0.0075, onion 0.0046, cucumber 0.0045, tomato 0.0038, pepper 0.0028, lettuce 0.0044, spinach 0.0150, fresh herbs 0.0400, apple 0.0076, and orange 0.0038. For lead, the respective concentrations were 0.0726, 0.0350, 0.0124, 0.0543, 0.0150, 0.0320, 0.0280, 0.0211, 0.0075, 0.0133, 0.0064, 0.0259, 0.0326, 0.0660, 0.0250, and 0.0193 mg/kg. The mean arsenic concentration in rice grain was 0.0831 mg/kg (range: ND–0.8720). The findings of this study indicated that the mean concentrations of cadmium, lead, and arsenic in the assessed products were lower than the maximum permissible limits recommended by the Iranian National Standard and other international standards. Therefore, there is no major concern regarding excessive levels of these elements in edible agricultural products on a broader national scale.

Cite this article: Cheraghi, M., Shahbazi, K., Fathi-Gerdelidani, A., Yeganeh, M., Hasheminasab Zavareh, K., Marzi, M., Beheshti, M., Toluee, R., Avizhgan, A., Rezaei, M., & Bazargan, K. (2025). Investigation of heavy metals (Cadmium, Lead, and Arsenic) status in Iranian agricultural products and a critique of published studies – a review study, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (9), 2337-2374. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.397857.669968>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.397857.669968>

EXTENDED ABSTRACT

Objectives

Given the growing concerns regarding the contamination of agricultural products with heavy metals and their potential impacts on human health, this study was conducted with the aim of providing a comprehensive and systematic assessment of the concentrations of three heavy metals—cadmium (Cd), lead (Pb), and arsenic (As)—in edible agricultural products produced in Iran. A key component of this research also involved a qualitative evaluation of the methodologies used in previous studies, including sampling procedures, sample preparation, digestion, measurement techniques, and quality control, in comparison with standard methodological requirements. Additionally, the study sought to present an integrated overview of the sources of heavy metals, their uptake, translocation, accumulation, and effects on plants, along with standard analytical methods and data validation procedures.

Methodology

In this review study, all scientific sources—including Persian and English articles, theses, and research project reports—related to the monitoring of heavy metals in Iranian agricultural products published up to the end of 2024 were collected and analyzed. After initial screening, 199 relevant sources were selected and evaluated against the criteria of a standard study. The qualitative assessment revealed that only 70.4% of the studies employed appropriate sampling and sample preparation methods, and only 28.6% used standard-compliant measurement techniques. Moreover, indicators of quality control and assurance were considered in just 24.1% of the studies. In total, 134 studies (equivalent to 67.3%) met the methodological requirements and were included in the final analysis of heavy metal concentrations.

Results

Based on the analysis of validated data, the weighted mean concentration of Cd in various agricultural products was as follows (mg/kg fresh weight): rice 0.0376, wheat 0.0111, barley 0.0097, maize 0.0129, bean 0.0256, chickpea <LOQ, potato 0.0075, onion 0.0046, cucumber 0.0045, tomato 0.0038, pepper 0.0028, radish 0.0467, sugar beet 0.0116, lettuce 0.0044, spinach 0.0150, fresh herbs 0.0400, apple 0.0076, orange 0.0038, and pistachio 0.0131. The corresponding concentrations for Pb were 0.0726, 0.0350, 0.0124, 0.0543, 0.0150, 0.0320, 0.0280, 0.0211, 0.0075, 0.0133, 0.0064, 0.0909, 0.0927, 0.0259, 0.0326, 0.0660, 0.0250, 0.0193, and 0.0523 mg/kg, respectively. The mean As concentrations in rice, chickpea, and pepper were 0.0831, 0.0101, and 0.0085 mg/kg, respectively.

Conclusion

The findings of this study indicate that the mean concentrations of Cd, Pb, and As in edible agricultural products produced in Iran are below the maximum permissible limits set by the Iranian National Standard as well as international guidelines such as Codex and the European Union. Therefore, from a public health perspective, there is no significant concern regarding excessive levels of these elements in agricultural products on a national scale. However, the insufficient adherence to methodological principles and quality control procedures in a substantial portion of the reviewed studies may lead to high levels of uncertainty in the reported data, thus hindering scientific interpretation and evidence-based policymaking. Accordingly, the design and implementation of monitoring programs based on standardized protocols and rigorous quality assurance are essential for the reliable assessment of agricultural product safety in the country.

Authors' Contributions

Meysan Cheraghi and Karim Shabbazi: Writing – original draft, Writing – review & editing, Investigation, Information collection, Original idea of the study, Conceptualization, Supervision, Validation. Arzhang Fathi-Gerdelidani, Mojgan Yeganeh, Kobra Sadat Hasheminasab, Mostafa Marzi, Mehdi Beheshti, and Roya Toluee: Writing – original draft, Writing – review & editing, Information collection, Investigation, Conceptualization. Ayoub Avizhgan, Meisam Rezaei, and Kambiz Bazargan: Writing – review & editing, Conceptualization, Validation.

Data Availability

Not applicable

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran. This support was instrumental in facilitating the successful completion of the present research.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no competing interests.

بررسی وضعیت عناصر سنگین (کادمیم، سرب و آرسنیک) در محصولات کشاورزی ایران و نقدی بر مطالعات منتشر شده-مطالعه مروری

میثم چراغی^۱ | کریم شهبازی^۲ | ارژنگ فتحی گردیدانی^۳ | مژگان یگانه^۴ | کبری سادات هاشمی نسب زواره^۵ | مصطفی مارزی^۶ | مهدی بهشتی^۷ | رویا طلوعی^۸ | ایوب آویژگان^۹ | میثم رضایی^{۱۰} | کامبیز بازرگان^{۱۱}

۱. سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی (AREEO)، موسسه تحقیقات خاک و آب (SWRI)، کرج، ایران، رایانامه: my.cheraghi@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی (AREEO)، موسسه تحقیقات خاک و آب (SWRI)، کرج، ایران، رایانامه: shahbazikarim@yahoo.com
۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، رایانامه: arzhangfathi@ut.ac.ir
۴. سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی (AREEO)، موسسه تحقیقات خاک و آب (SWRI)، کرج، ایران، رایانامه: yeganehmojgan@yahoo.com
۵. سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی (AREEO)، موسسه تحقیقات خاک و آب (SWRI)، کرج، ایران، رایانامه: k.hasheminasab@gmail.com
۶. سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی (AREEO)، موسسه تحقیقات خاک و آب (SWRI)، کرج، ایران، رایانامه: mostafamarzi69@gmail.com
۷. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، رایانامه: mehdibeheshti8@gmail.com
۸. سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی (AREEO)، موسسه تحقیقات خاک و آب (SWRI)، کرج، ایران، رایانامه: roya.toluee@gmail.com
۹. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، رایانامه: a.avizghan@ut.ac.ir
۱۰. سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی (AREEO)، موسسه تحقیقات خاک و آب (SWRI)، کرج، ایران، رایانامه: meisam.rezaei1@gmail.com
۱۱. سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی (AREEO)، موسسه تحقیقات خاک و آب (SWRI)، کرج، ایران، رایانامه: bazargan_k@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله مروری	برای انجام این پژوهش، تمامی مطالعات منتشر شده تا پایان سال ۱۴۰۳ در زمینه پایش غلظت عناصر سنگین در محصولات کشاورزی ایران گردآوری و از نظر متدولوژی و کنترل کیفیت نتایج ارزیابی و با شاخص‌های یک مطالعه استاندارد مقایسه گردید. سپس بررسی وضعیت غلظت فلزات سنگین در محصولات کشاورزی ایران با استفاده از نتایج گزارش‌هایی که از حداقل‌های یک مطالعه استاندارد برخوردار بودند انجام گرفت. ارزیابی متدولوژی مطالعات نشان داد که تنها در ۷۰/۴ درصد مطالعات روش نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها و در ۲۸/۶ درصد مطالعات روش اندازه‌گیری غلظت، منطبق با استانداردهای معتبر انجام شده بود. همچنین، تنها در ۲۴/۱ درصد مطالعات به شاخص‌های کنترل و تضمین کیفیت توجه شده بود. ارزیابی غلظت عناصر سنگین نشان داد که میانگین وزنی غلظت کادمیم در محصولات برنج ۰/۰۳۷۶، گندم ۰/۰۱۱۱، جو ۰/۰۰۹۷، ذرت ۰/۰۱۲۹، لوبیا ۰/۰۲۵۶، نخود <LOQ>، سیب‌زمینی ۰/۰۰۷۵، پیاز ۰/۰۰۴۶، خیار ۰/۰۰۴۵، گوجه‌فرنگی ۰/۰۰۳۸، فلفل ۰/۰۰۲۸، کاهو ۰/۰۰۴۴، اسفناج ۰/۰۱۵۰، سبزی خوردن ۰/۰۰۴۰، سیب ۰/۰۰۷۶ و پرتقال ۰/۰۰۳۸ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن تازه بود و برای سرب به ترتیب ۰/۰۳۵۰، ۰/۰۱۲۴، ۰/۰۵۴۳، ۰/۰۱۵۰، ۰/۰۳۲۰، ۰/۰۲۸۰، ۰/۰۲۱۱، ۰/۰۰۷۵، ۰/۰۱۳۳، ۰/۰۰۶۴، ۰/۰۲۵۹، ۰/۰۳۲۶، ۰/۰۰۶۶، ۰/۰۲۵۰ و ۰/۰۱۹۳ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. میانگین غلظت آرسنیک در دانه برنج نیز ۰/۰۸۳۱ (دامنه ND-۰/۸۷۲۰) میلی‌گرم در کیلوگرم بود. این مطالعه نشان داد که میانگین غلظت کادمیم، سرب و آرسنیک در محصولات مورد بررسی از بیشینه سطوح مجاز توصیه شده در استاندارد ملی ایران و سایر استانداردهای بین‌المللی کمتر است، بنابراین، نگرانی جدی در مورد سطوح بیش از حد این عناصر در محصولات کشاورزی خوراکی در سطح وسیع وجود ندارد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۱۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۵/۲۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۴	
تاریخ انتشار: آذر ۱۴۰۴	
واژه‌های کلیدی:	
روش‌های استاندارد،	
سلامت محصول،	
عناصر سنگین،	
کنترل کیفی،	
محصولات کشاورزی.	

استناد: چراغی، میثم؛ شهبازی، کریم؛ فتحی گردیدانی، ارژنگ؛ یگانه، مژگان؛ هاشمی نسب زواره، کبری سادات؛ مارزی، مصطفی؛ بهشتی، مهدی؛ طلوعی، رویا؛ آویژگان، ایوب؛ رضایی، میثم؛ بازرگان، کامبیز. (۱۴۰۴). بررسی وضعیت عناصر سنگین (کادمیم، سرب و آرسنیک) در محصولات کشاورزی ایران و نقدی بر مطالعات منتشر شده-مطالعه مروری، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۶ (۹)، ۲۳۲۷-۲۳۷۴.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.397857.669968>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.397857.669968>

مقدمه

سلامت محصولات کشاورزی خوراکی از اهمیت بالایی برخوردار است، چراکه به طور مستقیم سلامت انسان را تحت تأثیر قرار می دهد. امنیت غذایی جهانی دو جنبه اساسی دارد؛ تأمین مقادیر کافی غذا متناسب با تقاضا، و تضمین کیفیت آن از نظر ارزش تغذیه ای و ایمنی مواد غذایی (Vågsholm et al., 2020). با این حال، در برخی مناطق به دلیل گسترش منابع آلودگی در زنجیره غذایی، ایمنی غذایی در معرض خطر قرار می گیرد (Sweta and Singh, 2024). فلزات سنگین، شبه فلزات، آفت کش های مصنوعی، ترکیبات نانو و میکرو پلاستیکی، مواد رادیواکتیو و ترکیبات هیدروکربنی از جمله آلاینده های اصلی هستند که به طور رایج در خاک و آب کشاورزی یافت می شوند (Barik et al., 2025; Weldelessie et al., 2018). آلودگی اکوسیستم های کشاورزی با این مواد سمی، که عمدتاً ناشی از فعالیت های انسانی مانند مصرف بیش از حد آفت کش ها و کودهای شیمیایی، دفع غیر بهداشتی پسماندهای جامد، فعالیت های معدنی و غیره است، یکی از نگرانی های مهم زیست محیطی به شمار می رود. از بین این منابع آلودگی، فلزات سنگین و شبه فلزات به دلیل سمیت بالا، پایداری محیطی، خاصیت تجمع پذیری در بدن و غیرقابل تجزیه بودن از نظر زیستی، اثرات متابولیکی و فیزیولوژیکی زیان باری بر موجودات زنده دارند و به راحتی از یک سطح تغذیه ای به سطح دیگر منتقل می شوند (Betianu et al., 2024; Sobhanardakani, 2019).

راه های مختلفی از جمله؛ تنفس، تماس پوستی و مصرف مواد غذایی و آب آلوده برای ورود عناصر سنگین به بدن انسان وجود دارد. یکی از مهم ترین منابع، محصولات کشاورزی خوراکی آلوده است. عناصر سنگین توسط ریشه گیاهان از خاک جذب می شوند، بنابراین آلودگی خاک های زراعی به فلزات سنگین، نقش مهمی در ورود آنها به زنجیره غذایی انسان دارد. اخیراً مشخص شده است که ۱۴-۱۷ درصد اراضی زراعی سطح دنیا تحت تأثیر حد اقل یک عنصر سنگین قرار دارند (Hou et al., 2025). منابع آلودگی فلزات سنگین در خاک متنوع هستند، اما در یک دسته بندی کلی به دو گروه منابع طبیعی و منابع انسانی تقسیم می شوند (Rai et al., 2019; Wang et al., 2023). مطالعات نشان دهنده ی تجمع فلزات سنگین و شبه فلزاتی مانند کادمیوم (Cd)، سرب (Pb)، آرسنیک (As)، جیوه (Hg)، کروم (Cr) و سایر عناصر سنگین در قسمت های خوراکی محصولات کشاورزی در سراسر جهان هستند (Calderon et al., 2023; Sweta and Singh, 2024). جذب مقادیر بالای فلزات سنگین توسط گیاهان زراعی از یک سو منجر به صدمات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی به گیاه و کاهش عملکرد آن شده و از سوی دیگر باعث کاهش کیفیت محصول از منظر سلامت انسان می شود (Rai et al., 2019). از این رو، سازمان های ملی و بین المللی مسئول در حوزه سلامت مواد غذایی مانند کدکس آلیمنتاریوس (Codex Alimentarius) و سازمان استاندارد اتحادیه اروپا (European Union Standards)، مقررات سختگیرانه ای برای بیشینه غلظت مجاز بسیاری از عناصر سنگین در محصولات کشاورزی خوراکی تدوین کرده اند که هدف اصلی آن حفاظت از سلامت مصرف کنندگان و تضمین تجارت عادلانه محصولات غذایی در سطح جهانی است (Codex, 1995; EU-Commission, 2023).

محصولات کشاورزی از جمله غلات، حبوبات، سبزیجات، صیفی جات و میوه ها به دلیل دارا بودن مواد مغذی مختلف مانند ویتامین ها و عناصر غذایی ضروری برای بدن، منبع اصلی تغذیه انسان محسوب می شوند. در میان آنها، سبزیجات بیش از سایر محصولات مستعد تجمع فلزات سنگین هستند؛ چرا که ارتفاع کوتاهی دارند، که انتقال عناصر سنگین از ریشه به قسمت های خوراکی (برگ) را تسهیل می کند. علاوه بر این، بخش خوراکی آنها برگ است، که منبع اصلی تجمع عناصر سنگین در گیاهان است (Aboubakar et al., 2023; Bagdatlioglu et al., 2010; Sweta and Singh, 2024). در سال های اخیر، گسترش منابع آلودگی در خاک، آب و نهادهای کشاورزی، منجر به افزایش غلظت عناصر سنگین در محیط زیست و در نتیجه محصولات کشاورزی شده و نگرانی های جهانی را تشدید کرده است (Rai et al., 2019). این نگرانی ها اغلب به اثرات بیماری زای این عناصر مرتبط هستند. زمانی که عناصر سنگین وارد بدن شوند، در اندام های مختلف تجمع می یابند و در صورت عبور از حد مجاز، می توانند منجر به بروز بیماری های مختلفی از جمله انواع سرطان ها شوند (Jomova et al., 2024). از این رو، بررسی وضعیت عناصر سنگین در محصولات کشاورزی خوراکی از اهمیت بالایی برخوردار است. مطالعه حاضر با هدف بررسی وضعیت غلظت عناصر سنگین در محصولات کشاورزی خوراکی تولید شده در ایران انجام شد. با وجود انجام پروژه های تحقیقاتی متعدد و چندین طرح و برنامه پایش میدانی در این زمینه، هنوز تصویر روشنی از وضعیت این عناصر در بسیاری از محصولات کشاورزی ایران وجود ندارد. از جمله دلایل این وضعیت می توان به یک برنامه ملی پایش کیفیت محصولات، ناپیوسته بودن مطالعات (اطلاعات)، پیچیدگی اندازه گیری عناصر سنگین در غلظت های کم، کمبود زیرساخت های آزمایشگاهی و بعضاً عدم رعایت الزامات استاندارد در انجام مطالعات پایش که در نهایت به تولید داده های با عدم قطعیت بالا منجر می شود، اشاره کرد. از آنجایی که سطوح عناصر

سنگین در محصولات کشاورزی خوراکی مستقیماً با سلامت انسان در ارتباط است، تمام مراحل مطالعات پایش از جمله نمونه‌برداری، آماده‌سازی، هضم، اندازه‌گیری، تحلیل و گزارش نتایج باید منطبق بر روش‌های استاندارد صورت گیرد، موضوعی که در بسیاری از مطالعات پیشین انجام شده در ایران به درستی رعایت نشده است. در این مطالعه تلاش شد تا با نگرشی جامع به منابع فلزات سنگین، جذب، انتقال، تجمع و تأثیر آنها بر گیاهان، استانداردهای ملی و بین‌المللی بیشینه غلظت عناصر سنگین در محصولات کشاورزی، روش‌های اندازه‌گیری استاندارد و نحوه اعتبار سنجی داده‌ها پرداخته شود. همچنین تمامی مطالعات پیشین انجام شده در زمینه پایش غلظت فلزات سنگین در محصولات کشاورزی ایران، به‌منظور ارائه یک دیدگاه روشن از وضعیت غلظت این عناصر در محصولات کشاورزی خوراکی، از نظر کیفی و کمی تجزیه و تحلیل شدند.

منابع عناصر سنگین

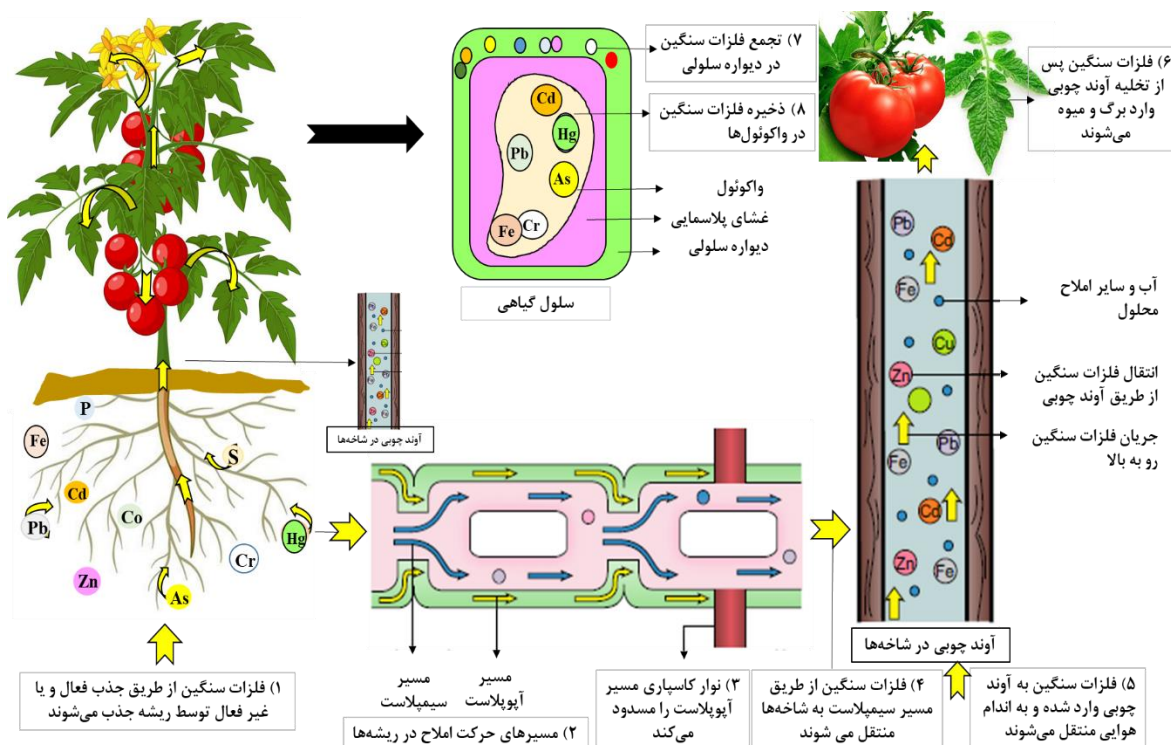
منابع مختلفی برای ورود عناصر سنگین به محیط‌زیست و محصولات کشاورزی وجود دارد که بطور کلی می‌توان آنها را در دو دسته منابع طبیعی و منابع انسانی قرار داد (Rai et al., 2019; Wang et al., 2023). فعالیت‌های انسانی شامل مصرف نهاده‌های کشاورزی (کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها)، استفاده از آب فاضلاب برای آبیاری، معدن کاوی، صنعت، استفاده از سوخت‌های فسیلی و استفاده از ترکیبات آلی و لجن فاضلاب، اصلی‌ترین منابع ورود فلزات سنگین به خاک و محصولات کشاورزی هستند (Edelstein and Ben-Hur, 2018; Rai et al., 2019; Tong et al., 2022). مواد مادری، گرد و غبار آلوده، ذرات آتشفشانی و آتش‌سوزی‌های طبیعی جنگل‌ها و مراتع، مهمترین منابع طبیعی ورود عناصر سنگین به محیط‌زیست هستند (Edelstein and Ben-Hur, 2018; Rai et al., 2019; Tong et al., 2022). در بسیاری از مناطق دنیا، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، به‌دلیل کمبود آب از پساب فاضلاب برای آبیاری استفاده می‌شود (Rai et al., 2019). آبیاری با پساب فاضلاب می‌تواند منجر به تجمع عناصر سنگین در خاک و جذب توسط گیاه شود (Nagajyoti et al., 2010).

کاربرد نهاده‌های کشاورزی با محتوای بالای عناصر سنگین مانند لجن فاضلاب، کمپوست‌ها، کودهای حیوانی، کودهای فسفاتی و نیتروژنی، آهک و آفت‌کش‌ها باعث ورود این عناصر به خاک و گیاه می‌شود (Edelstein and Ben-Hur, 2018; Rai et al., 2019; Ross, 1994; Tong et al., 2022). دفع و یا استفاده از پسماند کارخانه‌های مواد شیمیایی، تقطیر، آبکاری، نساجی و صنایع چرم باعث ورود غلظت قابل توجهی از عناصر سنگین نظیر Fe, Cu, Cr, Pb, Ni و Mn به خاک می‌شود (Chandra and Kumar, 2017). علاوه بر این، در دهه‌های اخیر توسعه شهرسازی و صنعت باعث افزایش قابل توجه غلظت عناصر سنگین مختلف نظیر Zn, Ni, Pb, Cr, As و Cd در اتمسفر شده است (Edelstein and Ben-Hur, 2018; Shahid et al., 2015). ذرات ریز منتشر شده توسط فعالیت‌های صنعتی و وسایل نقلیه در نهایت در خاک تجمع می‌یابند (França et al., 2017). گزارش شده است که مهمترین فعالیت‌های انسانی در ورود عناصر سنگین به محیط‌زیست، شامل معدن کاوی (۴۰/۱ درصد)، کشاورزی (۲۰/۴ درصد) و صنعت (۱۶ درصد) هستند (Wang et al., 2023).

جذب، انتقال و تجمع عناصر سنگین در گیاه

عناصر سنگین مانند دیگر عناصر غذایی از طریق مکانیسم‌های جذب فعال و غیرفعال توسط ریشه گیاهان جذب می‌شوند (Pasricha et al., 2021). فرآیند جذب عناصر سنگین از خاک شامل مراحل متعددی است که حرکت فلز در خاک و رسیدن به سطح ریشه، جذب و ورود به ریشه، انتقال از ریشه به اندام هوایی، جابجایی در اندام هوایی تا رسیدن به برگ، محصول یا اندام‌ها و در نهایت ذخیره آن در قسمت‌های مختلف اندام هوایی را شامل می‌شود (Zakaria et al., 2021). به‌طور کلی، جذب و تجمع عناصر سنگین در اندام‌های گیاهان طی سه مرحله انجام می‌پذیرد: (۱) عرضه عناصر سنگین از خاک به ریشه و جذب آنها توسط ریشه؛ (۲) انتقال عناصر سنگین از ریشه به اندام‌های هوایی از طریق بارگذاری در آوند چوبی (زالیم؛ و ۳) ذخیره‌سازی در بخش‌های مختلف اندام هوایی به‌ویژه در واکوئل‌ها! در طول این فرآیند پروتئین‌های ناقل (ترانسپورترها) درگیر شده و باعث جذب و سپس ذخیره فلز توسط گیاه می‌شوند (Ghori et al., 2016). **Error! Reference source not found.** مجموعه‌ای از مکانیسم‌هایی را نشان می‌دهد که از طریق آنها گیاهان عناصر سنگین را جذب، منتقل و در نهایت در اندام‌های خود ذخیره می‌کنند. پس از اینکه عناصر سنگین جذب و به اندام هوایی منتقل شدند، عمدتاً در

برگ‌ها و به مقدار کمتر در میوه یا دانه تجمع می‌یابند (Shahid et al., 2017). به‌طور کلی، در محصولات گروه سبزیجات، عناصر سنگین بیشتر در قسمت‌های برگ نسبت به سایر بخش‌های خوراکی تجمع می‌یابند، بنابراین، برگ‌ها معمولاً سطح بالاتری از عناصر سنگین را تجمع می‌دهند. در مقابل، در میوه‌ها و دانه‌ها تجمع عناصر سنگین به‌مراتب کمتر است (Mawari et al., 2022). برخی از محصولات زراعی تمایل بیشتری به تجمع عناصر سنگین خاص دارند. به‌عنوان مثال، برنج به‌طور طبیعی آرسنیک بیشتری تجمع می‌دهد، کاهو و پیاز، سرب و هویج و اسفناج نیز کادمیم را راحت‌تر تجمع می‌دهند (Mawari et al., 2022; H. Zhou et al., 2016). برای درک بیشتر مکانیسم‌های درگیر در این فرایندها، مطالعات مقالات مروری انجام شده توسط Kaninga et al. (۲۰۲۰)، Violante et al. (۲۰۱۰) و Ghorri et al. (۲۰۱۶) توصیه می‌شود.



