

Research Article
Vol. 22, No. 4, Sep.-Oct. 2026, p. 331-348

Acrylamide in Espresso Coffee: Occurrence and Risk Assessment Study in Adolescents and Adults

Sh. Taghavi¹, M. Moeenfar^{1*}, R. Farhoosh¹

1- Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: moeenfar@um.ac.ir)

Received: 31.01.2026

Revised: 17.06.2026

Accepted: 27.06.2026

Available Online: 24.08.2026

How to cite this article:

Taghavi, Sh., Moeenfar, M., & Farhoosh, R. (2026). Acrylamide in espresso coffee: Occurrence and risk assessment study in adolescents and adults. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 22(4), 331-348. (In Persian).
<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.98206.1560>

Introduction

Coffee is one of the most widely consumed beverages worldwide, with an estimated annual intake of about 500 billion cups. Roasting is a key step in coffee processing that develops the desirable color, flavor, and aroma, but it also promotes the formation of acrylamide through the Maillard reaction. Acrylamide is classified as a probable human carcinogen and has attracted increasing attention due to its occurrence in a variety of heat-treated foods. Given the growing popularity of coffee among the Iranian population, determining acrylamide levels in espresso and assessing the associated health risks are of public health importance. Therefore, this study aimed to determine acrylamide levels in commercially available espresso coffees and assess the related cancer and non-cancer risks in adolescents and adults.

Materials and Methods

In this study, a total of 35 espresso coffee samples were collected from the market. Of these, 26 samples were obtained from coffee shops (ES-C), and 9 were prepared at home from commercial coffee powders using a household espresso machine (ES-H), following common local preparation practices. Acrylamide concentrations in all samples were determined using HPLC-DAD with a mobile phase composed of water/acetonitrile (97:3, v/v) at a flow rate of 0.7 mL/min and a detection wavelength of 202 nm. The average daily intake (ADI) of acrylamide ($\mu\text{g/kg}$ body weight/day) was estimated for adolescents and adults based on the measured acrylamide concentrations and the available consumption data. Health risk assessment was performed by calculating the margin of exposure (MOE) for carcinogenic effects, estimating the incremental lifetime cancer risk (ILCR), and evaluating the non-carcinogenic risk using the target hazard quotient (THQ). The obtained MOE values were compared with the reference value of 10,000. In addition, carcinogenic and non-carcinogenic risks were evaluated against internationally accepted benchmarks, including those established by the United States Environmental Protection Agency (USEPA).

Results and Discussion

Acrylamide was detected in all analyzed espresso samples. The concentration of acrylamide in ES-C ranged from 2.15 to 9.16 $\mu\text{g}/100$ mL and was consistently higher than that observed in ES-H, which ranged from 0.93 to 4.00 $\mu\text{g}/100$ mL. Despite the presence of acrylamide in all samples, the estimated dietary exposure via espresso consumption was relatively low. The EDI of acrylamide from espresso was calculated to be 0.004 $\mu\text{g/kg}$ bw/day for adolescents and 0.007 $\mu\text{g/kg}$ bw/day for adults. For all samples and both age groups, the MOE values were greater than 10,000, indicating a low level of concern and a low priority for risk management regarding



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.98206.1560>

carcinogenic effects. The incremental lifetime cancer risk attributed to acrylamide exposure from espresso consumption was estimated at 0.244×10^{-5} for adolescents and 0.221×10^{-5} for adults. Since both values were below the 10^{-5} benchmark proposed by the United States Environmental Protection Agency (USEPA), the associated carcinogenic risk was considered to be low. Non-carcinogenic risk indices were 0.0019 for adolescents and 0.0026 for adults, clearly below the threshold of 1, suggesting that non-cancer effects are unlikely at the observed exposure levels. For all evaluated parameters, acrylamide exposure and the associated health risks were higher in adults than in adolescents. This difference can be attributed to higher consumption rates and greater body weight-adjusted intake among adults.

Conclusion

This study shows that acrylamide was present in all espresso coffee samples collected from the market, with coffee shop espresso generally containing higher levels than household espresso coffees. Nevertheless, acrylamide exposure through espresso consumption alone does not appear to pose a serious health risk to the studied adolescent and adult populations. The high MOE values, low estimated cancer risks, and non-carcinogenic indices well below 1 collectively support a low level of concern. However, espresso is considered only one contributor to total dietary acrylamide intake, as acrylamide can also be formed in other thermally processed foods. Therefore, evaluation of combined exposure from various dietary sources and further investigation of cumulative health risks are recommended to provide a more comprehensive risk assessment.