شکل ۱- مسیرهای اصلی جذب و ذخیره عناصر سنگین در گیاهان. ابتدا عناصر سنگین به‌دلیل حضور در محلول خاک توسط ریشه‌ها جذب شده و از طریق مسیرهای آپوپلاست و سیمپلاست به اندام هوایی منتقل می‌شوند. در اندام هوایی عناصر سنگین از طریق زایلیم به برگ‌ها یا میوه‌ها منتقل می‌شوند. در برگ‌ها عناصر سنگین در واکوئول‌ها ذخیره می‌شوند.

تأثیر عناصر سنگین بر گیاهان

در فرایندهای بیولوژیکی، عناصر سنگین به دو گروه تقسیم می‌شوند: عناصر سنگین ضروری (شامل: آهن، روی، مس، منگنز، کبالت، نیکل و مولیبدن) و عناصر سنگین غیر ضروری (شامل: آرسنیک، کادمیم، سرب، جیوه و کروم). عناصر سنگین ضروری در غلظت‌های بسیار پایین برای متابولیسم و رشد گیاه مورد نیاز هستند (Bharti and Sharma, 2022). از آنجایی که عناصر سنگین قابلیت تجزیه زیستی ندارند، افزایش غلظت آنها می‌تواند به‌طور بالقوه برای موجودات روی زمین سمی باشد (Ghorri et al., 2016). انسان‌ها، حیوانات و گیاهان همگی تحت تأثیر سطوح بالای عناصر سنگین قرار می‌گیرند. زیرا این عناصر با تجمع در سلول‌ها و بافت‌های آنها، مانع از انجام فعالیت‌های زیستی طبیعی می‌شوند. غلظت‌های بیش از حد عناصر سنگین اثرات منفی متعددی بر خصوصیات مورفو-فیزیولوژیکی و فرایندهای بیوشیمیایی گیاهان دارد. این اثرات بسته به نوع فلز سنگین و نوع گیاه ممکن است متفاوت باشند (جدول ۱)، با این وجود برخی از اثرات عناصر سنگین مانند تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژنی (تشدید تنش اکسیداتیو) و اختلال در متابولیسم و فتوسنتز گیاه، تقریباً در تمامی گیاهان و برای اغلب عناصر سنگین مشترک‌اند (Bharti and Sharma, 2022).

جدول ۱- اثر سطوح بیش از حد عناصر سنگین غیر ضروری بر جنبه‌های مختلف رشد و نمو گیاه

فلز سنگین	گیاه	مکانیسم اثر گذاری بر سلامت گیاه	منبع
سرب	عدسک آبی ^۱	کاهش فعالیت میتوزی در مرحله متافاز و آنافاز، اختلال در تقسیم سلولی ریشه و توقف رشد ریشه	(Kaur et al., 2014; Samardakiewicz and Woźny, 2005)
سیر و ذرت		اختلال در سازمان دهی میکروتوبول‌ها و کاهش تقسیم سلولی، کاهش رشد ساقه و بازدارندگی از گسترش برگ‌ها	(Eun et al., 2000; Liu et al., 2009)
آلوکاسیا و نارنج		پراکسیداسیون لیپیدی و تخریب غشاء از طریق افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژنی در سلول و تشدید تنش اکسیداتیو	(Giannakoula et al., 2021; Reddy et al., 2005)
لوبیا، خیار و گندم		توقف فتوسنتز از طریق جلوگیری از انتقال الکترون، مهار چرخه کالوین و بسته شدن روزنه‌ها، کاهش جذب منیزیم و آهن (مواد تشکیل دهنده کلروفیل) و در نتیجه مهار سنتز کلروفیل	(Burzyński, 1987)
کادمیم	ذرت	تداخل در فعالیت آنزیم‌های دخیل در فتوسنتز و متابولیسم نیتروژن	(Erdal and Turk, 2016)
گندم و ذرت		اختلال در تعادل آبی گیاه، اختلال در باز شدن روزنه‌ها و همچنین جذب مواد معدنی، کاهش فعالیت ATPase غشای پلاسمایی، تغییر در نفوذپذیری غشاء	(Astolfi et al., 2005; Konotop et al., 2017)
بادمجان		کاهش سطح محافظت کننده‌های اسمزی (عمدتاً پرولین) و تغییر پایداری ژنتیکی	(Al Khateeb and Al-Qwasemeh, 2014)
آرسنیک	ماش	کاهش رشد گیاه با ایجاد نکرز سلولی، کلروز و نشت الکترولیت از غشای سلولی	(Singh et al., 2007)
گیاهان مختلف		تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژنی، آسیب به اسیدهای نوکلئیک و پروتئین‌ها، پراکسیداسیون لیپیدهای موجود در غشاء	(Zargari, 2021)
کروم	ذرت و خربزه	متوقف کردن فتوسنتز، کاهش محتوای کلروفیل، نرخ خالص فتوسنتز و ظرفیت تبادل گازی از برگ، مهار جوانه زنی و اختلال در رشد ریشه	(Akinci and Akinci, 2010; Anjum et al., 2016)
برنج و سویا		تنش اکسیداتیو در سلول‌های گیاهی، آسیب به ساختارهای سلولی و اختلال در فرآیندهای متابولیک ضروری	(Balasaraswathi et al., 2017; Panda, 2007)
ذرت		اختلال در رشد ریشه، کاهش تشکیل ریشه‌های موئین، تغییر ساختار ریشه	(Mallick et al., 2010)
اسفناج		تأثیر منفی بر میتوکندری‌ها و روزنه‌های برگ، اتصال به پروتئین‌های کانال آب متصل و تحت تأثیر قرار دادن نفوذپذیری ریشه به ورود آب از طریق آکوپورین‌ها	(Frick et al., 2013)
برنج		اختلال در فتوسنتز، نرخ تعرق، جذب آب و سنتز کلروفیل، تسهیل هدررفت منیزیم، منگنز، پتاسیم و در عوض تجمع آهن	(Mao et al., 2021)
لوبیا		تداخل با آنتی اکسیدان‌های غیر آنزیمی مانند گلوتاتیون، تیول‌ها و آنتی اکسیدان‌های آنزیمی مانند آسکوربات پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و گلوتاتیون ردوکتاز و اختلال در عملکرد سیستم آنتی اکسیدانی	(Israr et al., 2006)

بیشینه غلظت مجاز عناصر سنگین در محصولات خوراکی

به منظور تضمین سلامت غذایی و ایمنی محصولات کشاورزی مصرفی، نهادهای ملی و بین‌المللی اقدام به تدوین و به‌روزرسانی استانداردهایی برای حداکثر مقادیر مجاز فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها در محصولات خوراکی نموده‌اند (جدول‌های ۲ تا ۵). برخی کشورها، از جمله بسیاری از کشورهای در حال توسعه، استانداردهای تعیین شده توسط کمیسیون کدکس آلمنتاریوس را به عنوان معیار ملی پذیرفته‌اند. با این حال، کشورهای دیگری چین، اتحادیه اروپا و ایالات متحده آمریکا، با توجه به الگوهای مصرف و ملاحظات بومی، اقدام به تدوین استانداردهای ملی یا منطقه‌ای اختصاصی نموده‌اند (EN-915, 2023; INSO-12968, 2023). ایران نیز از جمله کشورهایی است که استانداردهای ملی جداگانه‌ای برای حدود مجاز فلزات سنگین در محصولات کشاورزی تدوین نموده است. مقادیر مجاز آلاینده‌ها در محصولات غذایی، مقادیر ثابتی نبوده و ماهیتی پویا دارند؛ این مقادیر به‌طور مستمر در معرض بازنگری و به‌روزرسانی هستند (جدول ۲ تا ۵ را ببینید). از این رو، پژوهشگران باید در تطبیق نتایج آزمایشگاهی خود با استانداردهای موجود، همواره از آخرین نسخه رسمی و معتبر این اسناد استفاده نمایند. همچنین توصیه می‌شود که در ارجاع به این مقادیر، از ارجاع‌دهی غیرمستقیم (نظیر استناد به مقالات یا گزارش‌هایی که صرفاً به اعداد استاندارد اشاره کرده‌اند) اجتناب شود و به جای آن، به اسناد اصلی و رسمی استاندارد استناد گردد.

1. Lemna minor L.
2. Microtubule
3. Alocasia macrorrhiza L.
4. Water channel proteins

جدول ۲- بیشینه غلظت مجاز آلاینده‌ها (میلی گرم در کیلوگرم وزن تر) براساس استاندارد جهانی کدکس^۱ (Codex, 2023)

مواد غذایی	کادمیم	سرب	آرسنیک ^۲	این استاندارد در سال ۱۹۹۵ تدوین شد. در سال‌های مختلف بازنگری و اصلاح شد. موارد تغییر یافته در ستون روبروی هر ماده غذایی نوشته شده است.
سبزیجات کلمی	۰/۰۵	۰/۱	-	بدون تغییر برای کادمیم از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳ حد مجاز سرب در استاندارد سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵، برابر با ۰/۳ میلی گرم در کیلوگرم وزن تر بود.
سبزیجات پیازی	۰/۰۵	۰/۱	-	بدون تغییر برای کادمیم و سرب از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳
سبزیجات میوه‌ای	۰/۰۵	۰/۰۵	-	بدون تغییر برای کادمیم از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳ حد مجاز سرب در سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵، برابر با ۰/۱ میلی گرم در کیلوگرم وزن تر بود.
سبزیجات برگ‌ی	۰/۲	۰/۳	-	بدون تغییر برای کادمیم و سرب از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳
سبزیجات لگومی	۰/۱	۰/۱	-	بدون تغییر برای کادمیم از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳ حد مجاز سرب در سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵، برابر با ۰/۲ میلی گرم در کیلوگرم وزن تر بود.
حبوبات	۰/۱	۰/۱	-	بدون تغییر برای کادمیم از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳ حد مجاز سرب در سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵، برابر با ۰/۲ میلی گرم در کیلوگرم وزن تر بود.
سبزیجات غده‌ای و ریشه‌ای	۰/۱	۰/۱	-	بدون تغییر برای کادمیم و سرب از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳
سبزیجات ساقه‌ای	۰/۱	-	-	بدون تغییر برای کادمیم و سرب از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳
گندم	۰/۲	۰/۲	-	حد مجاز سرب در این استاندارد بصورت کلی برای دانه غلات معرفی شده است. بدون تغییر برای کادمیم و سرب از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳
برنج	۰/۴	۰/۲	۰/۲ (آرسنیک معدنی)	حد مجاز سرب در این استاندارد به‌طور کلی برای غلات معرفی شده است. حد مجاز آرسنیک، آرسنیک معدنی است. حد مجاز آرسنیک از سال ۲۰۱۵، اضافه شده است. بدون تغییر برای کادمیم، سرب از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳
سایر غلات	۰/۱	۰/۲	-	حد مجاز سرب در این استاندارد بصورت کلی برای غلات معرفی شده است. بدون تغییر برای کادمیم و سرب از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳
میوه‌های دانه ریز و توت‌ها	-	۰/۱	-	بدون تغییر برای کادمیم از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳ حد مجاز سرب در سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵، برابر با ۰/۲ میلی گرم در کیلوگرم وزن تر بود.
میوه‌ها	-	۰/۱	-	بدون تغییر برای کادمیم و سرب از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳

۱. کدکس مجموعه مقررات و استانداردهای بین‌المللی غذاست که با همکاری سازمان‌های FAO و WHO ایجاد شده است.

۲. بیشینه حد مجاز استاندارد آرسنیک تنها برای محصول برنج تعیین شده است، که آرسنیک معدنی می‌باشد.

جدول ۳- بیشینه غلظت مجاز آلاینده‌ها (میلی گرم در کیلوگرم وزن تر) براساس استاندارد اتحادیه اروپا^۱ (EN-915, 2023)

ماده غذایی	کادمیم	سرب	آرسنیک	رفرنس دهی توضیحات
میوه‌های خانواده مرکبات، میوه‌های هسته‌دار، زیتون، کیوی، موز، انبه، پاپایا و آناناس	۰/۰۲	-	-	این تقسیم‌بندی برای میوه‌ها از سال ۲۰۲۱ اضافه شده است. تا قبل از آن مقدار مجاز کادمیم برای همه میوه‌ها به‌ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۱ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر، اعلام شده بود.
توت‌ها و میوه‌های ریز	۰/۰۳	۰/۲	-	این تقسیم‌بندی برای میوه‌ها از سال ۲۰۲۱ اضافه شده است. تا قبل از آن مقدار مجاز کادمیم و سرب برای همه میوه‌ها به‌ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۱ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر، اعلام شده بود.
سایر میوه‌ها	۰/۰۵	۰/۱	-	بدون تغییر برای کادمیم بدون تغییر برای سرب
چغندر	۰/۰۶	-	-	این تقسیم‌بندی برای سبزی‌ها از سال ۲۰۲۱ اضافه شده است. تا قبل از آن مقدار مجاز کادمیم برای همه سبزی‌های غده‌ای و ریشه‌ای (به‌غیر از مواردی که شامل چغندر نبود)، ۰/۱ اعلام شده بود.
کرفس	۰/۱۵	-	-	تا قبل از به روزرسانی سال ۲۰۲۱، مقدار مجاز کادمیم در کرفس معادل ۰/۲ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر بود.
ترب و ازگیل	۰/۲	-	-	این تقسیم‌بندی برای سبزی‌ها از سال ۲۰۲۱ اضافه شده است. تا قبل از آن مقدار مجاز کادمیم برای همه سبزی‌های غده‌ای و ریشه‌ای، ۰/۱ اعلام شده بود.
ترپچه	۰/۰۲	-	-	این تقسیم‌بندی برای سبزی‌ها از سال ۲۰۲۱ اضافه شده است. تا قبل از آن مقدار مجاز کادمیم برای همه سبزی‌های غده‌ای و ریشه‌ای، ۰/۱ اعلام شده بود.

ادامه جدول ۳- بیشینه غلظت مجاز آلاینده‌ها (میلی گرم در کیلوگرم وزن تر) براساس استاندارد اتحادیه اروپا^۱ (EN-915, 2023)

ماده غذایی	کادمیم	سرب	آرسنیک	رفرنس دهی	توضیحات
شلغم	۰/۰۵	-	-	این تقسیم‌بندی برای سبزی‌ها از سال ۲۰۲۱ اضافه شده است. تا قبل از آن مقدار مجاز کادمیم برای همه سبزی‌های غده‌ای و ریشه‌ای، ۰/۱ اعلام شده بود.	
زنجبیل تازه، زردچوبه تازه	-	۰/۸	-	این مورد از سال ۲۰۲۱ اضافه شده است.	
سایر سبزیجات	۰/۱	۰/۱	-	بدون تغییر برای کادمیم	
ریشه‌ای و غده‌ای	-	-	-	بدون تغییر برای سرب	
سیر	۰/۰۵	-	-	این تقسیم‌بندی برای سبزی‌ها از سال ۲۰۲۱ اضافه شده است.	
سایر سبزیجات پیازی	۰/۰۳	۰/۱	-	این تقسیم‌بندی برای سبزی‌ها از سال ۲۰۲۱ اضافه شده است.	
بادمجان	۰/۰۳	-	-	این تقسیم‌بندی برای سبزی‌ها از سال ۲۰۲۱ اضافه شده است. قبل از آن عددی برای حد مجاز کادمیم در بادمجان معرفی نشده بود.	
ذرت شیرین	-	۰/۱	-	-	
سایر سبزیجات میوه - ای	۰/۰۲	۰/۰۵	-	این تقسیم‌بندی برای سبزی‌ها از سال ۲۰۲۱ اضافه شده است. قبل از آن عددی برای حد مجاز کادمیم در سبزیجات میوه‌ای معرفی نشده بود.	
				حد مجاز سرب معادل ۰/۰۵ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر، در سبزیجات میوه‌ای قبل از سال ۲۰۲۱ نیز معتبر است.	
سبزیجات برگه‌ای	۰/۱	۰/۳	-	قبل از سال ۲۰۲۱، حد مجاز کادمیم در این سبزیجات معادل ۰/۲ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر بوده است.	
خانواده کلم	-	-	-	بدون تغییر برای سرب	
سایر سبزیجات خانواده کلم	۰/۰۴	۰/۱	-	این تقسیم‌بندی برای سبزی‌ها از سال ۲۰۲۱ اضافه شده است. قبل از آن عددی برای حد مجاز کادمیم و سرب در سبزیجات خانواده کلم، بجز برگه‌ها، معرفی نشده بود.	
اسفناج و برگ‌های مشابه	۰/۲	-	-	این تقسیم‌بندی برای سبزی‌ها از سال ۲۰۲۱ اضافه شده است. قبل از آن عددی برای حد مجاز کادمیم و سرب این مورد، معرفی نشده بود.	
سایر سبزیجات برگه‌ای	۰/۱	۰/۳	-	حد مجاز کادمیم در سبزیجات برگه‌ای، قبل از به روز رسانی ۲۰۲۱، معادل ۰/۲ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر بوده است.	
				بدون تغییر برای سرب	
لگوها	۰/۰۲	۰/۱	-	در استانداردهای قبل از سال ۲۰۲۱ نبوده است.	
کرفس	۰/۱	-	-	حد مجاز کادمیم در کرفس، قبل از به روز رسانی ۲۰۲۱، معادل ۰/۲ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر بوده است.	
تره فرنگی	۰/۰۴	-	-	این مورد، در استانداردهای قبل از سال ۲۰۲۱ نبوده است.	
سایر سبزیجات ساقه‌ای	۰/۰۳	۰/۱	-	حد مجاز کادمیم در سایر سبزیجات ساقه‌ای، قبل از به روز رسانی ۲۰۲۱، معادل ۰/۱ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر بوده است.	
				قبل از به روز رسانی ۲۰۲۱، حد مجاز سرب در سبزیجات ساقه‌ای معرفی نشده بود.	
دانه گندم دوروم	۰/۱۸	۰/۲	-	حد مجاز کادمیم در دانه گندم، قبل از به روز رسانی ۲۰۲۱، معادل ۰/۲ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر بوده است.	
				حد مجاز سرب به طور کلی برای غلات (بدون تفکیک) و معادل ۰/۲ میلی گرم بر کیلوگرم معرفی شده است.	
جوانه گندم	۰/۲	-	-	-	
جو و چاودار	۰/۰۵	۰/۲	-	حد مجاز کادمیم در دانه غلات (بجز گندم و برنج)، قبل از به روز رسانی ۲۰۲۱، معادل ۰/۱ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر بوده است.	
				حد مجاز سرب بصورت کلی برای غلات (بدون تفکیک) و معادل ۰/۲ میلی گرم بر کیلوگرم معرفی شده است.	
برنج، کینوا، سیوس	۰/۱۵	۰/۲	۰/۱۵	حد مجاز کادمیم در دانه برنج، قبل از به روز رسانی ۲۰۲۱، معادل ۰/۲ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر بوده است.	
گندم، گلوئن گندم	(آرسنیک معدنی)	-	-	حد مجاز کادمیم در دانه غلات (به غیر از گندم و برنج)، قبل از به روز رسانی ۲۰۲۱، معادل ۰/۱ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر بوده است.	
				حد مجاز کادمیم در سیوس، قبل از به روز رسانی ۲۰۲۱، معادل ۰/۲ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر بوده است.	
				حد مجاز سرب به طور کلی برای غلات (بدون تفکیک) و معادل ۰/۲ میلی گرم بر کیلوگرم معرفی شده است.	
غلات (بطور کلی)	-	۰/۲	-	حد مجاز کادمیم در دانه غلات (بجز گندم و برنج)، قبل از بروز رسانی ۲۰۲۱، معادل ۰/۱ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر بوده است.	
				بدون تغییر برای سرب	
حبوبات	۰/۰۴	۰/۲	-	حد مجاز کادمیم برای حبوبات، در استانداردهای قبل از سال ۲۰۲۱ نبوده است.	
				بدون تغییر برای سرب	

۱. استاندارد اتحادیه اروپا، برای کادمیم و سرب در سال ۲۰۲۱ و برای آرسنیک در سال ۲۰۲۳ به روز رسانی شده است. موارد تغییر در جلوی هر محصول/گروه محصولات نوشته شده است.



جدول ۴- بیشینه غلظت مجاز آلاینده‌ها (میلی گرم در کیلوگرم وزن تر) براساس استاندارد ملی چین (GB-2762, 2023)

ماده غذایی	کادمیم	سرب	آرسنیک	جیوه	کروم	رفرنس دهی توضیحات
برنج (پودر)	۰/۲	-	-	۰/۰۲	-	در بروز رسانی ۲۰۲۳، کلمه پودر اضافه شده است.
برنج قهوه‌ای	۰/۲	-	۰/۳۵ ^۱	۰/۰۲	-	حد مجاز معرفی شده برای جیوه، جیوه کل می‌باشد.
سایر غلات	۰/۱	۰/۲	۰/۵ ^۲	-	۱	حد مجاز معرفی شده برای جیوه، جیوه کل می‌باشد.
سبزیجات	۰/۲	۰/۳	-	-	-	در استاندارد چین، این حدود مجاز، برای دانه غلات (به‌طور کلی) معرفی شده است.
برگی	-	-	-	-	-	بدون تغییر برای همه عناصر
لگوها	۰/۱	۰/۲	-	-	-	بدون تغییر برای همه عناصر
سبزیجات	۰/۱	۰/۲	-	-	-	بدون تغییر برای همه عناصر
غده‌ای و ریشه‌ای	-	-	-	-	-	حد مجاز برای زنجبیل در به روز رسانی ۲۰۲۳ اضافه شده است.
زنجبیل	-	۰/۲	-	-	-	بدون تغییر برای همه عناصر
سبزیجات	۰/۱	-	-	-	-	بدون تغییر برای همه عناصر
ساقه‌ای (بجز کرفس)	-	-	-	-	-	بدون تغییر برای همه عناصر
کرفس	۰/۲	-	-	-	-	بدون تغییر برای همه عناصر
سبزیجات	-	۰/۲	-	-	-	بدون تغییر برای همه عناصر
خانواده کلم	-	-	-	-	-	بدون تغییر برای همه عناصر
سایر	۰/۰۵	۰/۱	۰/۵ ^۳	۰/۰۱	۰/۵	حد مجاز معرفی شده برای جیوه، جیوه کل می‌باشد.
سبزیجات	-	-	-	-	-	در استاندارد چین، حد مجاز معرفی شده برای جیوه و کروم، برای سبزیجات تازه (به‌طور کلی) معرفی شده است.
میوه‌ها	۰/۰۵	۰/۱ ^۴	-	-	-	بدون تغییر برای همه عناصر
حبوبات	۰/۲	۰/۲	-	-	۱	بدون تغییر برای همه عناصر

۱. این حد مجاز، مقدار مجاز آرسنیک معدنی در دانه برنج قهوه‌ای است.

۲. این حد مجاز، مقدار آرسنیک کل در دانه سایر غلات است.

۳. این حد مجاز، مقدار آرسنیک کل در سبزیجات است.

۴. استاندارد چین این عدد را برای میوه‌ها بجز قره قاط و انگور فرنگی در نظر گرفته است. عدد معرفی شده برای دو میوه مستثنی شده ۰/۲ میلی گرم در کیلوگرم وزن تر است.

جدول ۵- بیشینه غلظت مجاز آلاینده‌ها (میلی گرم در کیلوگرم وزن تر) براساس استاندارد ملی ایران (INSO-12968, 2021)

ماده غذایی	کادمیم	سرب	آرسنیک	ماده غذایی	کادمیم	سرب	آرسنیک	تدوین ۱۳۸۹	رفرنس دهی توضیحات
گندم	۰/۰۶	۰/۲	-	گندم	۰/۰۳	۰/۱۵	-	استاندارد ملی ایران، ۱۴۰۰ یا ۱۳۸۹	استاندارد ملی ایران، ۱۴۰۰ یا ۱۳۸۹
برنج سفید	۰/۰۶	۰/۱۵	۰/۱۵	برنج	۰/۰۶	۰/۱۵	۰/۱۵	سازمان ملی استاندارد ایران	حد مجاز معرفی شده برای آرسنیک، آرسنیک کل می‌باشد.
برنج قهوه‌ای	۰/۰۸	۰/۲	۰/۲	-	-	-	-	-	-
سایر غلات	۰/۱	۰/۱۵	-	سایر غلات	۰/۱	۰/۱۵	-	-	-
حبوبات	۰/۱	۰/۰۵	-	حبوبات تازه خوری (نخود فرنگی، لوبیا سبز و باقلا سبز)	۰/۱	۰/۲	-	-	-
سویا	۰/۱	-	-	حبوبات (نخود، انواع لوبیا، عدس، ماش و لپه)	۰/۱	۰/۲	-	-	-
-	-	-	-	سویا	۰/۱	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

در بازنگری سال

۱۴۰۰ حذف شده

است.

ادامه جدول ۵- بیشینه غلظت مجاز آلاینده‌ها (میلی گرم در کیلوگرم وزن تر) براساس استاندارد ملی ایران (INSO-12968, 2021)

ماده غذایی	بازنگری ۱۴۰۰			ماده غذایی	تدوین ۱۳۸۹			رفرنس دهی توضیحات
	کادمیم	سرب	آرسنیک		کادمیم	سرب	آرسنیک	
سبزی‌های خانواده کلم	۰/۰۵	۰/۱	-	سبزی‌های خانواده کلم (کلم بروکلی، کلم بروکسل، کلم، کاهو چینی، کلم قرمز، کلم پیچ، گل کلم و کلم قمری)	۰/۰۵	۰/۳	-	
سبزی‌های میوه‌ای	۰/۰۵	۰/۰۵	-	سبزی‌های جالیزی (کدو، بادمجان، خیار، طالبی، خربزه، هندوانه، کدوخلوایی، بامیه، گوجه فرنگی و انواع فلفل)	۰/۰۵	۰/۱	-	
سبزی‌های برگ	۰/۰۵	۰/۲	-	سبزی‌های برگ (برگ چغندر، برگ چغندر قند، کاهو، برگ تربچه، اسفناج، شاهی، جعفری، تره، ریحان، مرزه، شنبلیله، نعنا، شوید و غیره)	۰/۱	۰/۲	-	
سبزی‌های غده‌ای، ریشه‌ای و پیازی	۰/۱	۰/۲	-	سبزی‌های غده‌ای و ریشه‌ای (تربچه، چغندر، چغندر قند، پیاز، پیازچه، هویج، سیر، موسیر، شلغم و تره فرنگی)	۰/۰۵	۰/۱	-	
سبزی‌های ساقه‌ای و دمبرگی	۰/۱	۰/۰۵	-	سبزیجات ساقه‌ای (کرفس، ریواس و کنگر)	۰/۱	-	-	
سیب زمینی	۰/۱	۰/۱	-	سیب‌زمینی	۰/۱	-	-	
میوه‌های نیمه گرمسیری و گرمسیری (مانند انبه، انجیر، انار، خرمالو، موز، زیتون، خرما، آناناس و گواوا)	-	۰/۱	-	میوه‌های نیمه گرمسیری و گرمسیری (انبه، انجیر، انار، خرمالو، موز و خرما)	۰/۰۵	۰/۱	-	در تدوین ۱۳۸۹، حد مجاز کادمیم، سرب و قلع برای زیتون به ترتیب ۰/۰۵، ۱ و ۲۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر معرفی شده بود.
میوه‌های دانه ریز (مانند انگور، انواع تمشک، زرشک، تو فرنگی و انواع توت)	-	۰/۲	-	میوه‌های دانه ریز (انگور، توت فرنگی و انواع توت)	۰/۰۵	۰/۲	-	
مرکبات (مانند پرتقال، لیموترش، لیموشیرین، نارنگی، نارنج و گریپ فروت)	-	۰/۱	-	مرکبات (پرتقال، لیمو ترش، لیمو شیرین، نارنگی، نارنج و گریپ فروت)	۰/۰۵	۰/۱	-	
میوه‌های دانه‌دار (مانند سیب، گلابی و به)	-	۰/۱	-	میوه‌های دانه‌دار (سیب، گلابی و به)	۰/۰۵	۰/۱	-	
میوه‌های هسته‌دار (مانند گیلاس، آلبالو، زردآلو، انواع آلو، انواع هلو، شلیل و گوجه سبز)	-	۰/۱	-	میوه‌های هسته‌دار (گیلاس، آلبالو، زردآلو، آلو، هلو، شلیل و گوجه سبز)	۰/۰۵	۰/۱	-	

اندازه‌گیری عناصر سنگین در محصولات کشاورزی

اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین در محصولات کشاورزی تنها زمانی معتبر است که تمامی مراحل آزمون شامل نمونه‌برداری، آماده‌سازی، هضم نمونه، اندازه‌گیری، کنترل کیفی، تحلیل و گزارش نتایج، مطابق با روش‌های استاندارد تأیید شده انجام شود. این مراحل مانند حلقه‌های یک زنجیر به هم پیوسته و مرتبط هستند؛ از این رو، دقت در اجرای هر مرحله برای اطمینان از تولید داده‌های قابل اعتماد ضروری است. اجرای استانداردهای ثابت در تمامی این مراحل، زمینه را برای جمع‌بندی، مقایسه، و تفسیر نتایج در مطالعات مختلف در سطح ملی و بین‌المللی فراهم می‌سازد.

نمونه‌برداری

نمونه‌برداری یکی از حساس‌ترین و در عین حال بحرانی‌ترین مراحل آنالیز است و می‌توان آن را شکننده‌ترین حلقه زنجیره آزمون دانست. نمونه‌ای که به‌درستی تهیه نشده باشد، حتی اگر با پیشرفته‌ترین تجهیزات و توسط مجرب‌ترین کارشناسان مورد تجزیه قرار گیرد، نماینده وضعیت واقعی نخواهد بود. در زمان نمونه‌برداری، ثبت و مستندسازی کامل اطلاعات نمونه ضروری است. فرم مشخصات نمونه‌برداری ارائه شده در استاندارد ملی ایران به شماره ۱۷۰۳۳ تنها یک فرم عمومی است؛ لذا با توجه به هدف مطالعه و صلاحیت کارشناس، می‌تواند برای افزودن اطلاعات تکمیلی اصلاح گردد. برخی از اطلاعات تکمیلی نظیر: منبع نمونه (مزرعه‌ای، گلخانه‌ای، فروشگاه، انبار یا میداين میوه و تره‌بار)، زمان نمونه‌برداری (فصل، سال، زمان برداشت)، نوع مدیریت اعمال شده (کودها و آفت‌کش‌ها، آبیاری و ...)، رقم محصول، هر گونه مشخصات ظاهری از نظر کیفیت و سبزی نمونه‌ها، روش نمونه‌برداری (ترکیبی، منفرد و یا ...) و شرایط نگهداری و انتقال نمونه‌ها، اهمیت زیادی در صحت و تحلیل نهایی داده‌ها دارند (Cheraghi et al., 2024). همچنین، نمونه‌ها باید از نظر اندازه، کیفیت ظاهری و سلامت، نماینده جامعه هدف باشند. ظروف نگهداری باید کاملاً تمیز، بی‌اثر، مقاوم و مناسب برای جلوگیری از تبخیر، آلودگی یا آسیب مکانیکی باشند (INSO-17033, 2013).

راهنمای نمونه‌برداری مواد غذایی برای کنترل رسمی فلزات سنگین (استاندارد ملی ایران، شماره ۱۷۰۳۳، برگرفته از EU 333:2007) مرجع مناسبی برای این منظور است (EN-333, 2007; INSO-17033, 2013). همچنین، استاندارد ملی ایران شماره به ۱۳۵۳۲، یعنی راهنمای نمونه‌برداری از غلات و سبزیجات برای آزمون نیترات‌ها، حاوی برخی اطلاعات کلی است که تاحدی برای فلزات سنگین نیز قابل تعمیم است (EN 1882, 2006; ISIRI 13532, 2010). جزئیات بیشتر در این خصوص در مقاله چراغی و همکاران (۱۴۰۲) ارائه شده است.

آماده‌سازی نمونه‌ها

آماده‌سازی باید مطابق الزامات استاندارد انجام شود. این مرحله بسته به نوع محصول خوراکی تفاوت دارد. در هنگام آماده‌سازی، باید از تجهیزات و دستگاه‌هایی استفاده شود که فلزات مورد اندازه‌گیری، در ساخت آنها استفاده نشده باشد (EN-333, 2007; INSO-17033, 2013). برای کاهش آلودگی، پیش از استفاده و پس از هر بار استفاده، تجهیزات با اسید تمیز شوند. تیغه‌های مورد استفاده در خردکن و آسیاب نیز ترجیحاً از جنس فولاد ضد زنگ باشند (European Commission, 2011). استاندارد EN 13804: 2002 اتحادیه اروپا، راهنمای مناسبی در این زمینه ارائه می‌دهد (EN-13804, 2002). در آماده‌سازی نمونه‌ها باید مواردی مانند: رفع آلودگی اولیه با شستشو با آب مقطر، خشک کردن (در صورت نیاز)، حذف بخش‌های آسیب‌دیده، پوسیده یا دارای علائم بیماری، همگن‌سازی برای اطمینان از تکرارپذیری، جلوگیری از تغییر رطوبت طبیعی نمونه و حذف فیزیکی آب اضافی بدون استفاده از دستمال یا مواد جاذب، رعایت گردد. جدول ۶ روش آماده‌سازی انواع محصولات کشاورزی را مطابق الزامات پایش عناصر سنگین نشان می‌دهد (EN 13084, 2013).

جدول ۶- برخی از الزامات مورد تأکید در آماده‌سازی نمونه محصولات کشاورزی برای برای سنجش غلظت عناصر سنگین

نوع محصول	۱ اندام مورد تجزیه	وضعیت پوست یا غلاف	وضعیت دانه یا هسته	نحوه تمیز کردن
خیار، گوجه‌فرنگی، فلفل	میوه کامل	تجزیه میوه با پوست	تجزیه با دانه	شستشو با آب مقطر
بادمجان و کدو	بخش خوراکی	پوست رویی جدا شود	تجزیه با دانه	شستشو با آب مقطر
هویج	میوه	تجزیه میوه با پوست	ندارد	شستشو با آب مقطر
سیب‌زمینی، پیاز	بخش خوراکی	پوست رویی جدا شود	ندارد	شستشو با آب مقطر
انواع فلفل	میوه	تجزیه میوه با پوست	تجزیه با دانه	شستشو با آب مقطر
هندوانه	بخش خوراکی	پوست رویی جدا شود	تجزیه با دانه	شستشو با آب مقطر
خربزه و طالبی	بخش خوراکی	پوست رویی جدا شود	دانه‌ها جدا شود	شستشو با آب مقطر
اسفناج و کاهو	بخش خوراکی	برگ‌های غیر خوراکی رویی جدا شود	ندارد	شستشو با آب مقطر
سایر سبزیجات برگ‌ری (شاهی، جعفری، تره، ریحان، ترخون، شویده، نعنای و غیره)	بخش خوراکی	ندارد	ندارد	شستشو با آب مقطر
سایر محصولات جالیزی میوه‌ای (شلغم، تربچه، چغندر و غیره)	بخش خوراکی	پوسته سخت غیر خوراکی جدا شود	ندارد	شستشو با آب مقطر
میوه‌های دانه ریز (مانند سیب و گلابی)	میوه (کامل)	تجزیه میوه با پوست	تجزیه با دانه	شستشو با آب مقطر
سایر میوه‌ها (موز، هلو، کیوی، انجیر و غیره)	کل میوه	پوست غیر خوراکی جدا شود	هسته سخت جدا شود	شستشو با آب مقطر

ادامه جدول ۶- برخی از الزامات مورد تأکید در آماده‌سازی نمونه محصولات کشاورزی برای سنجش غلظت عناصر سنگین

نوع محصول	^۱ اندام مورد تجزیه	وضعیت پوست یا غلاف	وضعیت دانه یا هسته	نحوه تمیز کردن
مرکبات	بخش خوراکی	پوست رویی جدا شود	دانه‌ها جدا شود	شستشو با آب مقطر
غلات	دانه	ندارد	ندارد	^۲ در صورت آلودگی، شستشو و خشک‌سازی کامل قبل از هضم
حبوبات، دانه‌های روغنی، مغزها	دانه	ندارد	ندارد	

۱. بخش‌های آسیب دیده، کپک زده، خراب شده، علائم کمبود یا بیماری و بخش‌های نرسیده حذف شوند.

۲. در صورت شستشو، قبل از همگن سازی و هضم باید کاملاً خشک شوند.

هضم و اندازه‌گیری فلزات سنگین در نمونه‌ها

روش‌های مختلفی برای هضم و اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در محصولات کشاورزی وجود دارد (جدول ۷). در مطالعات پایشی، به‌کارگیری روش‌های معتبر و مورد تأیید مراجع استاندارد ملی یا بین‌المللی اهمیت ویژه‌ای دارد، چراکه استفاده از این روش‌ها امکان تجمع داده‌ها و تحلیل روندهای زمانی را فراهم می‌سازد. با توجه به تنوع روش‌های هضم و پیچیدگی توضیحات مربوط به هر یک، در جدول ۷ تنها به معرفی کلی این روش‌ها و برخی الزامات اصلی آن‌ها پرداخته شده است. توضیحات جامع‌تری مانند مبانی نظری، دامنه کاربرد، شیوه اجرای آزمایش و سایر الزامات تخصصی، در استانداردهای مربوطه به‌طور کامل ارائه شده و قابل دست‌یابی هستند.

جدول ۷- روش‌های استاندارد هضم نمونه محصولات کشاورزی خوراکی برای سنجش غلظت عناصر سنگین

شماره استاندارد (منبع)	نوع روش هضم	دامنه کاربرد	الزامات دستگاهی/اندازه‌گیری	اسید/محلول‌های هضم
AOAC 999.11:1999 استاندارد ملی ایران ۹۲۶۶	هضم خشک	اندازه‌گیری سرب، کادمیم، مس، آهن و روی	طیف‌سنج جذب اتمی شعله و کوره گرافیتی	اسید هیدروکلریک ۶ مولار (۱:۱)، اسید نیتریک ۰/۱ مولار
BS EN 14546:2005 ایران ۱۶۷۲۲	هضم خشک	اندازه‌گیری آرسنیک کل در مواد غذایی با خاکسترسازی و تولید هیدرید	طیف‌سنج جذب اتمی تولید هیدرید	اسید نیتریک، کاتالیزور، هیدروکلریک اسید (۶ مولار)، پیش احیا کننده (پتاسیم یدید و آسکوربیک)
AOAC 999.10:1999	هضم تر با میکروویو	اندازه‌گیری روی، مس و آهن، کادمیم، سرب به‌ترتیب در غلظت‌های مشخص شده	طیف‌سنج جذب اتمی شعله و کوره گرافیتی	اسید نیتریک و آب اکسیژنه
BS EN 14083:2003a	هضم تر با میکروویو	اندازه‌گیری سرب، کادمیم، کروم و مولیبدن	طیف‌سنج جذب اتمی کوره گرافیتی	اسید نیتریک و آب اکسیژنه ^۱
BS EN 14084:2003b ملی ایران ۱۹۸۲۱	هضم تر با میکروویو	اندازه‌گیری سرب، کادمیم، روی، مس و آهن	طیف‌سنج جذب اتمی کوره گرافیتی و طیف سنج جذب اتمی شعله	نیتریک اسید و آب اکسیژنه
BS EN 13805: 2014	هضم تر با میکروویو	استخراج فلزات کمیاب (مانند کادمیم، سرب، آرسنیک، جیوه، کروم، نیکل و...)	^۲ جذب اتمی (شعله، کوره گرافیتی، هیدرید و بخار سرد) و ICP-MS	اسید نیتریک (گاهی همراه با اسیدهای دیگر)
BS EN 15763:2009 ایران ۱۹۷۳۲	^۳ هضم تر با میکروویو	^۴ اندازه‌گیری آرسنیک، کادمیم، جیوه و سرب	طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS)	اسید نیتریک (گاهی همراه با اسیدهای دیگر)
PD CEN/TS 16731:2014 استاندارد ملی ایران ۱۵۵۴۹	هضم تر	اندازه‌گیری آرسنیک معدنی قابل استخراج با اسید نیتریک در دانه برنج	طیف‌سنج جذب اتمی تولید هیدرید	اسید نیتریک رقیق (۰/۲۸ مولار)

۱. در برخی موارد بسته به نوع نمونه و شرایط آزمایش، از اسید کلریدریک و اسید فلوریدریک نیز استفاده می‌شود.

۲. سایر تکنیک‌های آنالیز مانند ICP-OES، ولتامتری یا فلورسانس اتمی نیز ممکن است در ترکیب با این استانداردها مورد استفاده قرار گیرند.

۳. استاندارد EN 13805 به عنوان روش مرجع هضم برای برخی از روش‌ها معرفی شده است.

۴. دامنه کاربرد استاندارد BS EN 15763:2009 به‌ترتیب شامل آرسنیک (۰/۰۶ - ۲۱/۵ میلی گرم در کیلوگرم)، کادمیم (۰/۰۳ - ۲۸/۳ میلی گرم در کیلوگرم)، جیوه (۰/۰۴ - ۰/۵۶ میلی گرم در کیلوگرم) و سرب (۰/۰۱ - ۲/۴ میلی گرم در کیلوگرم) در ماده خشک می‌باشد.

کنترل کیفیت نتایج

اطمینان از صحت و دقت داده‌های حاصل از تجزیه‌های آزمایشگاهی، به‌ویژه هنگام اندازه‌گیری عناصر یا آلاینده‌هایی که با سلامت انسان در ارتباط هستند، از اهمیت بالایی برخوردار است (Funk et al., 2007). هدف اصلی برنامه‌های کنترل و تضمین کیفیت، ارائه داده‌های معتبر، تکرار پذیر و قابل دفاع است. مؤلفه‌های اصلی برنامه‌های تضمین کیفیت در تجزیه‌های آزمایشگاهی عبارتند از: ۱) به‌کارگیری روش‌های استاندارد و اعتبارسنجی شده، ۲) استفاده از تجهیزات به‌درستی نگهداری و کالیبره شده، ۳) کالیبراسیون دقیق با بهره‌گیری از مواد مرجع معتبر، ۴) اجرای منظم کنترل کیفیت داخلی، ۵) مشارکت در آزمون‌های بین آزمایشگاهی، ۶) انجام میزبانی‌های مستقل و بازیابی روش‌ها، ۷) اعتباربخشی خارجی از طریق ارزیابی‌های انطباق و ۸) به‌کارگیری کارکنان آموزش دیده و متخصص (Mesley et al., 1991). کنترل کیفیت، مجموعه‌ای از فرایندها و روش‌هاست که با هدف افزایش دقت، کاهش سوگیری و تضمین اعتماد به نتایج به‌کار گرفته می‌شود. از جمله اقدامات متداول می‌توان به تجزیه‌های تکراری، استفاده از نمونه‌های غنی شده، مواد مرجع استاندارد یا گواهی شده (SRM) یا CRM و به‌کارگیری نمونه‌های کنترلی اشاره کرد (Klesta et al., 1996).

با توجه به پیامدهای حقوقی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مرتبط با غلظت فلزات سنگین در محصولات کشاورزی و نقش حیاتی این داده‌ها در سیاست‌گذاری و مدیریت ایمنی غذایی، لازم است کلیه اقدامات کنترل و تضمین کیفیت نتایج آنالیز، به‌صورت دقیق مستندسازی و در مواقع لازم ارائه شوند. این اقدامات شامل: ارزیابی صحت و دقت نتایج، بررسی خطی بودن پاسخ، تعیین حد تشخیص (LOD) و حد کمی‌سازی (LOQ)، تحلیل حساسیت^۳ و انتخاب‌گری^۴ ارزیابی استحکام^۵ روش و بازیابی^۶، بررسی تکرارپذیری^۷ و تکثیرپذیری^۸، استفاده از مواد مرجع استاندارد یا گواهی شده (SRM یا CRM) و تحلیل نمودارهای کنترل می‌باشند. در نهایت، ضروری است پژوهشگران، کارشناسان آزمایشگاه‌ها و مؤسسات پژوهشی در تهیه و انتشار داده‌های مربوط به غلظت فلزات سنگین، الزامات کنترل کیفیت را رعایت کرده و در گزارش‌های تحلیلی، مقالات علمی، پایان‌نامه‌ها و سایر مستندات، خلاصه‌ای از نتایج ارزیابی کیفیت را به‌طور شفاف درج کنند.

مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر به‌منظور بررسی انتقادی و جامع پژوهش‌ها و مطالعات انجام شده در زمینه پایش غلظت عناصر سنگین در محصولات کشاورزی تولیدی ایران انجام شد. از جمله اهداف مهم این مطالعه می‌توان به: جمع‌بندی وضعیت غلظت عناصر سنگین در محصولات کشاورزی تولیدی ایران، فراهم‌سازی بستری جامع جهت آشنایی محققان و کارشناسان با الزامات تجزیه صحیح عناصر سنگین در محصولات کشاورزی و نیز اعتبارسنجی مطالعات انجام شده در این حوزه اشاره کرد.

برای انجام این مطالعه، تمامی منابع علمی مرتبط با پایش عناصر سنگین در محصولات کشاورزی ایران شامل مقالات انگلیسی و فارسی، گزارش نهایی طرح‌های تحقیقاتی سازمان‌ها، موسسات تحقیقاتی و پایان‌نامه‌های مرتبط منتشر شده تا پایان سال ۱۴۰۳ جمع‌آوری و تحلیل شد. مقالات فارسی و پایان‌نامه‌ها با استفاده از کلیدواژه‌هایی مانند غلظت عناصر سنگین، نام محصولات کشاورزی (مانند غلات، حبوبات، سبزی، صیفی و میوه‌ها)، و نام عنصر سنگین (آرسنیک، سرب و کادمیم) در پایگاه‌های اطلاعاتی سیویلیکا، Google Scholar و ایرانداک جست‌وجو شدند. جست‌وجوی مقالات انگلیسی نیز با کلیدواژه‌هایی مانند concentration of heavy metals، cadmium، lead، arsenic، agricultural products و Iran در پایگاه‌های Google Scholar و ScienceDirect صورت گرفت.

در مجموع، تعداد ۲۴۷ مطالعه مرتبط با وضعیت غلظت عناصر سنگین در محصولات کشاورزی ایران جمع‌آوری شد. پس از بررسی اولیه، ۴۸ مطالعه که مروری و فاقد ارتباط مستقیم با پایش وضعیت عناصر سنگین در محصولات کشاورزی بودند، حذف گردید. در نهایت، ۱۹۹ مطالعه برای تحلیل نهایی انتخاب شد. از این مطالعات، کلیه اطلاعات مرتبط با نمونه‌برداری، آماده‌سازی، روش‌های هضم، اندازه‌گیری،

1. Limit of detection
2. Limit of quantification
3. Sensitivity or Sensibility
4. Selectivity
5. Robustness
6. Recovery
7. Repeatability
8. Reproducibility
9. Certified Reference Materials or Standard Reference Materials

کنترل کیفی، شیوه گزارش‌دهی داده‌ها و نتایج غلظت عناصر سنگین (حداقل، حداکثر، میانه و میانگین) استخراج گردید. معیار انتخاب مطالعات برای جمع‌بندی نهایی غلظت عناصر سنگین در محصولات، شامل صحت انجام هر یک از مراحل نمونه‌برداری، آماده‌سازی، هضم، دستگاه اندازه‌گیری و کنترل کیفی داده‌ها بود. بنابراین، تنها مطالعاتی که حداقل الزامات کیفی را دارا بودند، وارد مرحله تحلیل نهایی غلظت عناصر سنگین در محصولات کشاورزی شدند. بر اساس تحلیل کیفی انجام شده، از مجموع ۱۹۹ مطالعه منتخب، تعداد ۶۵ مطالعه (۳۲/۶۶ درصد از مطالعات) حداقل‌های لازم برای قرار گرفتن در تحلیل نهایی این مطالعه را برآورده نکردند. لذا، این مطالعات از تحلیل نهایی کنار گذاشته شدند و جمع‌بندی نهایی غلظت عناصر سنگین در محصولات کشاورزی کشور، بر اساس ۱۳۴ مطالعه که از حداقل‌های لازم برخوردار بودند، انجام شد.

لازم است اشاره شود که در ابتدا کلیدواژه‌های استفاده شده برای جستجوی مطالعات، تعداد زیادی از عناصر سنگین و محصولات را شامل شد، اما با توجه به تنوع زیاد عناصر سنگین گزارش شده، تعداد کم مطالعات، کیفیت پایین برخی از مطالعات و با در نظر گرفتن اینکه در استاندارد ملی ایران و نیز استاندارد جهانی کدکس و استاندارد اتحادیه اروپا تنها برای عناصر کادمیم، سرب و آرسنیک بیشینه غلظت مجاز در محصولات کشاورزی تعیین شده است، صرفاً اطلاعات مربوط به غلظت این سه عنصر استخراج گردید. همچنین، بسیاری از مطالعات غلظت عناصر سنگین در محصولات را بر مبنای وزن خشک گزارش کرده بودند. از آنجا که در استاندارد ملی ایران و نیز استانداردهای بین‌المللی، بیشینه حد مجاز این عناصر بر مبنای وزن تر تعیین شده است، در نتیجه، جهت هم‌ترازی و مقایسه با این استانداردها، غلظت عناصر در در این مطالعات با استفاده از میانگین رطوبت وزنی هر محصول که در جدول ۸ گزارش شده است، به مقادیر بر مبنای وزن تر تبدیل گردید.

جدول ۸- مقادیر رطوبت وزنی استفاده شده برای تبدیل غلظت عناصر سنگین از وزن خشک به وزن تر

محصول	رطوبت وزنی (درصد)	محصول	رطوبت وزنی (درصد)	محصول	رطوبت وزنی (درصد)
اسفناج	۹۱	خیار	۹۴/۹	فلفل	۹۲
پیاز	۹۱	ریحان	۸۲	سیب	۸۳/۷
ترپچه	۹۲/۵	کاهو	۹۵/۵	پرتقال	۸۹
تره	۹۵/۶	سیب‌زمینی	۸۰/۷	گشنیز	۸۴/۴
جعفری	۹۰	شاهی	۹۰	گوجه‌فرنگی	۹۴/۱
چغندر قند	۸۳/۴	شوید	۸۵/۲	نعناع	۸۱/۶

* اطلاعات این جدول از داده‌های منتشر نشده موسسه تحقیقات خاک و آب و نیز برخی مطالعات مورد بررسی، گردآوری شده است.