Keywords: Acrylamide, Carcinogenicity, Coffee, Maillard reaction, Risk assessment

مقاله پژوهشی

جلد ۲۲، شماره ۴، مهر- آبان ۱۴۰۵، ص. ۳۴۸-۳۳۱

آکریل آمید در قهوه اسپرسو: تعیین غلظت و ارزیابی خطر دریافت آن در نوجوانان و بزرگسالان

شیمای تقوی^۱ - مرضیه معین فرد^{۱*} - رضا فرهوش^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۶

چکیده

قهوه با میانگین مصرف سالانه حدود ۵۰۰ میلیارد فنجان، یکی از محبوب‌ترین نوشیدنی‌ها در جهان است. فرآیند برشته‌کاری دانه‌های قهوه ضمن ایجاد ویژگی‌های حسی مطلوب، منجر به تشکیل آکریل آمید به‌عنوان یک ترکیب احتمالاً سرطان‌زا می‌شود. با توجه به افزایش مصرف قهوه در جامعه ایرانی، در این پژوهش محتوای آکریل آمید در ۳۵ نمونه قهوه اسپرسو شامل ۲۶ نمونه تهیه‌شده در کافی‌شاپ‌ها (ES-C) و ۹ نمونه تهیه‌شده با استفاده از اسپرسوساز خانگی (ES-H) اندازه‌گیری شد و سپس ارزیابی خطر دریافت آن در دو گروه سنی نوجوانان و بزرگسالان انجام گرفت. نتایج بیانگر حضور آکریل آمید در همه نمونه‌ها بود، با این حال، مقدار آن در ES-C (۹/۱۶-۲/۱۵ میکروگرم بر ۱۰۰ میلی‌لیتر) بیشتر از ES-H (۴/۰۰-۰/۹۳ میکروگرم بر ۱۰۰ میلی‌لیتر) گزارش شد. میانگین دریافت روزانه آکریل آمید در مجموع ۳۵ نمونه اسپرسو توسط نوجوانان و بزرگسالان به‌ترتیب ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۷ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز، بدست آمد. حاشیه مواجهه با خطر، در همه نمونه‌ها و برای هر دو گروه سنی، بیشتر از ۱۰۰۰۰ بود. بنابراین خطر قرار گرفتن در معرض آکریل آمید از طریق مصرف اسپرسو در جمعیت مورد مطالعه نگران‌کننده نبوده و با اولویت پایین برای مدیریت خطر شناخته می‌شود. خطر افزایش سرطان در نوجوانان و بزرگسالان به‌ترتیب $10^{-5} \times 0/244$ و $10^{-5} \times 0/221$ برآورد شد که هر دو از سطح اعلام‌شده توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست (10^{-5}) کمتر بودند. خطر غیرسرطان‌زایی در نوجوانان، ۰/۰۰۱۹ و در بزرگسالان، ۰/۰۰۲۶ بدست آمد که به مراتب کمتر از ۱ بود. در مجموع، نتایج نشان داد که دریافت آکریل آمید از طریق مصرف قهوه اسپرسو به‌تنهایی تهدید جدی برای سلامت جامعه هدف محسوب نمی‌شود و میزان مواجهه در بزرگسالان اندکی بیشتر از نوجوانان است. با این حال، مصرف اسپرسو می‌تواند دریافت کلی آکریل آمید را افزایش دهد. بنابراین بررسی همزمان دریافت آن از منابع غذایی مختلف و ارزیابی اثرات تجمعی آن بر سلامت جامعه ضروری است.

واژه‌های کلیدی: آکریل آمید، ارزیابی خطر، سرطان‌زایی، قهوه، واکنش مایلارد

مقدمه

انتخاب مواد خام، برشته کردن، شرایط نگهداری و روش‌های استخراج است که بر اساس مناطق جغرافیایی و عادات مصرف‌کننده بسیار متفاوت هستند (Schouten, Tappi, & Romani, 2020). الگوهای مصرف قهوه بین کشورهای مختلف نیز به‌طور قابل توجهی متفاوت است. به‌عنوان مثال، بزرگسالان در آمریکای شمالی معمولاً ۲ فنجان، و در بسیاری از مناطق اروپا حداقل ۴ فنجان در روز قهوه می‌نوشند. در

قهوه با میانگین مصرف سالانه ۵۰۰ میلیارد فنجان در سال یا ۹/۴ میلیون تن در سال، یکی از محبوب‌ترین نوشیدنی‌ها در جهان است (Taghizadeh, Azizi, Hassanpourfard, Rezaee, & Karimi, 2023). کیفیت کلی یک فنجان قهوه، که به ظاهر یک نوشیدنی "ساده" قلمداد می‌شود، نتیجه کنترل دقیق عوامل متعددی مانند

۱- گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: moeenfard@um.ac.ir)