برای به‌دست آوردن میانگین نهایی غلظت عناصر سنگین در هر محصول و مقایسه آن با حدود مجاز استاندارد، از میانگین وزنی استفاده شد. میانگین وزنی غلظت عناصر سنگین در هر محصول بر اساس رابطه (۱) محاسبه شد.

$$\text{میانگین وزنی (mg/kg)} = \frac{\sum(C_i \times N_i)}{N_t} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن C_i : میانگین حسابی عنصر (mg/kg) در یک مطالعه، N_i : تعداد نمونه در همان مطالعه و N_t : تعداد کل نمونه‌های محصول تجزیه شده برای آن عنصر در همه مطالعات می‌باشد.

نتایج و بحث

بررسی کیفیت مطالعات

تجزیه و تحلیل کیفی مطالعات نشان داد که از مجموع ۱۹۹ مطالعه تحلیل شده، تنها در ۷۸/۹ درصد از مطالعات نحوه نمونه‌برداری توصیف شده بود و در ۲۱/۱ درصد از دیگر مطالعات وضعیت نمونه‌برداری گزارش نشده بود. از نظر نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها برای هضم، در ۷۰/۴ درصد از مطالعات وضعیت آماده‌سازی نمونه‌ها مناسب و مطابق با روش‌های استاندارد گزارش شده بود، در ۱۰ درصد مطالعات وضعیت نمونه‌برداری نامناسب و در ۱۹/۶ درصد مطالعات نیز نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها گزارش نشده بود. در مورد روش هضم نمونه‌ها، ۴۳/۷ درصد مطالعات از روش هضم تر (با سیستم باز)، ۸/۵ درصد مطالعات از روش هضم تر با ماکروویو و ۳۷/۲ درصد مطالعات از روش هضم خشک استفاده کرده بودند. در ۱۰/۶ درصد از موارد نیز روش هضم نمونه‌ها مشخص نشده بود. این مطالعات انواع مختلفی از اسیدها را برای هضم



نمونه‌ها استفاده کرده بودند، با این وجود، در ۱۰/۶ درصد از نمونه‌ها نوع اسید مورد استفاده برای هضم نمونه‌ها گزارش نشده بود (جدول ۹). همانطور که اشاره شد، برای انجام یک مطالعه معتبر و قابل استناد در زمینه پایش وضعیت فلزات سنگین در محصولات غذایی، انجام دقیق هر کدام از مراحل نمونه‌برداری، مدیریت نمونه‌ها، آماده‌سازی، هضم و مستندسازی صحیح مراحل در گزارش نتایج علمی ضروری است؛ موضوعی که در تعداد قابل توجهی از مطالعات انجام شده در ایران نادیده گرفته شده است (EN-333, 2007; EN-13804, 2002; INSO-17033, 2013).

جدول ۹- وضعیت ترکیب اسیدهای مورد استفاده برای هضم نمونه‌ها

سایر	$\text{HNO}_3 + \text{HCl} + \text{HClO}_4$	$\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$	نامشخص	$\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$	$\text{HNO}_3 + \text{HCl}$	HCl	HNO_3
۲/۵	۵/۰	۸/۰	۱۰/۶	۱۱/۱	۱۲/۱	۱۵/۶	۳۵/۲

* اعداد گزارش شده در جدول، درصد مطالعات از ۱۹۹ مطالعه مورد بررسی را نشان می‌دهد.

نتایج همچنین نشان داد که دستگاه‌های متنوعی شامل؛ FAAS (۴۱/۲ درصد)، ICP-OES (۲۱/۶ درصد)، GFAAS (۱۸/۱ درصد)، ICP-MS (۵/۵ درصد)، GFAAS و HGAAS (۵/۰ درصد) و سایر دستگاه‌ها (۵/۰ درصد) برای اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین در نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، با این وجود، در ۳/۵ درصد از مطالعات نوع دستگاه مورد استفاده گزارش نشده بود. با توجه به اینکه غلظت عناصر سنگین در محصولات کشاورزی خوراکی بسیار پایین است و حد تشخیص و حد کمی‌سازی برخی از این دستگاه‌ها مانند FAAS و ICP-OES بالا است، بنابراین، نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین با استفاده از این دستگاه‌ها همواره با عدم قطعیت بالایی همراه است (روش‌های استاندارد، جدول ۷).

بررسی مطالعات همچنین نشان داد که تنها در ۲۴/۱ درصد از مطالعات نتایج کنترل کیفی گزارش شده بود و در ۷۵/۹ درصد از مطالعات هیچ اشاره‌ای به کنترل کیفی داده‌ها نشده بود. از مجموع ۱۹۹ مطالعات مورد بررسی، در ۳۱ مطالعه (۱۵/۷۵ درصد از مطالعات)، تعداد تکرار تجزیه و یا انحراف معیار اندازه‌گیری گزارش شده بود. در ۱۲ مطالعه (۵/۸۲ درصد) از CRM یا SRM برای ارزیابی درصد بازیابی استفاده شده بود و در ۱۳ مطالعه (۶/۴۲ درصد) نیز حد تشخیص و یا حد کمی‌سازی گزارش شده بود. همچنین برای گزارش غلظت عناصر سنگین در بافت نمونه، ۱۶/۶ درصد از مطالعات وزن تر را مبنای گزارش نتایج قرار داده بودند، درحالی‌که در ۵۹/۳ درصد از مطالعات غلظت عناصر در وزن خشک محصول گزارش شده بود و در ۲۴/۱ درصد از مطالعات نیز مبنای گزارش نتایج غلظت مشخص نشده بود.

وضعیت غلظت عناصر سنگین در محصولات کشاورزی تولیدی ایران

در این بخش تلاش گردید تا با جمع بندی مطالعاتی که حداقل الزامات یک مطالعه قابل قبول را رعایت کرده بودند وضعیت غلظت عناصر سنگین (کادمیم، سرب و آرسنیک) در برخی از محصولات کشاورزی مهم تولیدی کشور مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرد. مطالعات انتخاب شده، وضعیت غلظت عناصر سنگین در محصولات کشاورزی تولیدی در ۳۱ استان کشور را شامل شد (جدول ۱۰). گستره پراکندگی جغرافیایی نمونه‌های تجزیه شده، اطمینان از نماینده بودن نتایج برای تعمیم آنها به کل کشور را افزایش داد. علاوه بر این، مطالعه حاضر وضعیت غلظت عناصر سنگین در بیش از ۲۰ نوع محصول خوراکی کشاورزی که بخش عمده‌ای از سبد غذایی جامعه ایرانی را تشکیل می‌دهند، را پوشش داد (جدول ۱۱).

جدول ۱۰- تعداد مطالعه بررسی شده به تفکیک استان

استان	تعداد مطالعه	استان	تعداد مطالعه	استان	تعداد مطالعه
اردبیل	۴	خراسان شمالی	۴	کهگلویه و بویراحمد	۳
اصفهان	۲۶	خوزستان	۲۲	گلستان	۱۵
البرز	۸	زنجان	۱۱	گیلان	۱۱
ایلام	۴	سمنان	۸	لرستان	۹
آذربایجان شرقی	۱۱	سیستان و بلوچستان	۵	مازندران	۱۸
آذربایجان غربی	۹	فارس	۱۱	مرکزی	۱۱

ادامه جدول ۱۰- تعداد مطالعه بررسی شده به تفکیک استان

استان	تعداد مطالعه	استان	تعداد مطالعه	استان	تعداد مطالعه
بوشهر	۶	قزوین	۴	هرمزگان	۹
تهران	۳۵	قم	۶	همدان	۲۶
چهارمحال و بختیاری	۵	کردستان	۱۱	یزد	۷
خراسان جنوبی	۳	کرمان	۷		
خراسان رضوی	۱۰	کرمانشاه	۱۶		

* در بسیاری از مطالعات بیش از یک استان بررسی شده است.

جدول ۱۱- تعداد مطالعه جمع آوری و بررسی شده به تفکیک نوع محصول و تعداد نمونه تجزیه شده

محصول	تعداد مطالعه جمع آوری شده	تعداد نمونه تجزیه شده ^۱	تعداد مطالعه انتخاب شده	تعداد نمونه انتخاب شده
اسفناج	۲۵	۳۶۷	۶	۹۲
برنج	۶۶	۳۷۱۳	۲۷	۱۶۴۳
پیاز	۲۵	۴۸۶	۵	۹۸
ترپچه	۳۲	۳۹۸	۱۲	۱۸۱
تره	۲۷	۴۰۵	۸	۱۵۷
جعفری	۲۴	۳۳۲	۶	۶۹
جو	۱۴	۳۱۵	۱۰	۲۹۱
چغندر قند	۸	۱۰۴	۲	۱۳
خیار	۲۳	۵۹۱	۹	۳۱۵
ذرت	۱۵	۱۰۵	۸	۵۲
ریحان	۲۴	۳۴۱	۹	۱۳۱
سیب	۷	۱۴۲	۱	۴۰
سیب زمینی	۲۱	۶۲۴	۶	۲۱۵
شاهی	۱۹	۲۵۰	۶	۷۲
شوید	۱۷	۲۳۶	۴	۶۲
فلفل	۱۱	۲۵۳	۴	۲۳
کاهو	۲۹	۶۳۶	۹	۳۳۸
گشنیز	۱۸	۱۷۷	۵	۵۲
گندم	۳۵	۳۵۶۶	۱۲	۲۱۵۶
گوجه فرنگی	۲۵	۵۵۹	۹	۲۲۴
لوبیا	۱۱	۵۵	۵	۱۵
نخود	۸	۱۹۷	۶	۱۷۸
نعناع	۱۹	۲۴۸	۷	۱۰۶
کلم	۱۲	۱۹۴	۰	۰
هویج	۸	۱۴۶	۰	۰

* در بسیاری از مطالعات بیش از یک محصول بررسی شده است.

غللات (برنج، گندم، جو و ذرت)

آماره‌های توصیفی شامل کمینه، بیشینه، میانه و میانگین وزنی غلظت عناصر سنگین در غلات تولیدی ایران در جدول ۱۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، میانگین وزنی غلظت کادمیم، سرب و آرسنیک در برنج تولیدی کشور به ترتیب ۰/۰۳۷۶، ۰/۰۷۲۶ و ۰/۰۸۳۱ میلی گرم در کیلوگرم بود که از بیشینه غلظت مجاز تعیین شده در استاندارد ملی ایران کمتر بود (جدول ۱۲). به طور مشابه، میانگین غلظت کادمیم و سرب در گندم تولیدی کشور به ترتیب ۰/۰۱۱۱ و ۰/۰۳۵۰ میلی گرم در کیلوگرم و در جو به ترتیب ۰/۰۰۹۷ و ۰/۰۱۲۴ میلی گرم در کیلوگرم بود که همگی پایین تر از بیشینه غلظت مجاز تعیین شده در استاندارد ملی ایران و سایر استانداردهای بین المللی بود (جدول ۱۲).

نتایج همچنین نشان داد که میانگین غلظت کادمیم و سرب در دانه ذرت تولیدی ایران به ترتیب ۰/۰۱۲۹ (دامنه ۰/۰۰۱-۰/۰۴۸) و ۰/۰۵۴۳ (ND-۰/۱۵) میلی گرم در کیلوگرم بود. بر این اساس میانگین غلظت این عناصر در ذرت نیز از بیشینه حدود مجاز استاندارد ملی



ایران کمتر بود. Edirisinghe و Jinadasa (۲۰۱۹) با تجزیه ۴۵ نمونه ذرت از کشور سری لانکا، کمینه، بیشینه، میانه و میانگین غلظت کادمیم در دانه ذرت را به ترتیب $<LOQ$ ، ۰/۱۲۲۲، ۰/۰۰۴۸ و ۰/۰۱۰۴ میلی گرم در کیلوگرم گزارش کردند که با مقادیر آن در مطالعه حاضر مطابقت داشت. در مطالعه‌ای دیگر میانگین غلظت کادمیم و سرب در دانه ذرت به ترتیب ۰/۰۰۳۷ (دامنه ۰/۰۰۲ – ۰/۰۰۶) و ۰/۰۹۶۸ (دامنه ۰/۰۰۷ – ۰/۰۱۶) میلی گرم در کیلوگرم گزارش شد، که در آن میانگین غلظت کادمیم کمتر و سرب بیشتر از مقادیر مطالعه حاضر بود (Zhang et al., 1998).

جدول ۱۲- آماره‌های توصیفی غلظت کادمیم، سرب و آرسنیک در غلات تولیدی ایران

محصول	عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی میلی گرم در کیلوگرم	حداقل	حداکثر	حد مجاز استاندارد
برنج	Cd	۱۳۳۲	۰/۰۳۷۶	ND	۰/۲۹۰۰	۰/۰۶
	Pb	۱۵۲۷	۰/۰۷۲۶	ND	۰/۵۷۴۰	۰/۱۵
	As	۱۰۸۹	۰/۰۸۳۱	ND	۰/۸۷۲۰	۰/۱۵
گندم	Cd	۱۹۲۷	۰/۰۱۱۱	ND	۰/۱۶۲۰	۰/۰۶
	Pb	۱۸۹۹	۰/۰۳۵۰	ND	۰/۷۲۰۰	۰/۲
جو	Cd	۹۲	۰/۰۰۹۷	ND	۰/۱۷۰	۰/۱
	Pb	۶۹	۰/۰۱۲۴	ND	۰/۱۲۶	۰/۱۵
ذرت	Cd	۵۰	۰/۰۱۲۹	۰/۰۰۱۰	۱/۰۴۸۰	۰/۱
	Pb	۲۸	۰/۰۵۴۳	ND	۰/۱۵۰۰	۰/۱۵

ND: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص یا $<LOQ$).

برنج

غلظت کادمیم در برنج تولیدی ایران با مقادیر گزارش شده برای برنج تولیدی دیگر کشورها در جدول ۱۳ مقایسه شده است. طبق نتایج، میانگین، کمینه و بیشینه غلظت کادمیم در برنج تولیدی ایران به ترتیب ۰/۰۳۷۶، $<LOQ$ و ۰/۲۹ میلی گرم در کیلوگرم بود. مطابق بررسی منابع انجام شده، میانگین غلظت کادمیم برنج در مطالعه حاضر با برنج تولیدی تایوان مطابقت داشت، از مقادیر گزارش شده برای برنج‌های تولیدی در استرالیا، ایتالیا و چین کمتر بود. در مطالعه‌ای جهانی، Shi et al. (۲۰۲۰)، با تجزیه ۲۲۷۰ نمونه برنج سفید از ۳۲ کشور، دامنه غلظت کادمیم را ۰/۰۴۹ – ۳/۷۱ با میانه ۰/۰۱۹ میلی گرم در کیلوگرم گزارش کردند و آن را به عنوان محدوده جهانی غلظت کادمیم در دانه برنج سفید معرفی کردند. بر این اساس، غلظت کادمیم در دانه برنج‌های ایرانی در محدوده جهانی قرار می‌گیرد.

نتایج همچنین نشان داد که میانگین غلظت سرب در برنج تولیدی ایران ۰/۰۷۲۶ (دامنه ND – ۰/۵۷۴۰) میلی گرم در کیلوگرم بود که از مقدار آن در برنج تولیدی چین کمتر و بیشتر از مقدار آن در سایر کشورهای گزارش شده در جدول ۱۳ بود. میانگین غلظت سرب در برنج کشورهای بنگلادش، فرانسه، چین، ژاپن، تایلند و آمریکا به ترتیب ۰/۰۳۲، ۰/۰۱۱، ۰/۰۱۱، ۰/۰۰۴، ۰/۰۱ و ۰/۰۱۱ میلی گرم در کیلوگرم گزارش شده است، بر این اساس غلظت سرب در دانه برنج تولیدی در چین و ژاپن به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار را داشت (جدول ۱۳). در مطالعه‌ای دیگر، Norton et al. (۲۰۱۴) وضعیت سرب در ۷۸۲ نمونه برنج سفید از کشورهای ژاپن، ویتنام، ایتالیا، تایلند، آمریکا، پاکستان، فرانسه، اسپانیا، سریلانکا، هند، غنا، نپال و چین را مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند که میانگین غلظت سرب در دانه برنج تولیدی در این کشورها دامنه وسیعی بین ۰/۰۰۷ تا ۰/۶۷۶ میلی گرم در کیلوگرم داشت، که نشان دهنده تفاوت قابل توجه منطقه‌ای است.

به طور مشابه، میانگین غلظت آرسنیک در برنج تولیدی ایران ۰/۰۸۳۱ (دامنه ND – ۰/۵۷۴۰) میلی گرم در کیلوگرم بود که با مقدار گزارش شده برای برنج‌های تولیدی ژاپن و مصر مطابقت داشت و از مقادیر گزارش شده در برنج‌های تولیدی هند، بنگلادش، فرانسه، آمریکا و سایر کشورهای گزارش شده در جدول ۱۳ کمتر بود. شهبازی و همکاران (۱۴۰۲)، نیز با بررسی ۲۸۵ نمونه برنج تولیدی در استان‌های مناطق عمده کشت کشور، میانگین غلظت آرسنیک دانه برنج را ۰/۱۱ میلی گرم در کیلوگرم گزارش کردند. در مطالعه‌ای جامع توسط Zavala و Duxbury (۲۰۰۸)، وضعیت غلظت آرسنیک در برنج‌های تولیدی آسیا (شامل بنگلادش، چین، هند، پاکستان، سریلانکا، و تایلند)، اروپا (ایتالیا و اسپانیا) و آمریکا، بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ بررسی شد. نتایج نشان داد که در ۵۰ درصد از نمونه‌ها، غلظت آرسنیک در دامنه ۰/۰۸۲ تا ۰/۲۰۲ میلی گرم در کیلوگرم قرار داشت که به عنوان محدوده نرمال جهانی غلظت آرسنیک در دانه برنج پیشنهاد شد. در این مطالعه، غلظت آرسنیک در اکثر برنج‌های آسیایی کمتر از ۰/۰۹۸ میلی گرم در کیلوگرم و در ۴۰ درصد از نمونه‌های آمریکایی

و ۲۰ درصد از نمونه‌های اروپایی بالاتر از این دامنه نرمال بود. همچنین، میانگین غلظت آرسنیک در برنج‌های ایالات متحده و اروپا (۱۹۸/۰ میلی گرم در کیلوگرم) به‌طور معناداری بالاتر از کشورهای آسیایی (۰/۰۷ میلی گرم در کیلوگرم) بود. (Zavala and Duxbury 2008).

جدول ۱۳- مقایسه غلظت کادمیم، سرب و آرسنیک در برنج تولیدی ایران با دیگر کشورها

کشور یا منطقه	عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی	کمینه	بیشینه	منبع
ایران	Cd	۱۳۳۲	۰/۰۳۷۶	ND	۰/۲۹۰۰	مطالعه حاضر
ایران	Cd	۲۸۵	۰/۰۲۳	۰/۰۰۱۷	۰/۰۲۹	(Shahbazi et al., 2023)
تایوان	Cd	۱۵۸۱	۰/۰۴	ND	۰/۳۹	(Lien et al., 2021)
استرالیا	Cd	۲۱	۰/۰۷۵	۰/۰۰۸۷	۰/۰۱۷۱	(Rahman et al., 2014)
چین	Cd	۲۶۹	۰/۰۸	۰/۰۱۰	۰/۳۰۰	(Fangmin et al., 2006)
ایتالیا	Cd	۴۱	۰/۰۶۲	۰/۰۰۵	۰/۱۹	(Meharg et al., 2013; Pastorelli et al., 2018)
ایران	Pb	۱۵۲۷	۰/۰۷۲۶	ND	۰/۵۷۴۰	مطالعه حاضر
ایران	Pb	۲۸۵	۰/۰۴۹	۰/۰۰۳	۰/۲۰۵	(Shahbazi et al., 2023)
بنگلادش	Pb	۴۰۰	۰/۰۳۲	۰/۰۰۴	۰/۷۵۶	(Norton et al., 2014)
فرانسه	Pb	۲۴	۰/۰۱۱	۰/۰۰۳	۰/۰۳۳	(Norton et al., 2014)
چین	Pb	۲۶۹	۰/۱۱	ND	۱/۲	(Fangmin et al., 2006)
ژاپن	Pb	۲۰	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳	۰/۰۱۲	(Norton et al., 2014)
تایلند	Pb	۶۲	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۷۳	(Norton et al., 2014)
آمریکا	Pb	۱۶۲	۰/۰۱۱	۰/۰۰۲	۰/۰۶۹	(Norton et al., 2014)
ایران	As	۱۰۸۹	۰/۰۸۳۱	ND	۰/۸۷۲۰	مطالعه حاضر
ایران	As	۲۸۵	۰/۱۱	۰/۰۰۴	۰/۲۴	(Shahbazi et al., 2023)
هند	As	۳۹	۰/۳۹۷	۰/۰۶	۰/۷۸	(Bhattacharya et al., 2010)
چین	As	۴۴۶	۰/۱۵	۰/۰۳۳	۰/۴۳۷	(Li et al., 2015; Lu et al., 2010)
آمریکا	As	۶۰	۰/۲۱	–	–	(Heitkemper et al., 2009)
اروگوئه	As	۱۵۰	۰/۱۷۸	۰/۰۱۵	۰/۶۲۹	(Roel et al., 2022)
ژاپن	As	۲۰	۰/۰۸۵	۰/۰۴۸	۰/۱۵	(Tsukada et al., 2007)
مصر	As	۱۱۰	۰/۰۵	–	–	(Meharg et al., 2007)
تایلند	As	۴۸	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۳۹	(Meharg et al., 2007)
ایتالیا	As	۶۶	۰/۱۵۴	۰/۰۷	۰/۳۳	(Meharg et al., 2009)
فرانسه	As	۳۳	۰/۲۸	۰/۰۹	۰/۵۶	(Meharg et al., 2009)

ND: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص یا LOQ).

گندم و جو

آماره‌های توصیفی غلظت عناصر سنگین در گندم تولیدی ایران و مقایسه آن با سایر کشورها در جدول ۱۴ ارائه شده است. بررسی منابع نشان داد که غلظت عناصر کادمیم و سرب در دانه گندم در کشورهای مختلف دامنه نسبتاً گسترده‌ای داشت. میانگین گزارش شده برای غلظت کادمیم دانه گندم از ۰/۰۰۸ میلی گرم در کیلوگرم در ایران تا ۰/۰۸۲۴ میلی گرم در کیلوگرم در آمریکا متغیر بود. در مطالعه حاضر، میانگین غلظت کادمیم گندم ۰/۰۱۱ میلی گرم در کیلوگرم به‌دست آمد که از مقدار آن در گندم‌های تولیدی در استرالیا بیشتر، ولی از مقدار آن در سایر کشورهای فهرست شده در جدول ۱۴ کمتر بود. به‌طور مشابه، میانگین غلظت سرب در گندم‌های تولیدی در سراسر دنیا در دامنه ۰/۰۱۱ میلی‌گرم در کیلوگرم (در ایران، قزاقستان و ترکیه) تا ۰/۱۰۴۵ میلی گرم در کیلوگرم (در روسیه) متغیر بود. در مطالعه حاضر، میانگین غلظت سرب در گندم ایران ۰/۰۳۵۰ میلی گرم در کیلوگرم بود که از مقدار آن در گندم‌های چین و روسیه کمتر، و از سایر کشورهای گزارش شده در جدول ۱۴ بیشتر بود. در محصول جو نیز کمینه، بیشینه و میانگین غلظت کادمیم و سرب به‌ترتیب ۰/۰۰۹۷ (دامنه ND-۰/۱۷۰) و ۰/۰۱۲۴ (دامنه ND-۰/۱۲۶) میلی گرم در کیلوگرم بود (جدول ۱۲). et al. Adams (۲۰۰۱) در مطالعه‌ای با تجزیه ۲۳۳ نمونه جو در بریتانیا، میانگین غلظت کادمیم و سرب آن را به‌ترتیب ۰/۰۲۲ (دامنه ۰/۰۰۹ تا ۰/۰۴۲) و ۰/۰۳۹ (دامنه ۰/۰۲۴ تا ۰/۰۵۰) میلی گرم در کیلوگرم گزارش کردند که از مقادیر متناظر در مطالعه حاضر بیشتر بود.

جدول ۱۴- مقایسه غلظت کادمیم و سرب در گندم تولیدی ایران با دیگر کشورها

کشور یا منطقه	عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی	کمینه	بیشینه	منبع
ایران	Cd	۱۹۲۷	۰/۰۱۱۱	ND	۰/۱۶۲۰	مطالعه حاضر
ایران	Cd	۱۸۴۴	۰/۰۰۸۰	ND	۰/۱۶۲	(Shahbazi et al., 2020)
چین	Cd	۱۲۲۳	۰/۰۶۵۰	۰/۰۰۴	۰/۹۸۰	(Zang et al., 2025)
بریتانیا	Cd	۲۵۰	۰/۰۶۳۰	۰/۰۳۴	۰/۰۹۲	(Adams et al., 2001)
لهستان	Cd	۳۰۰	۰/۰۳۳۰	۰/۰۰۶	۰/۰۹۸	(Jędrzejczak and Ręczajska, 2022)
آمریکا	Cd	۲۶۹	۰/۰۴۵۰	ND	۰/۲۸	(Strawn et al., 2022)
استرالیا	Cd	۴	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۷	۰/۰۰۹	(Pompa et al., 2021)
کانادا	Cd	۵۱	۰/۰۵۲۰	۰/۰۰۲	۰/۱۴۷	(Pompa et al., 2021)
قزاقستان	Cd	۱۵۱	۰/۰۲۶۳	۰/۰۰۲	۰/۰۶۷	(Pompa et al., 2021)
ترکیه	Cd	۱۰۵	۰/۰۲۱۸	۰/۰۰۲	۰/۰۶۳	(Pompa et al., 2021)
روسیه	Cd	۱۰	۰/۰۱۵۳	۰/۰۰۹	۰/۰۱۸	(Pompa et al., 2021)
آمریکا	Cd	۲۵	۰/۰۸۲۴	۰/۰۰۳	۰/۱۴۱	(Pompa et al., 2021)
ایران	Pb	۱۸۹۹	۰/۰۳۵۰	ND	۰/۷۲۰۰	مطالعه حاضر
ایران	Pb	۱۸۴۴	۰/۰۱۱	ND	۰/۷۲۰	(Shahbazi et al., 2020)
چین	Pb	۱۲۲۳	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۱	۱/۸۷۹	(Zang et al., 2025)
بریتانیا	Pb	۲۵۰	۰/۰۲۵	۰/۰۰۷	۰/۰۴۳	(Adams et al., 2001)
لهستان	Pb	۳۰۰	۰/۰۲۱	ND	۰/۰۹۸	(Jędrzejczak and Ręczajska, 2022)
استرالیا	Pb	۴	۰/۰۱۲۵	۰/۰۰۶	۰/۰۳۲	(Pompa et al., 2021)
کانادا	Pb	۵۱	۰/۰۱۸۱	۰/۰۰۶	۰/۱۳۰	(Pompa et al., 2021)
قزاقستان	Pb	۱۵۱	۰/۰۱۱۸	۰/۰۰۶	۰/۰۹۹	(Pompa et al., 2021)
ترکیه	Pb	۱۰۵	۰/۰۱۱۶	۰/۰۰۶	۰/۰۷۳	(Pompa et al., 2021)
روسیه	Pb	۱۰	۰/۱۰۴۵	۰/۰۰۶	۰/۲۴۹	(Pompa et al., 2021)
آمریکا	Pb	۲۵	۰/۰۲۲۹	۰/۰۰۶	۰/۱۲۳	(Pompa et al., 2021)

ND: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص یا <LOQ).

حبوبات (لوبیا و نخود)

میانگین غلظت کادمیم و سرب در لوبیای تولیدی کشور به ترتیب ۰/۰۲۵۶ و ۰/۰۱۵۰ میلی گرم در کیلوگرم بود. غلظت کادمیم در نخود قابل تشخیص نبود، در حالیکه غلظت سرب و آرسنیک آن به ترتیب ۰/۰۳۲۰ و ۰/۰۱۰۱ میلی گرم در کیلوگرم بود (جدول ۱۵). بیشینه حد مجاز غلظت کادمیم در استاندارد ملی ایران و استاندارد کدکس ۱ و در استاندارد اتحادیه اروپا ۰/۰۴ میلی گرم در کیلوگرم تعیین شده است. برای سرب، در استاندارد ملی ایران حد مجاز خاصی برای حبوبات تعیین نشده است، اما در استاندارد کدکس و اتحادیه اروپا این مقدار برابر با ۰/۲ میلی گرم بر کیلوگرم است. بر این اساس، غلظت کادمیم و سرب در نخود و لوبیای تولیدی کشور از بیشینه حدود مجاز استاندارد کمتر بود (جدول ۱۵). در هیچ کدام از استانداردهای ملی و بین‌المللی بیشینه حد مجاز آرسنیک در حبوبات تعیین نشده است.

بررسی منابع نشان داد که میانگین غلظت کادمیم در لوبیای تولیدی بریتانیا و ایتالیا به ترتیب ۰/۰۰۱۸ و ۰/۰۰۰۶ میلی گرم بر کیلوگرم بود که از مقدار متناظر آن در ایران کمتر بود. میانگین غلظت سرب نیز در لوبیای تولیدی این کشورها به ترتیب ۰/۰۰۴ و ۰/۰۳۴ میلی گرم در کیلوگرم گزارش شد که در بریتانیا کمتر و در ایتالیا بیشتر از مقدار ثبت شده در ایران بود (Esposito et al., 2015; Norton et al., 2015). به طور مشابه، میانگین غلظت سرب در لوبیا قرمز تولیدی چین ۰/۴۵ (دامنه ۰/۱۳-۰/۷۱) میلی گرم در کیلوگرم گزارش شده است (Zhou et al., 2000). Yu et al. (۲۰۲۳)، نیز با تجزیه ۶۹۲ نمونه لوبیا، میانگین غلظت کادمیم و سرب در دانه لوبیا تولیدی چین را به ترتیب ۰/۰۳۷۹ (دامنه ۰/۰۰۵-۰/۹۸) و ۰/۰۲۴۶ (دامنه ۰/۰۴۵-۰/۳۵۳) میلی گرم در کیلوگرم گزارش کردند که از مقادیر متناظر در لوبیای تولیدی ایران بیشتر بود. در مطالعه‌ای دیگر در سریلانکا، میانگین غلظت آرسنیک و کادمیم در دانه نخود به ترتیب ۰/۰۶۰۲ (دامنه <LOQ-۰/۵۰۲۵) و ۰/۰۰۷۹ (دامنه <LOQ-۰/۰۳۴۶) میلی گرم در کیلوگرم گزارش شد (Edirisinghe and Jinadasa, 2019).

جدول ۱۵- آماره‌های توصیفی غلظت کادمیم، سرب و آرسنیک در حبوبات تولیدی ایران

محصول	عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی	حداقل	حداکثر	حد مجاز استاندارد
میلی گرم در کیلوگرم						
لوبیا	Cd	۹	۰/۰۲۵۶	ND	۰/۱۳۵۰	۰/۱
	Pb	۹	۰/۰۱۵۰	ND	۰/۰۲۷۰	۰/۱ (کدکس); ۰/۲ (اتحادیه اروپا)
نخود	Cd	۹	ND	ND	ND	۰/۱
	Pb	۹	۰/۰۳۲۰	ND	۰/۰۸۳۰	۰/۱ (کدکس); ۰/۲ (اتحادیه اروپا)
	As	۱۶۹	۰/۰۱۰۱	ND	۰/۰۱۳۰	تعیین نشده

ND: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص یا <LOQ).

سبزیجات میوه‌ای و غده‌ای (سیب‌زمینی، پیاز، خیار، گوجه‌فرنگی، فلفل، تربچه و چغندر قند)

بر اساس نتایج، میانگین وزنی غلظت کادمیم و سرب در سیب‌زمینی تولیدی ایران به ترتیب ۰/۰۰۷۵ (دامنه ND-۰/۰۵۶۶) و ۰/۰۲۸۱ (۰/۰۲۵-۰/۱۴۷۳) میلی گرم در کیلوگرم و در پیاز به ترتیب ۰/۰۰۴۶ (دامنه ۰/۰۰۰۳-۰/۰۱۶۰) و ۰/۰۲۱۱ (۰/۰۰۰۵-۰/۰۶۷۵) میلی گرم در کیلوگرم بود. در استاندارد ملی ایران بیشینه غلظت مجاز کادمیم و سرب در سیب‌زمینی ۰/۱ و در سایر سبزیجات غده‌ای، ریشه‌ای و پیازی به ترتیب ۰/۱ و ۰/۲ میلی گرم در کیلوگرم وزن تر تعیین شده است. بر این اساس میانگین غلظت کادمیم و سرب در سیب‌زمینی و پیاز تولیدی ایران از بیشینه حد مجاز استاندارد ملی کمتر بود (جدول ۱۶). در تربچه؛ میانگین وزنی غلظت کادمیم و سرب به ترتیب ۰/۰۴۶۷ و ۰/۰۹۰۹ میلی گرم در کیلوگرم بود. در چغندر قند نیز میانگین وزنی غلظت کادمیم و سرب به ترتیب ۰/۰۱۱۶ و ۰/۰۹۲۷ میلی گرم در کیلوگرم بود. در استاندارد ملی ایران برای بیشینه غلظت عناصر سنگین در تربچه و چغندر قند حدود مجاز مستقل تعیین نشده است و این محصولات تحت عنوان سبزیجات غده‌ای، ریشه‌ای و پیازی دسته‌بندی شده‌اند. بنابراین، میانگین وزنی غلظت کادمیم و سرب در این محصولات نیز کمتر از بیشینه حدود مجاز استاندارد ملی بود (جدول ۱۶).

به‌طور مشابه، میانگین غلظت کادمیم و سرب در خیار تولیدی ایران به ترتیب ۰/۰۰۴۵ و ۰/۰۰۷۵ میلی گرم در کیلوگرم و در گوجه‌فرنگی به ترتیب ۰/۰۰۳۸ و ۰/۰۱۳۳ میلی گرم در کیلوگرم بود. نتایج نشان داد که میانگین غلظت کادمیم و سرب در خیار و گوجه‌فرنگی تولیدی ایران از حد مجاز تعیین شده در استاندارد ملی ایران و استاندارد کدکس (۰/۰۵ میلی گرم در کیلوگرم برای سرب و کادمیم) و همچنین استاندارد اتحادیه اروپا (۰/۰۲ و ۰/۰۵ میلی گرم در کیلوگرم به ترتیب برای کادمیم و سرب) کمتر بود. میانگین غلظت کادمیم و سرب در فلفل تولیدی کشور نیز به ترتیب ۰/۰۰۲۸ (دامنه ND-۰/۰۰۷۶) و ۰/۰۰۶۴ (دامنه ND-۰/۰۱۴۵) میلی گرم در کیلوگرم بود. بنابراین، مقدار کادمیم و سرب در فلفل نیز پایین‌تر از حدود مجاز استاندارد بود.

جدول ۱۶- آماره‌های توصیفی غلظت کادمیم، سرب در سبزیجات میوه‌ای و غده‌ای تولیدی ایران

محصول	عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی	حداقل	حداکثر	حد مجاز استاندارد
میلی گرم در کیلوگرم						
سیب زمینی	Cd	۱۸۷	۰/۰۰۷۵	ND	۰/۰۵۶۶	۰/۱
	Pb	۸۷	۰/۰۲۸۱	۰/۰۰۲۵	۰/۱۴۷۳	۰/۱
پیاز	Cd	۹۸	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۶۰	۰/۱
	Pb	۶۲	۰/۰۲۱۱	۰/۰۰۰۵	۰/۰۶۷۵	۰/۲
خیار	Cd	۳۱۵	۰/۰۰۴۵	ND	۰/۰۴۳۲	۰/۰۵
	Pb	۳۱۵	۰/۰۰۷۵	ND	۰/۱۱۸۵	۰/۰۵
گوجه‌فرنگی	Cd	۲۲۴	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۰۸	۰/۰۵۲۰	۰/۰۵
	Pb	۲۱۱	۰/۰۱۳۳	ND	۰/۱۱۸۵	۰/۰۵
فلفل	Cd	۲۳	۰/۰۰۲۸	ND	۰/۰۰۷۶	۰/۰۵
	Pb	۲۳	۰/۰۰۶۴	ND	۰/۰۱۴۵	۰/۰۵
تربچه	Cd	۱۴۵	۰/۰۴۶۷	ND	۰/۱۸۰۰	۰/۱
	Pb	۱۷۸	۰/۰۹۰۹	ND	۰/۳۸۶۳	۰/۲
چغندر قند	Cd	۳	۰/۰۱۱۶	-	-	۰/۱
	Pb	۱۳	۰/۰۹۲۷	۰/۰۰۶۶	۰/۲۲۰۹	۰/۲

ND: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص یا <LOQ).

سیب‌زمینی

آماره‌های توصیفی غلظت کادمیم و سرب در سیب‌زمینی تولیدی ایران با مقدار آن در برخی دیگر از کشورها، در جدول ۱۷ مقایسه شده است. میانگین غلظت کادمیم در سیب‌زمینی تولیدی ایران $0/0075$ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که با مقادیر گزارش شده در کشورهای ایتالیا و بریتانیا تطابق نزدیک داشت و از مقدار آن در سایر کشورهای ذکر شده در جدول ۱۷ کمتر بود (Esposito et al., 2015; Norton et al., 2015). کمترین و بیشترین میانگین غلظت کادمیم به‌ترتیب در کشورهای بریتانیا ($0/0072$ میلی‌گرم در کیلوگرم) و لهستان ($0/270$ میلی‌گرم در کیلوگرم) گزارش شد. به‌طور مشابه، میانگین غلظت سرب در سیب‌زمینی تولیدی ایران $0/0281$ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که با مقدار آن در ایتالیا مطابقت داشت (Esposito et al., 2015). در مقابل، غلظت سرب در سیب‌زمینی ایران از مقدار آن در چین کمتر و از مقادیر گزارش شده در ایالات متحده، بریتانیا و اسپانیا بیشتر بود. Pajević et al. (۲۰۱۸) میانگین غلظت سرب در سیب‌زمینی تولیدی صربستان را $1/13$ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک (معادل $0/226$ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن تر با در نظر گرفتن ۸۰ درصد رطوبت) گزارش کردند که از مقدار گزارش شده در مطالعه حاضر ($0/042$ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن تر) بیشتر بود. همچنین، میانگین غلظت سرب در سیب‌زمینی تولیدی عربستان سعودی $0/1$ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک (معادل $0/02$ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن تر) گزارش شد که از مقدار آن در مطالعه حاضر کمتر بود (Feleafel and Mirdad, 2013).

جدول ۱۷- مقایسه غلظت کادمیم و سرب در سیب‌زمینی تولیدی ایران با دیگر کشورها

کشور یا منطقه	محصول عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی میلی‌گرم در کیلوگرم	کمینه	بیشینه	منبع
ایران	Cd	۱۸۷	$0/0075$	ND	$0/0566$	مطالعه حاضر
ایتالیا	Cd	۳۵۰	$0/008$	ND	$0/040$	(Esposito et al., 2015)
بریتانیا	Cd	۸۲	$0/0072$	$0/0018$	$0/0215$	(Norton et al., 2015)
امریکا	Cd	۵	$0/0335$	$0/0140$	$0/0535$	(Hadayat et al., 2018)
اسپانیا	Cd	۱۵۰	$0/010$	$0/0060$	$0/0190$	(Luis et al., 2014)
چین	Cd	۱۶	$0/0220$	-	-	(Zhou et al., 2000)
چین	Cd	۵۴	$0/083$	$0/023$	$0/180$	(Y. Zhang et al., 2017)
لهستان	Cd	۶	$0/270$	ND	$0/380$	(Dziubane et al., 2017)
ایران	Pb	87	$0/0281$	$0/0025$	$0/1473$	مطالعه حاضر
ایتالیا	Pb	۳۵۰	$0/020$	ND	$0/092$	(Esposito et al., 2015)
امریکا	Pb	۵	$0/0165$	-	-	(Hadayat et al., 2018)
بریتانیا	Pb	۸۲	$0/0050$	$0/0040$	$0/2680$	(Norton et al., 2015)
چین	Pb	۱۶	$0/310$	-	-	(Zhou et al., 2000)
اسپانیا	Pb	۱۵۰	$0/014$	$0/0070$	$0/0230$	(Luis et al., 2014)

ND: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص یا LOQ).

پیاز

آماره‌های توصیفی غلظت کادمیم و سرب در پیاز تولیدی ایران و مقایسه آن با سایر کشورها در جدول ۱۸ نشان داده شده است. میانگین غلظت کادمیم در پیازهای تولیدی ایران $0/0116$ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که از مقادیر گزارش شده در یونان ($0/09$ میلی‌گرم در کیلوگرم) و عراق ($0/047$ میلی‌گرم در کیلوگرم) کمتر بود (Jawad, 2010; Karavoltzos et al., 2002). این مقدار با سطوح گزارش شده در بریتانیا و ایالات متحده مطابقت داشت و از میانگین‌های گزارش شده در نیجریه، اتیوپی، پاکستان و الجزایر کمتر بود (جدول ۱۸). بیشترین میانگین غلظت کادمیم در پیاز مربوط به نیجریه و کمترین آن در بریتانیا گزارش شد (Čeryová et al., 2024; Norton et al., 2015). همچنین، میانگین غلظت سرب در پیازهای تولیدی ایران $0/0211$ (دامنه $0/003-0/160$) میلی‌گرم در کیلوگرم بود که با مقدار گزارش شده برای ایالات متحده مطابقت داشت. این مقدار در مقایسه با پیازهای تولیدی بریتانیا و پاکستان بالاتر و نیست به نیجریه، اتیوپی و الجزایر پایین‌تر بود (جدول ۱۸). در پیازهای تولیدی بغداد (عراق)، میانگین غلظت سرب برابر $0/028$ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن تازه گزارش شد که مشابه با مقدار مشاهده شده در مطالعه حاضر بود (Jawad, 2010). در مقابل، میانگین غلظت سرب در پیازهای ایران از مقادیر گزارش شده در یونان ($0/14$ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن تازه) و ویتنام ($0/48$ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن تازه) کمتر بود (Bui et al., 2016; Karavoltzos et al., 2002).

جدول ۱۸- مقایسه غلظت کادمیم و سرب در پیاز تولیدی ایران با دیگر کشورها

کشور یا منطقه	محصول عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی	کمینه	بیشینه	منبع
ایران	Cd	۹۸	۰/۰۱۱۶	۰/۰۰۳	۰/۱۶۰	مطالعه حاضر
بریتانیا	Cd	۶	۰/۰۱۲۶	۰/۰۰۱۸	۰/۰۲۹۶	(Norton et al., 2015)
آمریکا	Cd	۵	۰/۰۱۹۸	۰/۰۰۸	—	(Hadayat et al., 2018)
نیجریه	Cd	—	۰/۱۱۷۹	۰/۰۳۰۷	۰/۱۶۸۵	(Čeryová et al., 2024)
اتیوپی	Cd	۹	۰/۰۴۶۶	۰/۰۲۰	۰/۰۶۰	(Bedassa et al., 2017)
پاکستان	Cd	۱۰	۰/۰۷۹	۰/۰۷۴۲	۰/۰۸۳۸	(Abbas et al., 2010)
الجزایر	Cd	۳۰	۰/۰۴۰	ND	۰/۰۵۰	(Aksouh et al., 2025)
ایران	Pb	۶۲	۰/۰۲۱۱	۰/۰۰۰۵	۰/۰۶۷۵	مطالعه حاضر
بریتانیا	Pb	۶	۰/۰۰۴	—	—	(Norton et al., 2015)
آمریکا	Pb	۵	۰/۰۱۹۰	—	—	(Hadayat et al., 2018)
نیجریه	Pb	—	۰/۱۷۷۱	۰/۰۶۶۱	۰/۱۷۷۱	(Čeryová et al., 2024)
اتیوپی	Pb	۹	۰/۳۳	۰/۲۱	۰/۴۵	(Bedassa et al., 2017)
پاکستان	Pb	۱۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷	(Abbas et al., 2010)
الجزایر	Pb	۳۰	۰/۲۵۰	ND	۰/۳۲۰	(Aksouh et al., 2025)

ND: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص یا LOQ).

خيار

آماره‌های توصیفی مربوط به غلظت کادمیم و سرب در خيار تولیدی ایران و مقایسه آن با سایر کشورها در جدول ۱۹ نشان داده شده است. میانگین غلظت کادمیم در خيار ایران معادل ۰/۰۰۴۵ (دامنه <LOQ-۰/۰۴۳۲) میلی گرم در کیلوگرم بود که به مقدار گزارش شده در ایتالیا بسیار نزدیک بود، از مقادیر گزارش شده در مصر، چین و پاکستان کمتر و از مقدار گزارش شده در بریتانیا بیشتر بود (جدول ۱۹). بیشینه غلظت کادمیم در خيار تولیدی ایران نیز با بیشینه گزارش شده در پاکستان مطابقت داشت. به طور مشابه، میانگین غلظت سرب در خيارهای ایران ۰/۰۰۷۵ میلی گرم در کیلوگرم بود که از مقادیر گزارش شده در بریتانیا بیشتر و کمتر از مقدار آن در خيارهای تولیدی مصر، ایتالیا، چین و پاکستان بود. Tabatabaiee et al. (۱۳۹۵) میانگین غلظت کادمیم و سرب در خيار تولیدی کشور را به ترتیب ۰/۰۰۰۳ و ۰/۰۰۱ میلی گرم در کیلوگرم گزارش کردند، پایین تر از نتایج مطالعه حاضر بودند. همچنین، غلظت کادمیم و سرب در خيار ایران، کمتر از مقدار گزارش شده در نیجریه (به ترتیب ۰/۰۱۳۲ و ۰/۰۱۳۲ میلی گرم در کیلوگرم برای کادمیم و سرب) (Igwegbe et al., 2013)، و ترکیه (به ترتیب ۰/۰۳۲ و ۰/۳۴۵ میلی گرم در کیلوگرم برای کادمیم و سرب) بود (Demirezen and Aksoy, 2006). میانگین غلظت کادمیم و سرب در خيار تولیدی اسپانیا (به ترتیب ۰/۱۰۵ و ۰/۱۵۴ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک، معادل ۰/۰۰۵۲ و ۰/۰۰۷۷ میلی گرم در کیلوگرم وزن تر برای کادمیم و سرب) با مقدار آن در مطالعه حاضر مطابقت داشت (Bosque et al., 1990).

جدول ۱۹- مقایسه غلظت کادمیم و سرب در خيار تولیدی ایران با دیگر کشورها

کشور یا منطقه	محصول عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی	کمینه	بیشینه	منبع
ایران	Cd	۳۱۵	۰/۰۰۴۵	ND	۰/۰۴۳۲	مطالعه حاضر
مصر	Cd	۲۱۶	۰/۰۴۹۵	ND	۰/۲۸۴	(Mansour et al., 2009)
ایتالیا	Cd	۳	۰/۰۰۵	ND	۰/۰۱۸۰	(Esposito et al., 2015)
چین	Cd	۱۱	۰/۱۲۴	۰/۰۰۷	—	(Zhou et al., 2000)
بریتانیا	Cd	۴	۰/۰۰۱۸	—	—	(Norton et al., 2015)
پاکستان	Cd	۱۰	۰/۰۳۷	ND	۰/۰۴۱	(Abbas et al., 2010)
ایران	Pb	۳۱۵	۰/۰۰۷۵	ND	۰/۱۱۸۵	مطالعه حاضر
مصر	Pb	۲۱۶	۰/۲۹۳۷	ND	۰/۸۸۷	(Mansour et al., 2009)
ایتالیا	Pb	۳	۰/۰۲	ND	۰/۰۳۹	(Esposito et al., 2015)
چین	Pb	۱۱	۰/۴۴۰	۰/۰۷۴	—	(Zhou et al., 2000)
بریتانیا	Pb	۴	۰/۰۰۴	—	—	(Norton et al., 2015)
پاکستان	Pb	۱۰	۰/۰۶۹	—	—	(Abbas et al., 2010)

ND: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص یا LOQ).

گوجه‌فرنگی

آماره‌های توصیفی مربوط به غلظت کادمیم و سرب در گوجه‌فرنگی تولیدی ایران و مقایسه آن با سایر کشورها در جدول ۲۰ نشان داده شده است. میانگین غلظت کادمیم در گوجه‌فرنگی تولیدی کشور $0/0038$ میلی گرم در کیلوگرم بود که با مقادیر گزارش شده برای کشورهای آمریکا و بریتانیا مطابقت داشت و در مقایسه با سایر کشورهای گزارش شده در جدول ۲۰ مقدار کمتری را نشان داد. بالاترین غلظت کادمیم در گوجه‌فرنگی‌های تولیدی مکزیک ($0/395$ میلی گرم در کیلوگرم) گزارش شد (Calderon et al., 2023). میانگین غلظت سرب در گوجه‌فرنگی تولیدی ایران از مقدار آن در کشورهای آمریکا، بریتانیا و پاکستان بیشتر و کمتر از مقدار آن در کشورهای شیلی، ایتالیا، مکزیک و هند بود (جدول ۲۰). et al. Heshmati (۲۰۲۰) نیز میانگین غلظت کادمیم و سرب در گوجه‌فرنگی‌های تولیدی ایران را به ترتیب $0/003$ و $0/007$ میلی گرم در کیلوگرم وزن تر گزارش کردند که غلظت کادمیم آن با یافته‌های مطالعه حاضر مطابقت داشت. در مطالعه حاضر، میانگین غلظت سرب در نمونه‌های گوجه‌فرنگی $0/0133$ میلی گرم در کیلوگرم وزن تازه بود که از مقدار گزارش شده در صربستان ($0/0566$ میلی گرم در کیلوگرم وزن تازه) کمتر بود (Pajević et al., 2018).

جدول ۲۰- مقایسه غلظت کادمیم و سرب در گوجه‌فرنگی تولیدی ایران با دیگر کشورها

کشور یا منطقه	محصول عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی میلی گرم در کیلوگرم	کمینه	بیشینه	منبع
ایران	Cd	۲۳۴	$0/0038$	$0/0008$	$0/0520$	مطالعه حاضر
ایتالیا	Cd	۱۲۵	$0/009$	ND	$0/077$	(Esposito et al., 2015)
شیلی	Cd	۱۰	$0/017$	$0/014$	$0/019$	(Calderon et al., 2023)
آمریکا	Cd	۵	$0/0043$	$0/0009$	$0/0063$	(Hadayat et al., 2018)
مکزیک	Cd	۹	$0/055$	ND	$0/395$	(Calderon et al., 2023)
بریتانیا	Cd	۱۲	$0/0036$	$0/0018$	$0/0105$	(Norton et al., 2015)
پاکستان	Cd	۱۰	$0/071$	—	—	(Abbas et al., 2010)
اکوادور	Cd	۱۶	$0/0335$	ND	$0/058$	(Romero-Estévez et al., 2020)
هندوستان	Cd	۶	$0/008$	—	—	(Mawari et al., 2022)
ایران	Pb	۲۱۱	$0/0133$	ND	$0/1185$	مطالعه حاضر
ایتالیا	Pb	۱۲۵	$0/030$	ND	$0/090$	(Esposito et al., 2015)
شیلی	Pb	۱۰	$0/133$	$0/030$	$0/528$	(Calderon et al., 2023)
مکزیک	Pb	۹	$0/303$	ND	$2/109$	(Calderon et al., 2023)
آمریکا	Pb	۵	$0/0077$	$0/0029$	$0/0126$	(Hadayat et al., 2018)
بریتانیا	Pb	۱۲	$0/004$	—	—	(Norton et al., 2015)
پاکستان	Pb	۱۰	$0/009$	—	—	(Abbas et al., 2010)
اکوادور	Pb	۱۶	$0/0941$	ND	$0/209$	(Romero-Estévez et al., 2020)
هندوستان	Pb	۶	$0/063$	—	—	(Mawari et al., 2022)

ND: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص یا LOQ).