بودند، اشاره کردند (Fan et al., 2023). تاکنون، چپیس و سیبزمینی سرخ شده (۵-۸۴۴۰ میکروگرم بر کیلوگرم نمونه)، قهوه و فرآورده‌های آن (۳۷-۱۱۳۹ میکروگرم بر کیلوگرم نمونه)، و فرآورده‌های پخت مانند نان، بیسکوئیت و غلات صبحانه (۱۰-۲۵۴۲ میکروگرم بر کیلوگرم نمونه) مهم‌ترین منابع دریافت آکریل‌آمید توسط افراد جامعه به شمار می‌روند (Sebastià et al., 2023; Yan et al., 2023). لازم به ذکر است که حضور آکریل‌آمید در غذاهای خام، آب پز (Yan et al., 2023)، و قهوه سبز (Bertuzzi, Martinelli, Mulazzi, & Rastelli, 2020) گزارش نشده است.

آکریل‌آمید بعد از بلع، اشتقاق و یا جذب از طریق پوست، به راحتی وارد جریان خون شده (Yan et al., 2023)، و در کبد بعد از تشکیل کانژوگ با گلوکاتینون، به گلیسیدآمید متابولیزه می‌شود که به راحتی در بافت‌های بدن بخش می‌گردد. به دنبال اتصال گلیسیدآمید با اسیدهای نوکلئیک یا پروتئین‌ها (مانند آنزیم‌ها) و تشکیل ترکیبات افزایشی^۵، آسیب‌های جدی مانند جهش‌زایی و تخریب سلولی رخ داده و خطر ابتلا به سرطان‌هایی مانند سرطان جداره رحم، تخمدان، پستان، کلیه، و لنفوم فولیکولار (نوعی سرطان خون) افزایش می‌یابد (Fan et al., 2025; Sharma et al., 2025; Zahir et al., 2025). بنابراین بر طبق مستندات آژانس بین‌المللی تحقیقات بر روی سرطان^۶، آکریل‌آمید به عنوان "سرطان‌زای احتمالی برای انسان" و در گروه 2A طبقه‌بندی شده است (Zahir et al., 2025). در اتحادیه اروپا، آکریل‌آمید به عنوان سرطان‌زا (Category 1B)، جهش‌زا (Category 1B) و سم دستگاه تولید مثل (Category 2, fertility) شناخته می‌شود (Eslamizad et al., 2019). اگرچه به منظور حفظ سلامت افراد جامعه، حداکثر مقدار مجاز دریافت آکریل‌آمید، یک میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز تعیین شده است (Yan et al., 2023)، اما در میان کشورهای اتحادیه اروپا، مقدار تخمینی که باعث بروز خطرات جدی برای سلامتی می‌شود، از ۰/۴ الی ۳/۴ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز گزارش شده است (Zahir et al., 2025). به طور کلی، قرارگیری در معرض این ترکیب از طریق رژیم غذایی برای نوزادان و کودکان ۱/۹ - ۵/۸ و برای افراد مسن ۰/۴ الی ۰/۹ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز تخمین زده شده است (EFSA, 2015; Fan et al., 2023).

تحلیل خطر^۷، فرآیندی است مشتمل بر سه مؤلفه ارزیابی خطر^۵، مدیریت خطر^۶ و ارتباط خطر^۷. مؤلفه اول، یعنی ارزیابی خطر، فرآیندی است جهت برآورد خطر برای یک موجود، سیستم یا (زیر)جامعه. ارزیابی خطر می‌تواند مربوط به مواجهات گذشته، حال یا مواجهات بالقوه در

میان کشورهای اروپایی نیز تفاوت‌ها قابل توجهی مشاهده می‌شود. به عنوان نمونه، میانگین و حداکثر مصرف قهوه در لهستان به ترتیب ۲۱۰ و ۱۴۵۰ میلی‌لیتر در روز، در دانمارک ۷۵۰ و ۱۸۰۰ میلی‌لیتر در روز، و در سوئد، حداکثر مصرف معادل ۲۸۲۹ میلی‌لیتر در روز گزارش شده است (Arisseto & Vicente, 2015). در خاورمیانه، چای همچنان رایج‌ترین نوشیدنی گرم به شمار می‌رود، اما به دلیل تغییر سبک زندگی، مصرف قهوه نیز رشد قابل توجهی داشته است (Malmir et al., 2019). در پژوهش‌های مرتبط با جامعه ایرانی، متوسط مصرف قهوه برای هر نفر معادل ۲ گرم در روز (Roudbari et al., 2021; Taghizadeh et al., 2023)، چای و سایر دمنوش‌های گیاهی نیز به ترتیب ۴ و ۲ گرم در روز گزارش شده است (Taghizadeh et al., 2023).