فلفل

آماره‌های توصیفی شامل کمینه، بیشینه و میانگین غلظت کادمیم و سرب در فلفل‌های تولیدی ایران در جدول ۲۱ نشان داده شده و با مقادیر گزارش شده از سایر کشورها مقایسه گردیده است. بر اساس نتایج، میانگین غلظت کادمیم در فلفل تولیدی کشور $0/0028$ میلی گرم در کیلوگرم بود که بیشترین شباهت را با مقدار گزارش شده در بریتانیا داشت و در مقابل از مقادیر گزارش شده در سایر کشورها کمتر بود (جدول ۲۱). بالاترین میانگین غلظت کادمیم در میان کشورهای بررسی شده به مکزیک ($0/065$ میلی گرم بر کیلوگرم) اختصاص داشت. همچنین، میانگین غلظت سرب در فلفل تولیدی کشور $0/0064$ میلی گرم در کیلوگرم بود که با مقادیر مربوط به کشورهای بریتانیا ($0/0062$ میلی گرم در کیلوگرم) و چین ($0/0060$ میلی گرم در کیلوگرم) تقریباً برابر بود. مقدار آن در مقایسه با ترکیه، لهستان، شیلی، مکزیک و ایتالیا به مراتب پایین تر بود. میانگین غلظت آرسنیک نیز در نمونه‌های فلفل ایرانی $0/0085$ (دامنه ND - $0/0455$) میلی گرم در کیلوگرم بود. این مقدار بالاتر از مقادیر گزارش شده در چین و ترکیه و در مقابل پایین تر از میانگین‌های ثبت شده در شیلی و پاکستان بود. به طور کلی، بیشترین میانگین غلظت کادمیم، سرب و آرسنیک به ترتیب در کشورهای مکزیک، ترکیه و شیلی و کمترین مقادیر آن به ترتیب در کشورهای

بریتانیا، چین و ترکیه مشاهده شده است.

جدول ۲۱- مقایسه غلظت کادمیم، سرب و آرسنیک در فلفل تولیدی ایران با دیگر کشورها

کشور یا منطقه	محصول عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی میلی گرم در کیلوگرم	کمینه	بیشینه	منبع
ایران	Cd	۲۳	۰/۰۰۲۸	ND	۰/۰۰۷۶	مطالعه حاضر
شیلی	Cd	۱۰	۰/۰۱۷	۰/۰۱۵	۰/۰۱۹	(Calderon et al., 2023)
مکزیک	Cd	۸	۰/۰۶۵	ND	۰/۵۲۳	(Calderon et al., 2023)
بریتانیا	Cd	۳	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۵۰	(Norton et al., 2015)
ایتالیا	Cd	۹	۰/۰۱۵	ND	۰/۰۳۳	(Esposito et al., 2015)
ترکیه	Cd	۴	۰/۰۳۰۴	-	-	(Altıkulaç et al., 2025)
لهستان	Cd	۸	۰/۰۲۰	۰/۰۰۲	۰/۰۴۴	(Kowalska, 2021)
چین	Cd	۲۵	۰/۰۲۵۶	۰/۰۱۲۹	۰/۰۴۱۳	(Zhang et al., 2019)
ایران	Pb	۲۳	۰/۰۰۶۴	ND	۰/۰۱۴۵	مطالعه حاضر
شیلی	Pb	۱۰	۰/۰۸۰	۰/۰۱۸	۰/۳۲۸	(Calderon et al., 2023)
مکزیک	Pb	۸	۰/۰۶۷	ND	۰/۲۷۱	(Calderon et al., 2023)
بریتانیا	Pb	۳	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۴۰	۰/۰۱۰۷	(Norton et al., 2015)
ایتالیا	Pb	۹	۰/۰۳۱	ND	۰/۰۷۶	(Esposito et al., 2015)
ترکیه	Pb	۴	۰/۳۵۳	-	-	(Altıkulaç et al., 2025)
لهستان	Pb	۸	۰/۳۳۸	۰/۰۷۰	۰/۷۷۵	(Kowalska, 2021)
چین	Pb	۲۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴۷	۰/۰۱۹۳	(Zhang et al., 2019)
ایران	As	۲۳	۰/۰۰۸۵	ND	۰/۰۴۵۵	مطالعه حاضر
شیلی	As	۱۰	۰/۲۲۸	۰/۱۴۵	۰/۲۷۳	(Calderon et al., 2023)
ترکیه	As	۲۵	ND	ND	ND	(Altıkulaç et al., 2025)
چین	As	۲۵	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۳۱	۰/۰۱۰۳	(Zhang et al., 2019)
لهستان	As	۸	۰/۰۷۷	۰/۰۱	۰/۱۷۵	(Kowalska, 2021)
پاکستان	As	۱۰	۰/۰۵۳	-	-	(Abbas et al., 2010)

ND: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص یا LOQ).

سبزیجات برگی و ساقه‌ای (کاهو، اسفناج و سبزی خوردن)

میانگین وزنی غلظت کادمیم و سرب در کاهوی تولیدی ایران به ترتیب ۰/۰۰۴۴ (دامنه ۰/۰۰۰۱-۰/۱۵۰۰) و ۰/۰۲۵۹ (دامنه ND-۰/۱۱۶۰) میلی گرم در کیلوگرم بود. در اسفناج نیز میانگین غلظت این دو عنصر به ترتیب ۰/۰۱۵۰ (دامنه ۰/۰۱۰۲-۰/۰۴۳۲) و ۰/۰۳۲۶ (دامنه ۰/۰۵۴-۰/۳۷۹۷) میلی گرم در کیلوگرم بود (جدول ۲۲). در استاندارد ملی ایران بیشینه غلظت مجاز کادمیم و سرب در سبزیجات برگی به ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۲ میلی گرم در کیلوگرم تعیین شده است. این مقادیر در استاندارد کدکس به ترتیب ۰/۱ و ۰/۳ و در استاندارد اتحادیه اروپا به ترتیب ۰/۲ و ۰/۳ می باشند (جدول‌های ۲ و ۳). با توجه به این استانداردها، میانگین غلظت کادمیم و سرب در کاهو و اسفناج تولیدی کشور از بیشینه حدود مجاز استاندارد کمتر بود. همچنین، بیشینه غلظت این عناصر در کاهو و نیز بیشینه غلظت کادمیم در اسفناج از بیشینه حدود مجاز فراتر نرفته‌اند و تنها بیشینه غلظت سرب در اسفناج از حدود مجاز استاندارد بیشتر بود.

در مورد سبزی خوردن (مجموعه‌ای از سبزی‌های تازه‌خوری شامل ریحان، جعفری، تره، شاهی، شوید، گشنیز و نعناع)، میانگین غلظت کادمیم و سرب به ترتیب ۰/۰۴۰ و ۰/۰۶۶۰ میلی گرم در کیلوگرم بود که هر دو مقدار از بیشینه حدود مجاز استانداردهای ملی ایران و جهانی کمتر بود. در بین سبزیجات این گروه، بالاترین میانگین غلظت کادمیم به ترتیب در شاهی < نعناع < شوید < تره < گشنیز < جعفری < ریحان مشاهده شد. بالاترین میانگین غلظت سرب نیز به ترتیب در نعناع < ریحان < تره < جعفری < شاهی < شوید < گشنیز مشاهده شد (جدول ۲۲). بالاترین غلظت کادمیم در محصول شاهی و نعناع (به ترتیب ۰/۳۱۰۰ و ۰/۱۹۰۰ میلی گرم در کیلوگرم) و بالاترین غلظت سرب نیز به ترتیب در محصولات نعناع و گشنیز (به ترتیب ۰/۶۲۳ و ۰/۵۹۰۰ میلی گرم در کیلوگرم) مشاهده شد.

جدول ۲۲- آماره‌های توصیفی غلظت کادمیم و سرب در سبزیجات برگی و ساقه‌ای تولیدی ایران

محصول	عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی	حداقل	حداکثر	حد مجاز استاندارد
			میلی گرم در کیلوگرم			
کاهو	Cd	۳۲۷	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۰۱	۰/۱۵۰۰	۰/۰۵
	Pb	۳۲۷	۰/۰۲۵۹	ND	۰/۱۱۶۰	۰/۲
اسفناج	Cd	۸۹	۰/۰۱۵۰	۰/۰۱۰۲	۰/۰۴۳۲	۰/۰۵
	Pb	۸۹	۰/۰۳۲۶	۰/۰۰۵۴	۰/۳۷۹۷	۰/۲
سبزی خوردن ^۱	Cd	۵۷۱	۰/۰۴۰۰	ND	۰/۳۱۰۰	۰/۰۵
	Pb	۳۹۷	۰/۰۶۶۰	ND	۰/۶۲۳	۰/۲
تره	Cd	۱۴۷	۰/۰۳۶۵	ND	۰/۱۷۲۰	۰/۰۵
	Pb	۱۲۱	۰/۰۷۴۸	ND	۰/۳۰۰۰	۰/۲
جعفری	Cd	۵۹	۰/۰۲۸۳	ND	۰/۱۰۰۰	۰/۰۵
	Pb	۳۶	۰/۰۷۳۱	۰/۰۳۹۰	۰/۳۱۰۰	۰/۲
ریحان	Cd	۹۶	۰/۰۲۰۸	ND	۰/۱۳۵۰	۰/۰۵
	Pb	۷۷	۰/۰۷۶۲	ND	۰/۵۱۰۰	۰/۲
شاهی	Cd	۷۲	۰/۰۶۷۴	ND	۰/۳۱۰۰	۰/۰۵
	Pb	۴۲	۰/۰۷۳۷	ND	۰/۳۴۱۰	۰/۲
شوید	Cd	۵۲	۰/۰۴۸۳	ND	۰/۰۹۰۰	۰/۰۵
	Pb	۳۲	۰/۰۶۷۹	۰/۰۶۲۱	۰/۴۵۸۰	۰/۲
گشنیز	Cd	۴۲	۰/۰۲۸۴	ND	۰/۱۲۰۰	۰/۰۵
	Pb	۵۲	۰/۰۱۵۰	۰/۰۴۸۰	۰/۵۹۰۰	۰/۲
نعناع	Cd	۱۰۳	۰/۰۴۹۹	ND	۰/۱۹۰۰	۰/۰۵
	Pb	۳۷	۰/۰۸۲۵	ND	۰/۶۲۳۰	۰/۲

۱. سبزی‌های تازه خوری شامل: ریحان، جعفری، تره، شاهی، شوید، گشنیز و نعناع

ND: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص یا LOQ).

کاهو

وضعیت غلظت کادمیم و سرب در کاهوی تولیدی ایران، همراه با مقایسه آن با برخی کشورهای دیگر، در جدول ۲۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج، میانگین غلظت کادمیم در کاهوی تولیدی کشور با مقادیر گزارش شده برای کشورهای آمریکا، ترکیه و برزیل بیشترین تطابق را داشت و کمتر از مقادیر گزارش شده در سایر کشورها بود (جدول ۲۳). به طور کلی، میانگین غلظت کادمیم در کاهو در دامنه ۰/۰۰۴۳ تا ۰/۰۸۱ میلی گرم در کیلوگرم متغیر بود که کمترین و بیشترین آن به ترتیب در کشورهای ایتالیا و چین گزارش شده بود (Dala-Paula et al., 2015; Esposito et al., 2018). به طور مشابه، میانگین غلظت سرب در کاهوی تولیدی ایران ۰/۰۲۵۹ میلی گرم در کیلوگرم بود که با مقادیر گزارش شده برای بریتانیا و آمریکا مشابهت داشت، و با مقادیر آن در کشورهای چین، اکوادور و برزیل مطابقت داشت (جدول ۲۳). در مقابل، میانگین غلظت سرب در کاهوی تولیدی در کشورهای شیلی، مکزیک و ترکیه از مقدار آن در ایران بیشتر گزارش شد.

et al. Heshmati (۲۰۲۰) با پایش وضعیت فلزات سنگین در سبزیجات تولیدی کشور، گزارش کردند که خطری از نظر سطوح بیش از حد کادمیم و سرب در سبزیجات تولیدی در غرب کشور وجود ندارد. این مطالعه، میانگین غلظت کادمیم و سرب در کاهو را به ترتیب ۰/۰۰۲۷ و ۰/۰۲۲ میلی گرم در کیلوگرم وزن تر گزارش کرد که با یافته‌های مطالعه حاضر مطابقت داشت. Bahemuka و Mubofu (۱۹۹۹) میانگین غلظت کادمیم در کاهوی آفریقای شرقی (تانزانیا) را ۰/۳ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک (معادل ۰/۰۱۳۵ میلی گرم در کیلوگرم وزن تر، با احتساب ۹۵/۵ درصد رطوبت) گزارش کردند که از میانگین آن در مطالعه حاضر بیشتر بود. علاوه بر این، میانگین غلظت کادمیم در کاهو تولیدی ایران نسبت به کشورهای عربستان سعودی و ترکیه کمتر بود (Oteef et al., 2015). Demirezen et al. (۲۰۰۶)، میانگین غلظت کادمیم و سرب در کاهو ترکیه را به ترتیب ۰/۰۱۷ و ۰/۴۸۵ میلی گرم در کیلوگرم گزارش کردند، که از مقادیر آن در کاهوی تولیدی ایران بیشتر بود (Demirezen and Aksoy, 2006).

جدول ۲۳- مقایسه غلظت کادمیم و سرب در کاهوی تولیدی ایران با دیگر کشورها

کشور یا منطقه	عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی	کمینه	بیشینه	منبع
			میلی گرم در کیلوگرم			
ایران	Cd	۳۲۷	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۰۱	۰/۱۵۰۰	مطالعه حاضر
ایتالیا	Cd	۲۸	۰/۰۴۳	ND	۰/۱۷۷	(Esposito et al., 2015)
شیلی	Cd	۱۰	۰/۰۱۸۰	۰/۰۱۶۰	۰/۰۱۹۰	(Calderon et al., 2023)
مکزیک	Cd	۹	۰/۰۳۹	ND	۰/۱۷۴	(Calderon et al., 2023)
بریتانیا	Cd	۴۲	۰/۰۱۶۶	۰/۰۰۴	۰/۰۴۳۹	(Norton et al., 2015)
آمریکا	Cd	۵	۰/۰۰۴۸	ND	۰/۰۱۴۵	(Hadayat et al., 2018)
ترکیه	Cd	۱۰	۰/۰۰۵	ND	۰/۰۳۱	(Bagdatlioglu et al., 2010)
چین	Cd	۲۸	۰/۰۸۱	۰/۰۲۳	۰/۱۴۰	(Zhang et al., 2013)
اکوادور	Cd	۱۶	۰/۰۱۶۷	ND	۰/۰۳۴	(Romero-Estévez et al., 2020)
برزیل	Cd	۹	۰/۰۰۹	۰/۰۰۴	۰/۰۱۴	(Dala-Paula et al., 2018)
ایران	Pb	۲۳۷	۰/۰۲۵۹	ND	۰/۱۱۶۰	مطالعه حاضر
ایتالیا	Pb	۲۸	۰/۰۶۹	۰/۰۲۰	۰/۲۳۴	(Esposito et al., 2015)
شیلی	Pb	۱۰	۰/۱۳۳	۰/۰۳۰	۰/۱۵۲	(Calderon et al., 2023)
مکزیک	Pb	۹	۰/۱۱۱	۰/۲۱۹	۰/۳۱۰	(Calderon et al., 2023)
بریتانیا	Pb	۴۲	۰/۰۲۷	۰/۰۰۴	۰/۲۳۳۳	(Norton et al., 2015)
آمریکا	Pb	۵	۰/۰۲۵۳	–	–	(Hadayat et al., 2018)
ترکیه	Pb	۱۰	۰/۱۶۳	۰/۰۷۵	۰/۲۴۹	(Bagdatlioglu et al., 2010)
چین	Pb	۲۸	۰/۰۳۲۲	۰/۰۱۸	–	(Zhang et al., 2013)
اکوادور	Pb	۱۶	۰/۰۳۵۴	ND	۰/۰۶۶	(Romero-Estévez et al., 2020)
برزیل	Pb	۹	۰/۰۳۷	۰/۰۰۱	۰/۰۷۶	(Dala-Paula et al., 2018)

ND: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص یا LOQ).

اسفناج

آماره‌های توصیفی مربوط به غلظت کادمیم و سرب در اسفناج تولیدی ایران و مقایسه آن با مقادیر گزارش شده از دیگر کشورها در جدول ۲۴ ارائه شده است. میانگین غلظت کادمیم در اسفناج تولیدی ایران ۰/۰۲۵۰ (دامنه ۰/۰۱۰۲–۰/۰۴۳۲) میلی گرم در کیلوگرم بود که به مقدار آن در اسفناج تولید ترکیه با میانگین ۰/۰۳۳۶ (دامنه ۰/۰۲۵۲–۰/۰۴۶۸) میلی گرم در کیلوگرم مطابقت داشت (Mor and Ceylan, 2008). در مقابل میانگین غلظت کادمیم در اسفناج تولیدی در پاکستان، مکزیک و ایتالیا از مقدار آن در ایران بیشتر بود. میانگین غلظت سرب در اسفناج تولیدی ایران ۰/۰۳۲۶ میلی گرم در کیلوگرم بود که از مقدار گزارش شده در کشور پاکستان بیشتر بود و با مقدار گزارش شده در ایتالیا مطابقت داشت (جدول ۲۴). در مقابل، میانگین غلظت سرب در اسفناج تولیدی مکزیک و کنیا به ترتیب ۰/۴۳۱ و ۰/۵۱۲۷ میلی گرم در کیلوگرم بود که به مراتب بالاتر از مقدار آن در اسفناج تولیدی ایران بود (Calderon et al., 2023; Tomno, 2022). به طور کلی، بیشترین و کمترین میانگین غلظت کادمیم به ترتیب در کشورهای پاکستان و ایران و بیشترین و کمترین غلظت سرب به ترتیب در کنیا و پاکستان ثبت شده است (جدول ۲۴).

جدول ۲۴- مقایسه غلظت کادمیم و سرب در اسفناج تولیدی ایران با دیگر کشورها

کشور یا منطقه	محصول عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی	کمینه	بیشینه	منبع
			میلی گرم در کیلوگرم			
ایران	Cd	89	۰/۰۲۵۰	۰/۰۱۰۲	۰/۰۴۳۲	مطالعه حاضر
ایتالیا	Cd	۸	۰/۰۶۴	ND	۰/۱۶۴	(Esposito et al., 2015)
پاکستان	Cd	۱۰	۰/۰۸۷	–	–	(Abbas et al., 2010)
مکزیک	Cd	۷	۰/۰۵۱	ND	۰/۳۰۱	(Calderon et al., 2023)
بریتانیا	Cd	۸	۰/۰۴۷۷	۰/۰۱۱۰	۰/۱۱۲۶	(Norton et al., 2015)
ترکیه	Cd	۱۶	۰/۰۳۳۶	۰/۰۲۵۲	۰/۰۴۶۸	(Mor and Ceylan, 2008)
ایران	Pb	89	۰/۰۲۲۶	۰/۰۰۵۴	۰/۳۷۹۷	مطالعه حاضر



ادامه جدول ۲۴- مقایسه غلظت کادمیم و سرب در اسفناج تولیدی ایران با دیگر کشورها

کشور یا منطقه	محصول عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی میلی گرم در کیلوگرم	کمینه	بیشینه	منبع
ایتالیا	Pb	۸	۰/۰۴۵	ND	۰/۱۲۰	(Esposito et al., 2015)
پاکستان	Pb	۱۰	۰/۰۱۰	-	-	(Abbas et al., 2010)
مکزیک	Pb	۷	۰/۴۳۱	ND	۲/۲۵۶	(Calderon et al., 2023)
کنیا	Pb	۱۲	۰/۵۱۲۷	۰/۲۸۰	۰/۶۳۶	(Tomno, 2022)
بریتانیا	Pb	۸	۰/۰۷۹۸	۰/۰۰۴	۰/۲۸۲۲	(Norton et al., 2015)
ترکیه	Pb	۱۶	۰/۰۷۵	۰/۰۳۳۴	۰/۱۲۲۴	(Mor and Ceylan, 2008)

ND: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص یا LOQ).

سبزیجات تازه خوری (ریحان، جعفری، تره، شاهی، شوید، گشنیز و نعنای)

آماره‌های توصیفی غلظت کادمیم و سرب در سبزیجات تازه خوری تولیدی ایران در جدول ۲۵ نشان داده شده و با داده‌های گزارش شده از سایر کشورها مقایسه گردید. با توجه به تنوع زیاد این گروه از سبزیجات، محصولات ریحان، جعفری، تره، شاهی، شوید، گشنیز و نعنای به صورت تجمیعی تحت عنوان "سبزیجات تازه خوری" بررسی شده‌اند. بر اساس نتایج حاصل از مطالعه حاضر، غلظت کادمیم در سبزیجات تازه خوری ایران در دامنه ND-۰/۳۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم و غلظت سرب در دامنه ND-۰/۶۲۳۰ میلی گرم در کیلوگرم متغیر بود (جدول ۲۵). میانگین غلظت کادمیم و سرب در این گروه از سبزیجات به ترتیب برابر ۰/۰۴۰ و ۰/۰۶۶۰ میلی گرم در کیلوگرم بود. Han و Pan (۲۰۲۳) با بررسی ۴۰۹ نمونه از انواع سبزیجات تازه خوری تولیدی چین، میانگین غلظت کادمیم را ۰/۰۳۰ میلی گرم در کیلوگرم گزارش کردند که از مقدار آن در مطالعه حاضر کمتر بود.

در بین سبزیجات مختلف این گروه، بیشترین میانگین غلظت کادمیم به ترتیب در تره تولیدی چین (۰/۷۲ میلی گرم در کیلوگرم) و جعفری تولیدی لهستان (۰/۳۵ میلی گرم در کیلوگرم) مشاهده شد. در مقابل، کمترین میانگین کادمیم در شوید تولیدی ترکیه (۰/۰۰۱ میلی گرم در کیلوگرم) و نعنای تولیدی پرو (۰/۰۰۳ میلی گرم در کیلوگرم) گزارش گردید. از نظر غلظت سرب نیز، بیشترین میانگین‌ها مربوط به محصولات تولیدی عراق از جمله ریحان (۰/۹۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم)، جعفری (۰/۷۸۰ میلی گرم بر کیلوگرم) و شوید (۰/۶۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم) بود. علاوه بر این، شوید تولیدی ترکیه (۰/۱۵۹ میلی گرم بر کیلوگرم) و گشنیز تولیدی پاکستان (۰/۱۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم) نیز دارای مقادیر بالایی از سرب بودند. در مقابل، کمترین غلظت سرب در تره تولیدی بریتانیا (۰/۰۰۵۵ میلی گرم بر کیلوگرم) گزارش شده است.

جدول ۲۵- مقایسه غلظت کادمیم و سرب در سبزیجات تازه خوری تولیدی ایران با دیگر کشورها

کشور یا منطقه	محصول	عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی میلی گرم در کیلوگرم	کمینه	بیشینه	منبع
ایران	سبزیجات تازه خوری	Cd	۵۷۱	۰/۰۴۰۰	ND	۰/۳۱۰۰	مطالعه حاضر
چین	سبزیجات برگی	Cd	۴۰۹	۰/۰۳۰	ND	۰/۲۱۰	(Pan and Han, 2023)
چین	سبزیجات برگی	Cd	۲۸	۰/۰۱۳	۰/۰۰۲	۰/۰۴۵	(Hu et al., 2017)
پرو	تره	Cd	۵	۰/۰۶۶	۰/۰۰۹	۰/۰۲۳	(Quispe et al., 2021)
چین	تره	Cd	۵	۰/۷۲	۰/۴۶۰	۰/۸۷۰	(Quispe et al., 2021)
لهستان	جعفری	Cd	۳۲	۰/۳۵	۰/۰۱۰	۰/۶۱۰	(Dziubanek et al., 2017)
ایتالیا	جعفری	Cd	۳	۰/۰۰۷	ND	۰/۰۱۰	(Esposito et al., 2015)
عراق	جعفری	Cd	۳	۰/۲۰۵	-	-	(Sadee and Ali, 2023)
عراق	ریحان	Cd	۳	۰/۱۱۰	-	-	(Sadee and Ali, 2023)
ایتالیا	ریحان	Cd	-	۰/۰۰۵	-	-	(Esposito et al., 2015)
ترکیه	نعناع	Cd	۱۰	۰/۰۰۴	ND	۰/۰۳۴	(Bagdatlioglu et al., 2010)
پرو	نعناع	Cd	۵	۰/۰۰۳	ND	۰/۰۱۰	(Quispe et al., 2021)
پاکستان	نعناع	Cd	۱۰	۰/۰۷۱	-	-	(Abbas et al., 2010)
پرو	گشنیز	Cd	۵	۰/۰۲۳۶	۰/۰۱۵	۰/۰۴۹	(Quispe et al., 2021)
پاکستان	گشنیز	Cd	۱۰	۰/۰۸۴	-	-	(Abbas et al., 2010)
عراق	شوید	Cd	۳	۰/۱۱۰	-	-	(Sadee and Ali, 2023)

ادامه جدول ۲۵- مقایسه غلظت کادمیم و سرب در سبزیجات تازه خوری تولیدی ایران با دیگر کشورها

کشور یا منطقه	محصول	عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی میلی گرم در کیلوگرم	کمینه	بیشینه	منبع
ترکیه	شوید	Cd	۱۰	۰/۰۰۱	ND	۰/۰۰۸	(Bagdatlioglu et al., 2010)
ایران	سبزیجات تازه خوری	Pb	۳۹۷	۰/۰۶۶۰	ND	۰/۶۲۳۰	مطالعه حاضر
چین	سبزیجات برگی	Pb	۲۸	۰/۰۲۲	۰/۰۰۱	۰/۰۸۰	(Hu et al., 2017)
پرو	تره	Pb	۵	۰/۰۱۰۴	۰/۰۰۷	۰/۰۱۵	(Quispe et al., 2021)
بریتانیا	تره	Pb	۳۱	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۴	۰/۰۲۷۳	(Norton et al., 2015)
ایتالیا	جعفری	Pb	۳	۰/۰۴۲	ND	۰/۰۹۲	(Esposito et al., 2015)
عراق	جعفری	Pb	۳	۰/۷۸۰	-	-	(Sadee and Ali, 2023)
عراق	ریحان	Pb	۳	۰/۹۵۰	-	-	(Sadee and Ali, 2023)
ایتالیا	ریحان	Pb	-	۰/۰۱۰	-	-	(Esposito et al., 2015)
پرو	نعناع	Pb	۵	۰/۰۶۸۴	۰/۰۲۶	۰/۱۸۹	(Quispe et al., 2021)
پاکستان	نعناع	Pb	۱۰	۰/۰۱۲	-	-	(Abbas et al., 2010)
ترکیه	نعناع	Pb	۱۰	۰/۱۹۲	۰/۰۴۰	۰/۲۶۸	(Bagdatlioglu et al., 2010)
پرو	گشنیز	Pb	۵	۰/۰۵۰	۰/۰۳۱	۰/۰۶۷	(Quispe et al., 2021)
عراق	شوید	Pb	۳	۰/۶۱۰	-	-	(Sadee and Ali, 2023)
ترکیه	شوید	Pb	۱۰	۰/۱۵۹	۰/۰۰۴	۰/۴۰۹	(Bagdatlioglu et al., 2010)
پاکستان	گشنیز	Pb	۱۰	۰/۱۵۰	-	-	(Abbas et al., 2010)

ND: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص یا LOQ <).