کنترل درجه برشته‌گی یکی از مهم‌ترین عوامل در تولید دانه‌های قهوه با کیفیت بالا محسوب می‌شود. برشته کردن یک فرآیند بسیار پیچیده، مشتمل بر انتقال جرم و انرژی است. طی واکنش مایلارد، تغییرات فیزیکی و شیمیایی متعددی در دانه قهوه رخ می‌دهد که در ایجاد ساختار، رنگ، عطر و طعم خاص قهوه دخیل هستند (Freitas et al., 2024). با این حال، ترکیبات مضر نیز طی واکنش مایلارد تولید می‌شوند که در این میان می‌توان به آکریل‌آمید اشاره کرد. آکریل‌آمید با فرمول شیمیایی $(CH_2=CH-CONH_2)$ یک آمید غیراشباع، کوچک، و محلول در آب (۲۰۴ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر در °C ۲۵) است. این ترکیب به صورت جامد سفید رنگ، با نقطه ذوب °C ۸۴/۵ و نقطه جوش °C ۱۹۲/۶ و فشار بخار پایین (۰/۰۰۷ میلی‌لیتر جیوه در °C ۲۵) یافت می‌شود (PubChem, 2023). افراد جامعه از طرق مختلف در معرض آکریل‌آمید قرار می‌گیرند که از این میان می‌توان به رژیم غذایی، سیگار، آب آشامیدنی، حرفه و شغل اشاره کرد (Zahir, Ge, & Khan, 2025). در صنعت غذا، آکریل‌آمید از طریق واکنش بین گروه‌های آمینه آزاد (عمدتاً از اسپاراژین) و ترکیبات کربونیلی (منشأ گرفته از قندهای احیاکننده، فرآورده‌های حاصل از هیدرولیز روغن مانند دی‌کربونیل‌ها، آکرولین و اسیدآکریلیک) در دمای بالاتر از °C ۱۲۰ و طی فرآیندهایی مانند سرخ کردن، گریل کردن، تست کردن، و برشته کردن تشکیل می‌شود (Khaloo Kermani, Moenfar, Farhoosh, & Alves, 2023; Sebastião et al., 2023). محققان سازمان ملی غذایی سوئد (SNFA) و دانشگاه استکهلم در سال ۲۰۰۲، برای اولین بار به حضور مقادیر قابل توجه آکریل‌آمید در مواد غذایی نشاسته‌دار که تحت تیمار حرارتی قرار گرفته

5- Risk assessment
6- Risk management
7- Risk communication

1- Swedish National Food Administration (SNFA)
2 Adducts
3- International Agency for Research on Cancer (IARC)
4- Risk analysis

مواد و روش‌ها

مواد شیمیایی

استاندارد آکریل آمید، آمین‌های اول و دوم (PSA)^۳ و اکتادسیل سیلان (C18)^۴ با خلوص ۹۹/۹ درصد از شرکت سیگما فراهم شدند. استات روی بدون آب، پتاسیم هگزاسیانوفرات (II) و اسید استیک گلاسیال از شرکت مرک (آلمان) خریداری شدند. حلال‌های مورد استفاده همگی درجه کروماتوگرافی داشته و شامل استونیتریل، هگزان (مرک، آلمان)، و آب (شارلو، اسپانیا) بودند. فیلتر سرسرنگی PVDF^۵ (قطر ۲/۵ سانتی‌متر، حفرات ۰/۴۵ میکرومتر) از شرکت Membrane Solution (آمریکا) فراهم شدند. ستون با تعادل آب‌دوستی و چربی‌دوستی^۶ (Oasis® HLB: ۲۰۰ میلی‌گرم، ۶ میلی‌لیتر) از Waters Corporation (ایرلند) تهیه شدند. آب دیونیزه با هدایت الکتریکی ۰/۷-۱/۳ میکروزیمنس (بتاژن) جهت تهیه محلول‌های استاندارد و نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

تهیه نمونه‌های قهوه

در این پژوهش ۲ گروه قهوه اسپرسو مورد آزمون قرار گرفتند: (الف) قهوه‌های اسپرسو تهیه شده از کافی شاپ‌های مختلف در سطح شهر (۲۶ نمونه، ES-C^۶)، (ب) قهوه‌های اسپرسو تهیه شده از انواع پودرهای قهوه خریداری شده از شرکت‌های معتبر داخلی و خارجی (۹ نمونه، ES-H^۷) برای این منظور از اسپرسو ساز De'Longhi مدل EC685 استفاده شد. اسپرسوهای خانگی با حجم ۵۰±۵ میلی‌لیتر با ۷/۵±۰/۵ گرم پودر قهوه و تحت فشار ۱۵ بار تهیه شدند. مشخصات انواع قهوه مورد استفاد در این پژوهش تا حد ممکن جمع‌آوری شده و در جدول ۱، نشان داده شده است.

استخراج آکریل آمید

برای این منظور از روش دریو و همکاران (Deribew & Woldegiorgis, 2021) با کمی اصلاحات استفاده شد. در ابتدا، ۵ میلی‌لیتر از قهوه اسپرسوی سانتیفریوژ شده دو بار متوالی توسط ۲/۵ میلی‌لیتر هگزان تا حدی چربی‌زدایی شد. فاز چربی‌زدایی شده با یک میلی‌لیتر کاریز ۱ (۱۰/۶ گرم پتاسیم هگزاسیانوفرات (II) با آب مقطر به حجم ۱۰۰ رسیده) و یک میلی‌لیتر محلول کاریز ۲ (۲۱/۹ گرم استات روی با ۲ میلی‌لیتر استیک اسید گلاسیال ترکیب شد و با آب مقطر به حجم ۱۰۰ رسیده) مخلوط شده و بعد از ۵ دقیقه سکون، سانتیفریوژ (۵

آینده باشد. همچنین می‌تواند ماهیت کیفی و یا کمی داشته باشد و معمولاً به جهت حفظ سلامت عموم، به نحوی تخمین زده می‌شود که از کم‌برآورد کردن خطر واقعی اجتناب شود. به عبارت دیگر مقدار خطر بیان شده معمولاً از مقدار واقعی بیشتر است (Kashani, Gharibzadeh, Nakhjirgan, Younesian, & Zaeim, 2021; Karami, Akbari-Adergani, Jahed, Khaniki, Shariatifar, & Sadighara, 2022). در پژوهشی ارزیابی خطر را برای سطوح آکریل آمید در انواع قهوه فوری (پودر خالص یا کافی میکس) موجود در بازار تهران برای افراد بزرگسال مورد بررسی قرار دادند. میانگین دریافت آکریل آمید از کافی میکس ۰/۰۰۰۸۴۵ و برای پودر خالص قهوه فوری معادل ۰/۰۰۰۸۱۵ (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) بدست آمد که بسیار اندک بود. متعاقباً میزان حاشیه مواجهه با خطر (MOE)^۱ برای پودر خالص و کافی میکس به ترتیب ۱۰^۵ × ۵ و ۱۰^۴ × ۵/۲ بدست آمد که به مراتب از ۱۰^۴ بیشتر بود. بنابراین مصرف این محصولات خطری را از جهت قرارگرفتن در معرض آکریل آمید ایجاد نمی‌کند (Karami et al., 2022).

علی‌رغم مواجهه اجتناب‌ناپذیر جمعیت با آکریل آمید از طریق رژیم غذایی، تاکنون حد مجاز مشخص و یکپارچه‌ای برای میزان این ترکیب در اغلب مواد غذایی و نوشیدنی‌ها تعیین نشده است، به استثنای آب آشامیدنی، که مقدار آکریل آمید در آن نباید از ۰/۱ میکروگرم در لیتر تجاوز کند (Xu et al., 2014). با توجه به طبقه‌بندی آکریل آمید به‌عنوان ترکیبی با پتانسیل سرطان‌زایی، ارزیابی خطر آن عمدتاً بر پیامدهای سرطان‌زایی متمرکز است. با این حال، اگرچه سطوح بالای دریافت، احتمال ظهور علائم ذکر شده در بخش‌های قبل را افزایش می‌دهد، اما بروز اثرات نامطلوب سلامت به عوامل دیگری نظیر مدت‌زمان مواجهه، الگوی کلی رژیم غذایی و روش‌های فرآوری و پخت مواد غذایی نیز وابسته است. از این رو، برآورد دقیق نقش آکریل آمید در بروز سرطان در جمعیت‌های مختلف با عدم قطعیت قابل توجهی همراه است (Garg & Singla, 2025)، و در نتیجه، مطالعات ارزیابی خطر اغلب به‌صورت موردی و وابسته به الگوی مصرف هر جامعه انجام می‌شوند. با توجه به افزایش چشمگیر مصرف قهوه در جامعه ایرانی و پیامدهای بالقوه آکریل آمید بر سلامت مصرف‌کنندگان، در این پژوهش غلظت آکریل آمید در ۳۵ نمونه قهوه جمع‌آوری شده از کافی شاپ‌ها و فروشگاه‌های سطح شهر اندازه‌گیری و متعاقب آن، ارزیابی خطر ناشی از مصرف این نوشیدنی مورد بررسی قرار گرفت.