میوه‌های درختی

وضعیت غلظت کادمیم و سرب در میوه‌های درختی شامل سیب، پرتقال و پسته در جدول ۲۶ نشان داده شده است. طبق نتایج، میانگین غلظت کادمیم و سرب در سیب به ترتیب ۰/۰۰۷۶ و ۰/۰۲۵۰ میلی گرم در کیلوگرم، در پرتقال ۰/۰۰۳۸ و ۰/۰۱۹۳ میلی گرم در کیلوگرم و در پسته ۰/۰۱۳۱ و ۰/۰۵۲۳ میلی گرم در کیلوگرم بود. در استاندارد ملی ایران بیشینه غلظت مجاز سرب در محصولات سیب و پرتقال معادل ۰/۱ میلی گرم در کیلوگرم تعیین شده است که این مقدار مطابق استاندارد کدکس، اتحادیه اروپا و چین می‌باشد. بر این اساس، غلظت سرب در تمام نمونه‌های سیب و پرتقال تولیدی کشور از بیشینه حد مجاز کمتر بود. در استاندارد ملی ایران برای غلظت کادمیم در محصولات سیب و پرتقال بیشینه حدود مجاز تعیین نشده است، اما بر اساس استاندارد اتحادیه اروپا، بیشینه غلظت مجاز کادمیم در سیب و پرتقال به ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۰۲ میلی گرم در کیلوگرم تعیین شده است که غلظت‌های اندازه‌گیری شده در نمونه‌های تولیدی کشور از این حدود کمتر بوده‌اند (جدول ۲۶). در مورد محصول پسته، تاکنون در استاندارد ملی ایران و همچنین سایر استانداردهای بین‌المللی، حد مجاز مشخصی برای غلظت عناصر سنگین مانند کادمیم و سرب تعیین نشده است (مطابق جدول‌های ۲ تا ۵).

جدول ۲۶- آماره‌های توصیفی غلظت کادمیم و سرب در میوه‌های درختی تولیدی ایران

محصول	عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی میلی گرم در کیلوگرم	حداقل	حداکثر	حد مجاز استاندارد
سیب	Cd	۴۰	۰/۰۰۷۶	ND	۰/۰۶۱۶	۰/۰۵ (اتحادیه اروپا)
	Pb	۴۰	۰/۰۲۵۰	ND	۰/۰۹۶۹	۰/۱
پرتقال	Cd	۴۰	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۰۵	۰/۰۱۲۱	۰/۰۲ (اتحادیه اروپا)
	Pb	۴۰	۰/۰۱۹۳	ND	۰/۰۶۲۴	۰/۱
پسته	Cd	۳۹	۰/۰۱۳۱	ND	۰/۱۱۴۴	تعیین نشده
	Pb	۳۹	۰/۰۵۲۳	ND	۰/۲۷۲۱	تعیین نشده

ND: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص یا LOQ <).

سیب

آماره‌های توصیفی غلظت عناصر کادمیم و سرب در سیب تولیدی کشور و مقایسه آن با برخی از دیگر کشورها در جدول ۲۷ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، میانگین غلظت کادمیم در سیب تولیدی ایران ۰/۰۰۷۶ (دامنه LOQ < - ۰/۰۶۱۶) میلی گرم در کیلوگرم بود که با مقدار گزارش شده در کشور ایتالیا مطابقت داشت و کمتر از مقدار آن در کشور یونان بود. در مقابل، میانگین غلظت کادمیم در کشورهای

چین، بریتانیا، لهستان و هندوستان از مقدار گزارش شده در مطالعه حاضر کمتر بود (جدول ۲۷). به طور مشابه، میانگین غلظت سرب در سیب تولیدی ایران ۰/۰۲۵۰ (دامنه $LOQ < 0.0969$) میلی گرم در کیلوگرم بود که با مقادیر گزارش شده در چین و بریتانیا مطابقت داشت و کمتر از مقادیر مشاهده شده در ایتالیا و هندوستان بود (جدول ۲۷). et al. Krejpcio (۲۰۰۵) دامنه غلظت کادمیم و سرب در سیب های تولیدی هلند را به ترتیب $LOQ < 0.046$ و $0.007 - 0.032$ میلی گرم در کیلوگرم گزارش کردند، که دامنه غلظت کادمیم با داده های مطالعه حاضر مطابقت داشت. Liang et al. (۲۰۱۹) میانگین غلظت کادمیم و سرب در سیب های کشور چین را به ترتیب ۰/۰۰۵ و ۰/۰۸ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک گزارش کردند که از میانگین های گزارش شده در مطالعه حاضر (به ترتیب ۰/۰۴۶۶ و ۰/۱۵۳۴ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک، با احتساب ۸۳/۷ درصد رطوبت) کمتر بود. میانگین غلظت کادمیم و سرب در سیب های تولیدی ایران همچنین با مقادیر گزارش شده در کشور مصر (به ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۱۹ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک برای کادمیم و سرب) مطابقت داشت و از مقادیر گزارش شده برای کشور هلند (به ترتیب ۰/۰۰۷ و ۰/۰۲۴ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک برای کادمیم و سرب) بیشتر بود (Rusin et al., 2021; T. Zhang et al., 2021). Lazović et al. (۲۰۲۲) نیز با آنالیز ۲۲۹ نمونه سیب از ۱۳ کشور مختلف از جمله صربستان، ایتالیا، بلژیک و اتریش، دامنه غلظت کادمیم و سرب را به ترتیب $LOQ < 0.2269$ و $LOQ < 0.1409$ میلی گرم در کیلوگرم گزارش کردند.

جدول ۲۷- مقایسه غلظت کادمیم و سرب در سیب تولیدی ایران با دیگر کشورها

کشور یا منطقه	عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی میلی گرم در کیلوگرم	کمینه	بیشینه	منبع
ایران	Cd	۴۰	۰/۰۰۷۶	ND	۰/۰۶۱۶	مطالعه حاضر
چین	Cd	۲۱۲	۰/۰۰۲۱	ND	۰/۰۰۶	(Nie et al., 2016)
بریتانیا	Cd	۱۷	۰/۰۰۱۸	-	-	(Norton et al., 2015)
ایتالیا	Cd	۲۰	۰/۰۰۸	ND	۰/۰۳۰	(Esposito et al., 2015)
مصر	Cd	۳۶	ND	ND	ND	(Amer et al., 2019)
یونان	Cd	۴۲	۰/۰۱۴۵	۰/۰۰۰۶	۰/۴۳۱۵	(Skordas et al., 2013)
لهستان	Cd	۵۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۷۱	(Rusin et al., 2021)
هندوستان	Cd	۶	۰/۰۰۲	-	-	(Mawari et al., 2022)
ایران	Pb	۴۰	۰/۰۲۵۰	ND	۰/۰۹۶۹	مطالعه حاضر
چین	Pb	۲۱۲	۰/۰۲۳۳	۰/۰۰۴	۰/۰۴۲۶	(Nie et al., 2016)
بریتانیا	Pb	۱۷	۰/۰۲۳۳	۰/۰۰۴	۰/۳۲۲۳	(Norton et al., 2015)
ایتالیا	Pb	۲۰	۰/۰۴۵	ND	۰/۰۹۲	(Esposito et al., 2015)
هندوستان	Pb	۶	۰/۰۶۸	-	-	(Mawari et al., 2022)
لهستان	Pb	۵۷	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	۰/۰۲۴	(Rusin et al., 2021)

 ND: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص یا $LOQ <$).

پرتقال

وضعیت غلظت کادمیم و سرب در پرتقال های تولیدی ایران و مقایسه آن با داده های گزارش شده در کشورهای دیگر در جدول ۲۸ ارائه شده است. بر اساس نتایج، میانگین غلظت کادمیم و سرب در پرتقال های تولید ایران به ترتیب ۰/۰۰۳۸ و ۰/۰۱۹۳ میلی گرم در کیلوگرم بود که از مقدار آن در پرتقال های تولیدی ایتالیا کمتر و در مقابل بیشتر از مقدار آن در کشورهای مصر و هندوستان بود. Radwan et al. (۲۰۰۶) میانگین غلظت کادمیم و سرب در پرتقال های تولیدی مصر را به ترتیب ۰/۰۱ و ۰/۳۸ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک گزارش کردند که در مقایسه با مطالعه حاضر (به ترتیب ۰/۰۳۴۵ و ۰/۱۷۵۴ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک- با احتساب ۸۹ درصد رطوبت)، میانگین غلظت کادمیم کمتر و میانگین غلظت سرب بیشتر از مقادیر گزارش شده در مطالعه حاضر بود. در مطالعه ای دیگر، et al. Yami (۲۰۱۶) میانگین غلظت کادمیم در پرتقال کشور اتیوپی را ۰/۳ میکروگرم در گرم گزارش کردند که از مقدار گزارش شده در مطالعه حاضر به مراتب بیشتر بود. در مقابل، میانگین غلظت کادمیم و سرب در پرتقال های کشور لهستان به ترتیب ۰/۰۰۰۴۹ و ۰/۰۱۰۲ میلی گرم در کیلوگرم گزارش شد که از مقادیر آن در مطالعه حاضر کمتر بود (Czech et al., 2021). Lazović et al. (۲۰۲۲) با آنالیز ۱۱۱ نمونه پرتقال از ۱۲ کشور مختلف از جمله ایتالیا، اسپانیا، ترکیه، یونان و جنوب آفریقا، دامنه غلظت کادمیم را ۰/۰۰۸-۰/۰۴۹۹ میلی گرم در کیلوگرم و دامنه غلظت سرب را ۰/۰۰۹-۰/۱۲۶۶ میلی گرم در کیلوگرم گزارش کردند که از دامنه مقادیر گزارش شده در مطالعه حاضر بیشتر بود.

جدول ۲۸- مقایسه غلظت کادمیم و سرب در پرتقال تولیدی ایران با دیگر کشورها

کشور یا منطقه	محصول	عنصر	تعداد نمونه	میانگین وزنی میلی گرم در کیلوگرم	کمینه	بیشینه	منبع
ایران	پرتقال	Cd	۴۰	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۰۵	۰/۰۱۲۱	مطالعه حاضر
ایتالیا	پرتقال	Cd	۲	۰/۰۰۹	-	-	(Beccaloni et al., 2013)
ایتالیا	پرتقال	Cd	۲	۰/۰۰۵	ND	۰/۰۰۵	(Esposito et al., 2015)
مصر	پرتقال	Cd	۳۶	ND	ND	ND	(Amer et al., 2019)
هندوستان	پرتقال	Cd	۶	۰/۰۰۱	-	-	(Mawari et al., 2022)
ایران	پرتقال	Pb	۴۰	۰/۰۱۹۳	ND	۰/۰۶۲۴	مطالعه حاضر
هندوستان	پرتقال	Pb	۶	۰/۰۰۲	-	-	(Mawari et al., 2022)
ایتالیا	پرتقال	Pb	۲	۰/۱۵۲	۰/۰۵۲	۰/۱۵۲	(Beccaloni et al., 2013)
ایتالیا	پرتقال	Pb	۲	۰/۰۳۲	۰/۰۲۶	۰/۰۳۷	(Esposito et al., 2015)

ND: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص یا LOQ <).

نتیجه گیری

بررسی مجموعه مطالعات انجام شده نشان داد که؛ (۱) با وجود اهمیت کیفیت محصولات کشاورزی در تأمین امنیت غذایی کشور، تضمین صادرات و توجه فزاینده کشورهای مختلف به این موضوع، پایش کیفی محصولات کشاورزی در ایران همچنان با کم توجهی مواجه است. آمار محدود تعداد مطالعات، حجم پایین نمونه های اندازه گیری شده و پراکنش نامتوازن تحقیقات در مقایسه با سهم مناطق مختلف تولیدی، شواهد روشنی بر این مسئله است. (۲) فقدان هماهنگی بین دستگاه های متولی و نبود یک برنامه ملی منسجم برای پایش کیفیت محصولات کشاورزی، موجب شده است که بخش قابل توجهی از مطالعات ملی، علی رغم صرف زمان و هزینه، به دلیل کاستی های روشی در زمره تحقیقات غیرقابل اتکا یا فاقد اعتبار علمی قرار گیرند. چنین مطالعاتی علاوه بر اتلاف منابع، با انتشار نتایج نادرست می توانند زمینه ساز نگرانی های اجتماعی و اتخاذ تصمیم های غیرعلمی شده و از این طریق آسیب بیشتری به امنیت غذایی کشور وارد نمایند. (۳) با توجه به اهمیت و حساسیت موضوع، ضروری است یک مرجع ملی پاسخگو تعیین شود تا تمامی مطالعات دستگاه ها تحت نظارت و هماهنگی آن اجرا گردد. (۴) انجام یک مطالعه معتبر در زمینه پایش عناصر سنگین در محصولات خوراکی مستلزم رعایت دقیق تمامی مراحل، از نمونه برداری تا ارائه نتایج، مطابق با استانداردهای موجود است. هرگونه خطا در هر مرحله به تضعیف اعتبار کل فرآیند منجر شده و تلاش های بعدی قادر به جبران آن نخواهد بود. از این رو، لازم است کارشناسان، مجریان پروژه ها و داوران علمی، بر تمامی الزامات فنی و روشی پایش فلزات سنگین در محصولات کشاورزی خوراکی تسلط کافی داشته باشند.

تحلیل کیفی صورت گرفته نشان داد که بسیاری از مطالعات داخلی در حوزه کیفیت محصولات کشاورزی خوراکی، با اشکالات جدی در یک یا چند مرحله کلیدی مواجه بوده اند که اعتبار علمی نتایج را زیر سؤال برده است. به عنوان نمونه، از مجموع ۱۹۹ مطالعه ارزیابی شده، حدود ۳۰ درصد دارای آماده سازی نمونه های غیراستاندارد یا فاقد شرح روش آماده سازی بودند. همچنین در شمار زیادی از مطالعات، دستگاه های مورد استفاده یا نامشخص و یا نامناسب گزارش شده بود؛ به گونه ای که برخی از آن ها برای سنجش غلظت عناصر سنگین در بافت های گیاهی از FAAS و ICP-OES استفاده کرده بودند. این در حالی است که با توجه به محدوده غلظت عناصر سنگین در محصولات خوراکی و حد کمی سازی این دستگاه ها، نتایج به دست آمده با عدم قطعیت بالا و اعتمادپذیری پایین همراه است. علاوه بر این، در ۷۶ درصد مطالعات، هیچ گونه گزارش از روش ها یا نتایج کنترل کیفی داده ها ارائه نشده بود. همچنین، حدود ۶۰ درصد مطالعات غلظت عناصر را به اشتباه بر مبنای وزن خشک گزارش کرده و در ۲۴ درصد دیگر حتی مبنای گزارش (وزن تر یا خشک) مشخص نشده بود.

با توجه به ارزیابی کیفی انجام شده، از ۱۹۹ مطالعه بررسی شده تنها ۱۳۴ مطالعه حداقل کیفیت لازم را دارا بوده و برای تحلیل نهایی وضعیت فلزات سنگین در محصولات کشاورزی کشور قابل استفاده بودند. به طور کلی، نتایج این مطالعات نشان داد که محصولات کشاورزی ایران از نظر غلظت کادمیم، سرب و آرسنیک در مقایسه با حدود مجاز ملی و استانداردهای بین المللی، در وضعیت نسبتاً مطلوب قرار دارند. طبق یافته ها، میانگین وزنی غلظت این سه عنصر در تمامی محصولات، کمتر از بیشینه حدود مجاز ایران و سایر کشورها بود. با این حال، این موضوع به معنای ایمنی کامل تمامی محصولات و مناطق تولیدی کشور نیست. همان طور که اشاره شد، تحلیل حاضر بر داده های میانگین متکی بود و به دلیل نبود داده های خام، امکان بررسی دقیق پراکنش نمونه ها و تعیین سهم محصولات فراتر از حدود مجاز فراهم نشد. از این رو، هرچند نگرانی گسترده ای در سطح ملی مشاهده نشد، اما توصیه می شود پایش غلظت عناصر سنگین به ویژه در مناطق



پرخاطر و محصولات مستعد انباشت فلزات سنگین، با طراحی مطالعات استاندارد و تحت نظارت یک نهاد تخصصی انجام شود. چنین اقداماتی با رویکرد پژوهش‌های کاربردی و رعایت کامل الزامات فنی، ضمن فراهم کردن امکان جمع و مقایسه داده‌ها در بلندمدت، به ارتقای اعتبار ملی و بین‌المللی نتایج کمک خواهد کرد.

سپاسگزاری

این پژوهش در بخش آزمایشگاه‌های موسسه تحقیقات خاک و آب کرج انجام شده است. نویسندگان از حمایت موسسه تحقیقات خاک و آب قدردانی می‌نمایند.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

منابع

چراغی، میثم؛ شهبازی، کریم؛ فتحی گردلیدانی، ارژنگ؛ بازرگان، کامبیز؛ مارزی، مصطفی؛ هاشمی نسب زواره، کبری سادات؛ بهشتی، مهدی. (۱۴۰۲). بررسی وضعیت نیترات در محصولات کشاورزی ایران و نقدی بر مطالعات گزارش شده-مطالعه مروری. *تحقیقات آب و خاک ایران*. doi: 10.22059/ijswr.2023.362834.669545

شهبازی، کریم؛ هاشمی نسب زواره، کبری؛ تجددی طلب، کبری؛ یگانه، مژگان؛ بهشتی، مهدی؛ علی اکبر، زارع؛ مصطفی، مارزی؛ توانا مهر، آبناز؛ حق طلب کماچی، دیدار. (۲۰۲۳). بررسی غلظت عناصر سنگین (کادمیم، سرب و آرسنیک) و برخی از عناصر غذایی در برنج‌های تولیدی کشور. *موسسه تحقیقات خاک و آب (SWRI)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)*.

شهبازی، کریم؛ نقی‌پور، فریبا؛ خرازی، ناهید؛ بهار لو هوره، ندا؛ بهشتی، مهدی؛ مارزی، مصطفی؛ نوربخش، رویا؛ خورسندی، هنگامه؛ سهرابی، سهراب؛ اسفندیاری پور، اسمعیل؛ بازرگان، کامبیز؛ زارع، علی‌اکبر؛ یگانه، مژگان؛ هاشمی نسب زواره، کبری سادات. (۲۰۲۰). بررسی غلظت فلزات سنگین (کادمیم و سرب) و برخی از عناصر غذایی در گندم، آرد و نان تولیدی کشور. *موسسه تحقیقات خاک و آب (SWRI)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)*.

REFERENCES

- Abbas, Parveen, Iqbal, Riazuddin, Iqbal, Ahmed, and Bhutto. (2010). Monitoring of toxic metals (cadmium, lead, arsenic and mercury) in vegetables of Sindh, Pakistan. *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology*, 6(2), 60-65 .
- Aboubakar, El Hajjaji, Douaik, Mfopou Mewouo, Birang a Madong, Dahchour, Mabrouki, and Labjar. (2023). Heavy metal concentrations in soils and two vegetable crops (*Corchorus olitorius* and *Solanum nigrum* L.), their transfer from soil to vegetables and potential human health risks assessment at selected urban market gardens of Yaoundé, Cameroon. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 103(15), 3522-3543.
- Adams, Zhao, McGrath, Nicholson, Chalmers, Chambers, and Sinclair. (2001). Cadmium and lead in British wheat and barley: survey results and factors affecting their concentration in grain (HGCA Project Report No. 265) .
- Akinci, and Akinci. (2010). Effect of chromium toxicity on germination and early seedling growth in melon (*Cucumis melo* L.). *African Journal of Biotechnology*, 9(29), 4589-4594 .
- Aksouh, Rabahi, and Benosmane. (2025). Assessment of heavy metal contaminations in irrigation water, soils, and onions in the Isser and Zemmouri Regions, Algeria. *Journal of Toxicological Studies*, 3(1), 2216-2216.
- Al Khateeb, and Al-Qwasemeh. (2014). Cadmium, copper and zinc toxicity effects on growth, proline content and genetic stability of *Solanum nigrum* L., a crop wild relative for tomato; comparative study. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 20, 31-39 .
- Altikulaç, Turhan, Altuner, Şekeroğlu, and Kurnaz. (2025). Evaluation of Health Risks Associated with Potential Toxic Elements in Selected Vegetables Consumed in the Western Black Sea Region of Turkey. *ACS omega*, 10(9), 8843-8858 .
- Amer ,Sabry, Marrez, Hathout, and Fouzy. (2019). Exposure assessment of heavy metal residues in some Egyptian fruits. *Toxicology Reports*, 6, 538-543 .
- Anjum, Ashraf, Khan, Tanveer, Saleem, and Wang. (2016). Aluminum and chromium toxicity in maize: implications for agronomic attributes, net photosynthesis, physio-biochemical oscillations, and metal accumulation in different plant parts. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227, 1-14 .

- Astolfi, Zuchi, and Passera. (2005). Effect of cadmium on H⁺ ATPase activity of plasma membrane vesicles isolated from roots of different S-supplied maize (*Zea mays* L.) plants. *Plant Science*, 169(2), 361-368 .
- Bagdatlioglu, Nergiz, and Ergonul. (2010). Heavy metal levels in leafy vegetables and some selected fruits. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*, 5, 421-428 .
- Bahemuka, and Mubofu. (1999). Heavy metals in edible green vegetables grown along the sites of the Sinza and Msimbazi rivers in Dar es Salaam, Tanzania. *Food Chemistry*, 66(1), 63-66 .
- Balasaraswathi, Jayaveni, Sridevi, Sujatha, Aaron, and Rose. (2017). Cr-induced cellular injury and necrosis in Glycine max L.: Biochemical mechanism of oxidative damage in chloroplast. *Plant physiology and biochemistry*, 118, 653-666 .
- Barik, Rakhi Mol, Anand, Nandamol, Das ,and Porel. (2025). Environmental Pollutants Such as Endocrine Disruptors/Pesticides/Reactive Dyes and Inorganic Toxic Compounds Metals, Radionuclides, and Metalloids and Their Impact on the Ecosystem. In *Biotechnology for Environmental Sustainability* (pp. 391-442). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Beccaloni, Vanni, Beccaloni, and Carere. (2013). Concentrations of arsenic, cadmium, lead and zinc in homegrown vegetables and fruits: estimated intake by population in an industrialized area of Sardinia, Italy. *Microchemical Journal*, 107, 190-195.
- Bedassa, Abebaw, and Desalegn. (2017). Assessment of Selected Heavy Metals in Onion Bulb and Onion Leaf (*Allium cepa* L.). *Selected Areas of Central Rift Valley of Oromia Region Ethiopia. Journal of Horticulture*, 4(217), 2376-0354.1000217 .
- Bețianu, Cozma, and Gavrilescu. (2024). Human Health Hazards and Risks Generated by the Bioaccumulation of Lead from the Environment in the Food Chain. In *Lead Toxicity Mitigation: Sustainable Nexus Approaches* (pp. 73-123): Springer.
- Bharti, and Sharma .(2022). Effect of heavy metals: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 51, 880-885 .
- Bhattacharya, Samal, Majumdar, and Santra. (2010). Arsenic contamination in rice, wheat, pulses, and vegetables: a study in an arsenic affected area of West Bengal ,India. *Water, Air, & Soil Pollution*, 213, 3-13 .
- Bosque, Schuhmacher, Domingo, and Llobet. (1990). Concentrations of lead and cadmium in edible vegetables from Tarragona Province, Spain. *Science of The Total Environment*, 95, 61-67 .
- Bui, Nguyen, Nguyen, Tran, Vu, Nguyen, and Reynolds. (2016). Accumulation and potential health risks of cadmium, lead and arsenic in vegetables grown near mining sites in Northern Vietnam. *Environmental monitoring and assessment*, 188, 1-11 .
- Burzyński. (1987). The uptake and transpiration of water and the accumulation of lead by plants growing on lead chloride solutions. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 56(2), 271-280 .
- Calderon, García-Hernández, Palma, Leyva-Morales, Godoy, Zambrano-Soria, Bastidas-Bastidas, and Valenzuela. (2023). Heavy metals and metalloids in organic and conventional vegetables from Chile and Mexico: Implications for human health. *Journal of Food Composition and Analysis*, 123, 105527 .
- Čeryová, Lidiková, Šnirc, Harangozo, Pintér, Bobko, Bobková, Musilová, and Vollmannová. (2024). Heavy metals in onion (*Allium cepa* L.) and environmental and health risks. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 17(1), 66-76 .
- Chandra, and Kumar. (2017). Phytoextraction of heavy metals by potential native plants and their microscopic observation of root growing on stabilised distillery sludge as a prospective tool for in situ phytoremediation of industrial waste. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 2605-2619 .
- Cheraghi, Shahbazi, Fathi Gerdelidani, Bazargan ,Marzi, Hasheminasab Zavareh, and Beheshti. (2024). Investigation of nitrate status in agricultural products of Iran and criticism of published studies—a review study. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(11), 1779-1820. In Persian
- Codex. (1995). Codex General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed (CODEX STAN 193-1995). 1. PREAMBLE 1.1 SCOPE. [Available online at: <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius>]. In: Codex Alimentarius Commission.
- Codex. (2023). General standard for contaminants and toxins in food and feed. CXS 193-1995, Adopted in 1995, Revised in 1997, 2006, 2008, 2009, Amended in 2010, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2021, 2022, 2023. . In: Codex Alimentarius Commission (CAC).
- Czech, Malik, Sosnowska, and Domaradzki. (2021). Bioactive substances, heavy metals, and antioxidant activity in whole fruit, peel, and pulp of citrus fruits. *International Journal of Food Science*, 2021(1), 6662259 .
- Dala-Paula, Custódio, Knupp, Palmieri, Silva, and Glória.(2018). Cadmium, copper and lead levels in different



- cultivars of lettuce and soil from urban agriculture. *Environmental Pollution*, 242, 383-389 .
- Demirezen, and Aksoy. (2006). Heavy metal levels in vegetables in Turkey are within safe limits for Cu, Zn, Ni and exceeded for Cd and Pb. *Journal of food quality*, 29(3), 252-265 .
- Dziubanek, Baranowska, Ćwiela-Drabek, Spychała, Piekut, Rusin, and Hajok. (2017). Cadmium in edible plants from Silesia, Poland, and its implications for health risk in populations. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 142, 8-13 .
- Edelstein, and Ben-Hur. (2018). Heavy metals and metalloids: Sources, risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 234, 431-444 .
- Edirisinghe, and Jinadasa.(2019). Arsenic and cadmium concentrations in legumes and cereals grown in the North Central Province, Sri Lanka and assessment of their health risk. *International Journal of Food Contamination*, 6, 1-5 .
- EN-333. (2007). Commission Regulation (EC) No 333/2007 of 28 March 2007 laying down the methods of sampling and analysis for the official control of the levels of lead, cadmium, mercury, inorganic tin, 3-MCPD and benzo(a)pyrene in foodstuffs (Text with EEA relevance). [Available online at: European Union]. In: European Union.
- EN-915. (2023). Commission Regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No 1881/2006 (OJ L 119, 5.5.2023, pp. 103–157). [Available online: <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/maximum-levels-for-certain-contaminants-in-food.html?fromSummary=30>]. In: European Union
- EN-13804. (2002). Foodstuffs- Determination of trace elements-performance criteria, general consideration and sample preparation ,CEN, Rue de stassart 36, B-1050 Brussels. In.
- EN 1882. (2006). Commission Regulation (EC) No 1882/2006 of 19 December 2006 laying down methods of sampling and analysis for the official control of the levels of nitrates in certain foodstuffs. *Off J Eur Union*, 364, 32-43 .
- EN 13084. (2013). Foodstuffs–Determination of elements and their chemical species–General considerations and specific requirements .
- Erdal, and Turk. (2016). Cysteine-induced upregulation of nitrogen metabolism-related genes and enzyme activities enhance tolerance of maize seedlings to cadmium stress. *Environmental and Experimental Botany*, 132, 92-99 .
- Esposito, Picazio, Serpe, Lambiase, and Cerino. (2015). Content of cadmium and lead in vegetables and fruits grown in the Campania region of Italy. *Journal of Food Protection*, 78(9), 1760-1765 .
- EU-Commission. (2023). Commission regulation 2023/915 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing regulation no 1881/2006. In.
- Eun, Shik Youn, and Lee. (2000). Lead disturbs microtubule organization in the root meristem of Zea mays. *Physiologia Plantarum*, 110(3), 357-365 .
- European Commission. (2011). Commission Regulation (EU) No 836/2011 of 19 August 2011 amending Regulation (EC) No 333/2007 laying down the methods of sampling and analysis for the official control of the levels of lead, cadmium, mercury, inorganic tin, 3-MCPD and benzo (a) pyrene in foodstuffs. *Off J Eur Union*, 215, 9-16 .
- Fangmin, Ningchun, Haiming, Yi, Wenfang, Zhiwei, and Mingxue. (2006). Cadmium and lead contamination in japonica rice grains and its variation among the different locations in southeast China. *Science of the total environment*, 359(1-3), 156-166 .
- Feleafel, and Mirdad. (2013). Hazard and effects of pollution by lead on vegetable crops. *Journal of agricultural and environmental ethics*, 26, 547-567 .
- França, Albuquerqu, Almeida, Silveira, Crescêncio Filho, Hazin, and Honorato. (2017). Heavy metals deposited in the culture of lettuce (*Lactuca sativa* L.) by the influence of vehicular traffic in Pernambuco, Brazil. *Food chemistry*, 215, 171-176 .
- Frick, Järvå, Ekval, Uzdaviny, Nyblom, and Törnroth-Horsefield. (2013). Mercury increases water permeability of a plant aquaporin through a non-cysteine-related mechanism. *Biochemical Journal*, 454(3), 491-499 .
- Funk, Dammann, and Donnevert. (2007). Quality assurance in analytical chemistry: applications in environmental, food and materials analysis, biotechnology, and medical engineering: John Wiley & Sons.
- GB-2762. (2023). National Food Safety Standard for Maximum Levels of Contaminants in Foods, National standard of China. In. China.
- Ghori, Iftikhar, Bhatti, Sharma, Kazi, and Ahmad. (2016). Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soil. In *Plant metal interaction* (pp. 385-409): Elsevier.

- Giannakoula, Therios, and Chatzissavvidis. (2021). Effect of lead and copper on photosynthetic apparatus in citrus (*Citrus aurantium* L.) plants. The role of antioxidants in oxidative damage as a response to heavy metal stress. *Plants*, 10(1), 155 .
- Hadayat, De Oliveira, Da Silva, Han, Hussain, Liu, and Ma. (2018). Assessment of trace metals in five most-consumed vegetables in the US: Conventional vs. organic. *Environmental Pollution*, 243, 292-300 .
- Heitkemper, Kubachka, Halpin, Allen, and Shockey. (2009). Survey of total arsenic and arsenic speciation in US-produced rice as a reference point for evaluating change and future trends. *Food Additives and Contaminants*, 2(2), 112-120 .
- Heshmati, Mehri, Karami-Momtaz, and Khaneghah. (2020). Concentration and risk assessment of potentially toxic elements, lead and cadmium, in vegetables and cereals consumed in Western Iran. *Journal of food protection*, 83(1), 101-107 .
- Hou, Jia, Wang, McGrath, Zhu, Hu, Zhao, Bank, O'Connor, and Nriagu. (2025). Global soil pollution by toxic metals threatens agriculture and human health. *Science*, 388(6744), 316-321 .
- Hu, Huang, Tian, Holm, and Zhang. (2017). Heavy metals in intensive greenhouse vegetable production systems along Yellow Sea of China: Levels, transfer and health risk. *Chemosphere*, 167, 82-90 .
- Igwegbe, Agukwe, and Negbenebor. (2013). A survey of heavy metal (lead, cadmium and copper) contents of selected fruit and vegetable crops from Borno State of Nigeria. *Int. J. Eng. Sci*, 2(1), 01-05 .
- INSO-12968. (2021). Food and Feed-Maximum limit of heavy metals and test methods. 1st Revision. In (pp. 41). Iran: Iranian National Standardization Organization.
- INSO-12968. (2023). Food and Feed-Maximum limit of heavy metals and test methods. Amd No.1. Iran National Standards Organization. In: Iran: Iran National Standards Organization.
- INSO-17033. (2013). Foodstuffs-Methods of sampling for the official control of levels of heavy metal, 3-MCPD and benzo(α) pyrene- Code of practice. . In (Vol. ICS:67.020, pp. 9). Iran: Iranian National Standardization 1st. Edition Organization.
- ISIRI 13532. (2010). Foodstuffs –Cereals, vegetables and infants food- Methods of sampling for the nitrates analysis- Code of practice. *Institute of Standards and Industrial Research of Iran* .
- Israr ,Sahi, Datta, and Sarkar. (2006). Bioaccumulation and physiological effects of mercury in *Sesbania drummondii*. *Chemosphere*, 65(4), 591-598 .
- Jawad. (2010). The level of heavy metals in selected vegetables crops collected from Baghdad city markets .
- Jędrzejczak, and Ręczajska. (2022). Lead and cadmium content in wheat grain from different regions of Poland and risk analysis. *Journal of Water and Land Development* .
- Jomova, Alomar, Nepovimova, Kuca, and Valko. (2024). Heavy metals: toxicity and human health effects. *Archives of Toxicology*, 1-57 .
- Kaninga, Chishala, Maseka, Sakala, Lark, Tye, and Watts. (2020). mine tailings in an African tropical environment—mechanisms for the bioavailability of heavy metals in soils. *Environmental geochemistry and health*, 42, 1069-1094 .
- Karavoltos, Sakellari, Dimopoulos ,Dasenakis, and Scoullas. (2002). Cadmium content in foodstuffs from the Greek market. *Food Additives & Contaminants*, 19(10), 954-962 .
- Kaur, Singh, Batish, and Kohli. (2014). Pb-inhibited mitotic activity in onion roots involves DNA damage and disruption of oxidative metabolism. *Ecotoxicology*, 23, 1292-1304 .
- Klesta, Bartz, Sparks, Page, Helmke, and Loeppert. (1996). Quality assurance and quality control. *Methods of soil analysis. Part*, 3, 19-48 .
- Konotop, Kovalenko, Matušíková, Batsmanova, and Taran. (2017). Proline application triggers temporal redox imbalance, but alleviates cadmium stress in wheat seedlings. *Pak. J. Bot*, 49(6), 2145-2151 .
- Kowalska. (2021). The safety assessment of toxic metals in commonly used herbs, spices, tea, and coffee in Poland. *International journal of environmental research and public health*, 18(11), 5779 .
- Krejpcio, Sionkowski, and Bartela. (2005). Safety of fresh fruits and juices available on the Polish market as determined by heavy metal residues. *Polish journal of environmental studies*, 14(6), 877 .
- Lazović, Tomović, Vasiljević, Kecojević, Tomović, Martinović, Žugić Petrović, Danilović, Vujadinović, and Tomašević. (2022). Cadmium, lead, mercury, and arsenic in fresh fruits and fruit products intended for human consumption in the Republic of Serbia, 2015–2017. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 15(4), 283-291 .
- Li, Xie, Yue, Gong, Shao, Shang, and Wu. (2015). Inorganic arsenic contamination of rice from Chinese major rice-producing areas and exposure assessment in Chinese population. *Science China Chemistry*, 58, 1898-1905 .
- Liang, Gong, Li, Zuo, Pan, and Liu. (2019). Analysis of heavy metals in foodstuffs and an assessment of the



- health risks to the general public via consumption in Beijing, China. *International journal of environmental research and public health*, 16(6), 909 .
- Lien, Pan, and Ling. (2021). Levels of heavy metal cadmium in rice (*Oryza sativa* L.) produced in Taiwan and probabilistic risk assessment for the Taiwanese population. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(22), 28381-28390 .
- Liu, Xue, Meng, Zou, Gu, and Jiang. (2009). Pb/Cu effects on the organization of microtubule cytoskeleton in interphase and mitotic cells of *Allium sativum* L. *Plant cell reports*, 28, 695-702 .
- Lu, Dong, Deacon, Chen, Raab, and Meharg. (2010). Arsenic accumulation and phosphorus status in two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars surveyed from fields in South China. *Environmental Pollution*, 158(5), 1536-1541 .
- Luis, Rubio, González-Weller, Gutiérrez, Revert, and Hardisson. (2014). Evaluation of content and estimation of daily intake of cadmium and lead in several varieties of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) cultivated in the Canary Islands (Spain). *Journal of Food Protection*, 77(4), 659-664 .
- Mallick, Sinam, Mishra, and Sinha. (2010). Interactive effects of Cr and Fe treatments on plants growth, nutrition and oxidative status in *Zea mays* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73(5), 987-995 .
- Mansour, Belal, Abou-Arab, and Gad. (2009). Monitoring of pesticides and heavy metals in cucumber fruits produced from different farming systems. *Chemosphere*, 75(5), 601-609 .
- Mao, Tang, Ji, Renneberg, Hu, and Ma. (2021). Elevated CO₂ and soil mercury stress affect photosynthetic characteristics and mercury accumulation of rice. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111605 .
- Mawari, Kumar, Sarkar, Daga, Singh, Joshi, and Khan. (2022). Heavy metal accumulation in fruits and vegetables and human health risk assessment: findings from Maharashtra, India. *Environmental Health Insights*, 16, 11786302221119151 .
- Meharg, Adomako, Lawgali, Deacon, and Williams. (2007). Levels of arsenic in rice—literature review. *Food Standards Agency contract C*, 101045 .
- Meharg, Norton, Deacon, Williams, Adomako, Price, Zhu, Li, Zhao, and McGrath. (2013). Variation in rice cadmium related to human exposure. *Environmental Science & Technology*, 47(11), 5613-5618 .
- Meharg, Williams, Adomako, Lawgali, Deacon, Villada, Cambell, Sun, Zhu, and Feldmann. (2009). Geographical variation in total and inorganic arsenic content of polished (white) rice. *Environmental Science & Technology*, 43(5), 1612-1617 .
- Mesley, Pocklington, and Walker. (1991). Analytical quality assurance: a review. *Analyst (London. 1877. Print)*, 116(10), 975-990 .
- Mor, and Ceylan. (2008). Cadmium and lead contamination in vegetables collected from industrial, traffic and rural areas in Bursa Province, Turkey. *Food Additives and Contaminants*, 25(5), 611-615 .
- Nagajyoti, Lee, and Sreekanth. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental chemistry letters*, 8, 199-216 .
- Nie, Kuang, Li, Xu, Wang, Chen, Li, Zhao, Xie, and Zhao. (2016). Assessing the concentration and potential health risk of heavy metals in China's main deciduous fruits. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(7), 1645-1655 .
- Norton, Deacon, Mestrot, Feldmann, Jenkins, Baskaran, and Meharg. (2015). Cadmium and lead in vegetable and fruit produce selected from specific regional areas of the UK. *Science of The Total Environment*, 533, 520-527 .
- Norton, Williams, Adomako, Price, Zhu, Zhao, McGrath, Deacon, Villada, and Sommella. (2014). Lead in rice: analysis of baseline lead levels in market and field collected rice grains. *Science of the total environment*, 485, 428-434 .
- Oteef, Fawy, Abd-Rabboh, and Idris. (2015). Levels of zinc, copper, cadmium, and lead in fruits and vegetables grown and consumed in Aseer Region, Saudi Arabia. *Environmental monitoring and assessment*, 187, 1-11 .
- Pajević, Arsenov, Nikolić, Borišev, Orčić, Župunski, and Mimica-Dukić. (2018). Heavy metal accumulation in vegetable species and health risk assessment in Serbia. *Environmental monitoring and assessment*, 190, 1-14 .
- Pan, and Han. (2023). Distribution of cadmium in fresh vegetables marketed in Southeast China and its dietary exposure assessment. *Foods*, 12(6), 1204 .
- Panda. (2007). Chromium-mediated oxidative stress and ultrastructural changes in root cells of developing rice seedlings. *Journal of plant physiology*, 164(11), 1419-1428 .
- Pasricha, Mathur, Garg, Lenka, Verma, and Agarwal. (2021). Molecular mechanisms underlying heavy metal uptake, translocation and tolerance in hyperaccumulators-an analysis: Heavy metal tolerance in

- hyperaccumulators. *Environmental Challenges*, 4, 100197 .
- Pastorelli, Angeletti, Binato, Mariani, Cibin, Morelli, Ciardullo, and Stacchini. (2018). Exposure to cadmium through Italian rice (*Oryza sativa* L.): consumption and implications for human health. *Journal of Food Composition and Analysis*, 69, 115-121 .
- Pompa, D'Amore, Miedico, Preite, and Chiaravalle. (2021). Evaluation and dietary exposure assessment of selected toxic trace elements in durum wheat (*Triticum durum*) imported into the Italian market: Six years of official controls. *Foods*, 10(4), 775 .
- Quispe, Zanabria, Chavez, Cuadros, Carling, and Paredes. (2021). Health risk assessment of heavy metals (Hg, Pb, Cd, Cr and As) via consumption of vegetables cultured in agricultural sites in Arequipa, Peru. *Chemical Data Collections*, 33, 100723 .
- Radwan, and Salama. (2006). Market basket survey for some heavy metals in Egyptian fruits and vegetables. *Food and Chemical Toxicology*, 44(8), 1273-1278 .
- Rahman, Rahman, Reichman, Lim, and Naidu. (2014). Heavy metals in Australian grown and imported rice and vegetables on sale in Australia: health hazard. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 100, 53-60 .
- Rai, Lee, Zhang, Tsang, and Kim. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environment international*, 125, 365-385 .
- Reddy, Kumar, Jyothsnakumari, Thimmanaik, and Sudhakar. (2005). Lead induced changes in antioxidant metabolism of horsegram (*Macrotyloma uniflorum* (Lam.) Verdc.) and bengalgram (*Cicer arietinum* L.). *Chemosphere*, 60(1), 97-104 .
- Roel, Campos, Verger, Huertas, and Carracelas. (2022). Regional variability of arsenic content in Uruguayan polished rice. *Chemosphere*, 288, 132426 .
- Romero-Estévez, Yáñez-Jácome, Simbaña-Farinango, Vélez-Terreros, and Navarrete. (2020). Determination of cadmium and lead in tomato (*Solanum lycopersicum*) and lettuce (*Lactuca sativa*) consumed in Quito, Ecuador. *Toxicology Reports*, 7, 893-899 .
- Ross. (1994). Toxic metals in soil-plant systems.
- Rusin, Domagalska, Rogala, Razzaghi, and Szymala. (2021). Concentration of cadmium and lead in vegetables and fruits. *Scientific Reports*, 11(1), 11913 .
- Sadee, and Ali. (2023). Determination of heavy metals in edible vegetables and a human health risk assessment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 19, 100761 .
- Samardakiewicz, and Woźny. (2005). Cell division in Lemna minor roots treated with lead. *Aquatic Botany*, 83(4), 289-295 .
- Shahbazi, Hashemi-Nasab Zavareh, Tajaddodi Talab, Yeganeh, Beheshti, Zare, Bazargan, Marzi, Tavana-Mehr, and Haghtalab Kamachali. (2023). Assessment of heavy metals (cadmium, lead, and arsenic) and some nutrients in rice produced in Iran (in Persian). *Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO)*. In Persian
- Shahbazi, Naghipour, Kharazi, Baharloo Houreh, Beheshti, Marzi, Nourbakhsh, Khorsandi, Sohrabi, Esfandiaripour, Bazargan, Zare, Yeganeh, and Hashemi-Nasab Zavareh. (2020). Assessment of heavy metals (cadmium and lead) and some nutrients in wheat, flour and bread produced in Iran (in Persian). *Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO)*. In Persian
- Shahid, Dumat, Khalid, Schreck, Xiong, and Niazi. (2017). Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of hazardous materials*, 325, 36-58 .
- Shahid, Khalid, Abbas, Shahid, Nadeem, Sabir, Aslam, and Dumat. (2015). Heavy metal stress and crop productivity. *Crop production and global environmental issues*, 1-25 .
- Shi, Carey, Meharg, Williams, Signes-Pastor, Triwardhani, Pandiangan, Campbell, Elliott, and Marwa. (2020). Rice grain cadmium concentrations in the global supply-chain. *Exposure and Health*, 12(4), 869-876 .
- Singh, Batish, Kohli, and Arora. (2007). Arsenic-induced root growth inhibition in mung bean (*Phaseolus aureus* Roxb.) is due to oxidative stress resulting from enhanced lipid peroxidation. *Plant Growth Regulation*, 53, 65-73 .
- Skordas, Papastergios, and Filippidis. (2013). Major and trace element contents in apples from a cultivated area of central Greece. *Environmental monitoring and assessment*, 185, 8465-8471 .
- Sobhanardakani. (2019). Heavy metals health risk assessment through consumption of some foodstuffs marketed in city of Hamedan, Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 17(2), 175-183 .
- Strawn, Mohotti, Carp, Liang, Chen, Schroeder, and Marshall. (2022). Cadmium concentrations in Idaho wheat grain and soil. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 5(3), e20288 .



- Sweta, and Singh. (20۲۴). A review on heavy metal and metalloid contamination of vegetables: addressing the global safe food security concern. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 104(16), 4762-4783 .
- Tabatabaiee, Ansari, Eskandary, and Tabatabaiee. (2۰۱۷). Investigation of Lead and cadmium contamination in some of agricultural crops. *Journal of Environmental Science Studies*, 1(3), 69-77 .
- Tomno. (2022). Assessment of heavy metal contamination in water, soil and vegetables in two urban streams in machakos municipality Kenia.. (Doctoral dissertation, MksU Press).
- Tong, Yang, Gong, Wang, Li, Yu, Li, Deji, Nima, and Zhao. (2022). Bioaccumulation characteristics, transfer model of heavy metals in soil-crop system and health assessment in plateau region, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 241, 113733 .
- Tsukada, Hasegawa, Takeda, and Hisamatsu. (2007). Concentrations of major and trace elements in polished rice and paddy soils collected in Aomori, Japan. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 273(1), 199-203 .
- Vågsholm, Arzoomand, and Boqvist. (2020). Food security, safety, and sustainability—getting the trade-offs right. *Frontiers in sustainable food systems*, 4, 487217 .
- Violante, Cozzolino, Perelomov, Caporale, and Pigna. (2010). Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments. *Journal of soil science and plant nutrition*, 10(3), 268-292 .
- Wang, Zhang, Yan, Tang, Zhang, Bao, Gu, and Xiang. (2023). Heavy metal (loid) s in agriculture soils, rice, and wheat across China: Status assessment and spatiotemporal analysis. *Science of the total environment*, 163361 .
- Weldelessie, Naz, Singh, and Oves. (2018). Chemical contaminants for soil, air and aquatic ecosystem. *Modern age environmental problems and their remediation*, 1-22 .
- Yami ,Chandravanshi, Wondimu, and Abuye. (2016). Assessment of selected nutrients and toxic metals in fruits, soils and irrigation waters of Awara Melka and Nura Era farms, Ethiopia. *SpringerPlus*, 5, 1-12 .
- Yu, Pan, and Han. (2023). Toxic elements in beans from Zhejiang, Southeast China: Distribution and probabilistic health risk assessment. *Foods*, 12(17), 3300 .
- Zakaria, Zulkafflee, Mohd Redzuan, Selamat, Ismail, Praveena, Tóth, and Abdull Razis. (2021). Understanding potential heavy metal contamination, absorption, translocation and accumulation in rice and human health risks. *Plants*, 10(6), 1070 .
- Zang, Liu, and Li. (2025). Spatial distribution of cadmium and lead in wheat grains and their environmental driving factors in major grain-producing areas, China .*Ecological Indicators*, 175, 113589 .
- Zargari. (2021). Arsenic and Oxidative Stress: An Overview. *Arsenic Toxicity: Challenges and Solutions*, 27-63 .
- Zavala, Gerads, Gürleyük, and Duxbury. (2008). Arsenic in rice: II. Arsenic speciation in USA grain and implications for human health. *Environmental Science & Technology*, 42(10), 3861-3866 .
- Zhang, Watanabe, Shimbo, Higashikawa, and Ikeda. (1998). Lead and cadmium contents in cereals and pulses in north-eastern China. *Science of The Total Environment*, 220(2 .۱۳۷-۱۴۵), (۳-
- Zhang, Wu, Yang, Wang, Zhang, and Hu. (2017). Assessment of cadmium content of potato grown in Weining County, Guizhou Province, China. *Environmental monitoring and assessment*, 189, 1-8 .
- Zhang, Yang, Chen, Li, Peng, and Wen. (2019). Geographical origin discrimination of pepper (*Capsicum annuum* L.) based on multi-elemental concentrations combined with chemometrics. *Food Science and Biotechnology*, 28, 1627-1635 .
- Zhang, Yuan, Kong, and Yang. (2013). Genotype variations in cadmium and lead accumulations of leafy lettuce (*Lactuca sativa* L.) and screening for pollution-safe cultivars for food safety. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15(6), 1245-1255 .
- Zhang, Zhang, Li, Wang, Jiao, Wang, Jiang, and Gao. (2021). Occurrence and dietary exposure of heavy metals in marketed vegetables and fruits of Shandong Province, China. *Food Science & Nutrition*, 9(9), 5166-5173 .
- Zhou, Fan, and WANG. (2000). Heavy metal contamination in vegetables and their control in China. *Food Reviews International* .۲۳۹-۲۵۵, (۲)۱۶ ,
- Zhou, Yang, Zhou, Liu, Gu, Wang, Zou, Tian, Peng, and Liao. (2016). Accumulation of heavy metals in vegetable species planted in contaminated soils and the health risk assessment. *International journal of environmental research and public health*, 13(3), 289 .