5- Hydrophilic-Lipophilic Balance (HLB) cartridge

6- Espresso coffee- Coffee shop

7- Espresso coffee- Household espresso machine

1- Margins of Exposure (MOE)

2- Primary and secondary amine (PSA)

3- C18-octadecylsilane (C18)

4- Polyvinylidene fluoride (PVDF)

از ستون خارج شدند، دور ریخته شد و مابقی جمع‌آوری گردید. جهت خالص‌سازی بیشتر، ۲ میلی‌لیتر عصاره پاک‌سازی شده با ۱۰۰ میلی‌گرم PSA و ۵۰ میلی‌گرم C18 مخلوط و سپس سانتریفیوژ شد. عصاره تمیز نهایی بعد از عبور از فیلتر سرسرنگی PVDF به HPLC-PDA تزریق شد.

دقیقه، ۵۰۰۰ دور بر دقیقه) گردید. به فاز شفاف میانی، مجدداً هگزان و محلول‌های کاریز اضافه شده و این فرآیند تکرار گردید. لایه میانی جهت خالص‌سازی بیشتر، از ستون HLB عبور داده شد. جهت آماده‌سازی ستون، به‌ترتیب ۳/۵ میلی‌لیتر متانول و ۳/۵ میلی‌لیتر آب با خلوص کروماتوگرافی از کارتریج عبور داده شد. بعد از تخلیه کامل، ۳ میلی‌لیتر فاز شفاف بالای ستون قرار گرفت. ۴ الی ۵ قطره ابتدایی که

جدول ۱- مشخصات قهوه‌های مورد استفاده برای تهیه نمونه‌های اسپرسو در این پژوهش

Table 1- General description of ground coffees used for preparation of espresso coffee brews in the present study

کد نمونه Sample code	واریت قهوه Coffee variety	محل کاشت Origin	درجه برشته‌گی Roasting degree
نمونه‌های جمع‌آوری شده از کافی شاپ‌ها (ES-C) *Samples from coffee shop (ES-C)			
1	عربیکا (۶۰٪) / روبوستا (۴۰٪) Arabica (40%) / Robusta (60%)	برزیل / ویتنام Brazil/Vietnam	متوسط Medium
2	-	-	-
3	روبوستا (۱۰۰٪) Robusta (100%)	هند / اتیوپی / اندونزی India/Ethiopia/Indonesia	تیره Dark
4	-	-	-
5	-	-	-
6	عربیکا (۷۰٪) / روبوستا (۳۰٪) Arabica (70%) / Robusta (30%)	عربیکا (اتیوپی) / روبوستا (اندونزی) Arabica (Ethiopia) / Robusta (Indonesia)	متوسط Medium
7	عربیکا (۱۰۰٪) Arabica (100%)	کلمبیا Colombia	متوسط Medium
8	-	-	-
9	-	-	-
10	-	-	متوسط تا تیره Medium to dark
11	عربیکا (۷۰٪) / روبوستا (۳۰٪) Arabica (70%) / Robusta (30%)	کلمبیا / هند Colombia / India	متوسط Medium
12	عربیکا (۷۰٪) / روبوستا (۳۰٪) Arabica (70%) / Robusta (30%)	کلمبیا / اتیوپی Colombia / Ethiopia	-
13	عربیکا (۱۰۰٪) Arabica (100%)	برزیل Brazil	متوسط Medium
14	-	-	-
15	-	-	-
16	عربیکا (۴۰٪) / روبوستا (۶۰٪) Arabica (40%) / Robusta (60%)	عربیکا (برزیل) / روبوستا (ویتنام) Arabica (Brazil) / Robusta (Vietnam)	متوسط تا تیره Medium to dark
17	-	-	-
18	-	-	-
19	-	-	-
20	عربیکا (۸۰٪) / روبوستا (۲۰٪) Arabica (80%) / Robusta (20%)	عربیکا (برزیل) / روبوستا (ویتنام) Arabica (Brazil) / Robusta (Vietnam)	متوسط Medium
21	-	-	-
22	-	-	-
23	-	-	-
24	-	-	-
25	عربیکا و روبوستا Arabica & Robusta	کلمبیا / اندونزی Colombia / Indonesia	-
26	عربیکا (۱۰۰٪) Arabica (100%)	-	متوسط Medium

نمونه‌های تهیه شده توسط اسپرسوساز خانگی (ES-H)
Samples prepared using household espresso machine (ES-H) **

27	عربیکا و روبوستا Arabica & Robusta	-	متوسط تا تیره Medium to dark
28	عربیکا (۱۰۰٪) Arabica (100%)	اتیوپی Ethiopia	متوسط تا تیره Medium to dark
29	عربیکا (۱۰۰٪) Arabica (100%)	-	تیره Dark
30	عربیکا (۱۰۰٪) Arabica (100%)	-	متوسط Medium
31	عربیکا و روبوستا Arabica & Robusta	-	متوسط تا تیره Medium to dark
32	عربیکا (۱۰۰٪) Arabica (100%)	-	متوسط Medium
33	عربیکا و روبوستا Arabica & Robusta	-	-
34	عربیکا (۱۰۰٪) Arabica (100%)	-	روشن Light
35	عربیکا و روبوستا Arabica & Robusta	-	متوسط Medium

* اطلاعات تا حد ممکن از مسئولین کافی‌شاپ‌ها جمع‌آوری شدند. ** اطلاعات تا حد ممکن از اطلاعات روی بسته‌بندی قهوه‌های خریداری شده جمع‌آوری شد.

*Information was collected from coffee shops. **Information was collected from labels of packaging

تعیین مقدار آکريل آميد به روش کروماتوگرافی

برای این منظور از HPLC (KNAUER، آلمان)، به طریق فاز معکوس با کمک ستون Eurospher 100-5 C18، با طول ۲۵۰ و قطر ۴/۶ میلی‌متر انجام شد. دستگاه کروماتوگرافی مجهز به پمپ (Smartline Pump 1000)، سمپلر اتومات (Smartline) (Autosampler 3900) و آشکارساز فرابنفش-مرئی (PDA) (Detector 2800) بود. فاز متحرک شامل ترکیب آب (۹۷٪) - استونیتریل (۳٪) با سرعت ۰/۷ میلی‌لیتر بر دقیقه بود. ۲۰ میکرولیتر از نمونه (عصاره تمیز شده یا محلول‌های استاندارد) به ستون در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، تزریق گردید و شناسایی آکريل آميد در طول موج ۲۰۲ نانومتر انجام گرفت. پردازش داده‌های کروماتوگرافی نیز با نرم‌افزار EZChrom Elite انجام شد. جهت تعیین مقدار آنالیت در نمونه مجهول از روش استاندارد خارجی و رسم منحنی کالیبراسیون در محدوده غلظتی ۳۰-۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر آب استفاده شد. شناسایی آکريل آميد در نمونه‌های مجهول با مقایسه زمان بازداری و طیف آکريل آميد در نمونه مجهول و محلول استاندارد صورت گرفت.

اعتبارسنجی روش کروماتوگرافی

روش بهینه کروماتوگرافی، با در نظر گرفتن پارامترهای ضریب تعیین (R^2)، صحت (درصد بازیابی)، حداقل مقدار تشخیص (LOD) و

حداقل مقدار اندازه‌گیری (LOQ) اعتبار سنجی شد. جهت محاسبه مقادیر LOD و LOQ از معادله (۱) استفاده شد. در این معادله، S/N نسبت سیگنال به نویز (برای LOD معادل ۳ و برای LOQ معادل ۱۰)، C غلظت نمونه، N مقدار نویز زمان شناسایی نمونه شاهد و H ارتفاع سیگنال در زمان شناسایی نمونه می‌باشد (Khaloo Kermani et al., 2023).

$$LOD, LOQ = \frac{C \times S/N \times N}{H} \quad (1)$$

بررسی ارزیابی خطر

تخمین دریافت روزانه آکريل آميد (EDI) از طریق مصرف

قهوه اسپرسو

نعمت الهی و همکاران (Nematollahi et al., 2020)، مصرف قهوه (گرم/روز) در گروه‌های سنی متفاوت در جامعه ایرانی را به صورت $1/70 \pm 0/47$ در کودکان (۱۰-۳ سال)، $2/03 \pm 0/85$ در نوجوانان (۱۱-۱۷ سال)، $4/63 \pm 1/79$ در بزرگسالان (۶۰-۱۶ سال) و $2/68 \pm 0/66$ در افراد مسن (۹۶-۶۱ سال) گزارش کردند. در نتیجه مقادیر $0/85$ و 2 گرم در روز به ترتیب برای نوجوانان و بزرگسالان در پژوهش حاضر نیز مورد استفاده قرار گرفت (Karami et al., 2022; Nematollahi et al., 2020). میانگین وزن یک نوجوان (۱۱ الی ۱۷

BMDL₁₀های ۱۷۰، ۳۱۰ و ۴۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز، مورد استفاده قرار گرفتند.

$$MOE = \frac{BMDL_{10}}{EDI} \quad (3)$$

تخمین خطر افزایش سرطان در طول عمر

خطر افزایش سرطان در طول عمر به دلیل دریافت آکریل آمید از طریق رژیم غذایی (در اینجا مصرف قهوه) که توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده^۷ (USEPA) پیشنهاد شده است، بر اساس معادله (۴) محاسبه شد. در این معادله،^۸ ILCR (پارامتر بدون بعد) احتمال افزایش سرطان در طول زندگی یک فرد را بیان می کند. پارامتر C_i مقدار آکریل آمید در ماده غذایی i ($\mu\text{g/kg}$)، IR_i میزان مصرف ماده غذایی i در هر گروه سنی (g/day)، ED^9 زمان قرار گرفتن در معرض آکریل آمید (بر حسب سال، برای نوجوانان ۷ و برای بزرگسالان ۴۳ سال)، EF^{10} تناوب قرار گرفتن در معرض آکریل آمید (۳۶۵ روز در سال)، SF^{11} عامل شیب آکریل آمید ($(\text{mg/kg/day})^{-1} \cdot 0.5$)، CF^{12} فاکتور تصحیح ($10^{-6} \text{ mg}/\mu\text{g}$)، $ADAF^{13}$ ضریب تعدیل وابسته به سن (برای ۳ تا ۱۵ سال ۳ و برای سنین بیشتر از ۱۶ سال ۱ در نظر گرفته می شود)، bw وزن هر فرد در گروه سنی مورد نظر (kg) و AT^{14} میانگین زمان برای سرطان زایی مواد (۲۵۵۵۰ روز بر مبنای سن ۷۰ سال و ۶۰۲۵ روز بر مبنای سن ۱۷ سال) می باشد (Nematollahi et al., 2020).

$$ILRC = \frac{C_i \times IR_i \times ED \times EF \times SF \times CF \times ADAF}{BW \times AT} \quad (4)$$

تخمین خطر غیرسرطان زایی

ضریب خطر هدف^{۱۵} (THQ) به منظور تخمین خطر غیر سرطان زایی به هنگام دریافت آکریل آمید از ماده غذایی i به کمک معادله (۵) محاسبه شد که در آن THQ، ضریب خطر هدف و یک پارامتر بدون بعد است. EDI، میزان دریافت آکریل آمید از طریق ماده

در حدود ۶۰ کیلوگرم و بزرگسال (۱۸ الی ۶۰ سال) نیز ۷۵ کیلوگرم در نظر گرفته شد (Nematollahi et al., 2020). بر این اساس، مقدار تخمینی دریافت روزانه آکریل آمید ($\mu\text{g/kg bw/day}$) از طریق نوشیدن قهوه اسپرسو برای هر گروه سنی از روی معادله (۲) محاسبه گردید، که در آن C_i ، مقدار آکریل آمید در ماده غذایی i ($\mu\text{g/kg}$)، IR_i میزان مصرف ماده غذایی i (g/day)، و bw وزن بدن هر فرد (kg) بر اساس گروه های سنی است (Nematollahi et al., 2020).

Estimated Daily Intake (EDI)

$$= \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times IR_i}{bw \times 1000} \quad (2)$$

تخمین مواجهه با خطر آکریل آمید

برای ارزیابی میزان خطر آکریل آمید دریافت شده از رژیم غذایی، اولین مرحله تعیین حاشیه مواجهه با خطر آکریل آمید^۱ (MOE) است که برای گروه های سنی از طریق معادله (۳) محاسبه شد. در این معادله، MOE حاشیه مواجهه با خطر آکریل آمید (بدون بعد)، BMDL₁₀ حد اطمینان پایین دوز محک^۲ ($\mu\text{g/kg bw/day}$) و EDI مقدار تخمینی دریافت روزانه آکریل آمید از طریق مصرف ماده غذایی i ($\mu\text{g/kg bw/day}$) است (Nematollahi et al., 2020). برای تخمین اثر سرطان زایی آکریل آمید، کمیته مشترک FAO/WHO درباره افزودنی های غذایی^۳ (JECFA) دو مقدار متفاوت از حد اطمینان پایین دوز محک یا همان BMDL₁₀ را برای آکریل آمید پیشنهاد کرده اند: (الف) ۳۱۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز برای شروع تومورهای پستانی در موش های صحرایی ماده، و (ب) ۱۸۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز برای بروز تومورهای غده هاردیرین^۴ در موش. این درحالی است که مرجع ایمنی غذایی اروپا^۵ (EFSA)، مقدار ۱۷۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز را برای بروز پیامدهای نئوپلاستیک^۶ و ۴۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز را برای سمیت عصبی در موش صحرایی تعیین کرده است. در این پژوهش،

7 - United States Environmental Protection Agency (USEPA)

8- Incremental lifetime cancer risk (ILCR)

9- Exposure duration (ED)

10- Exposure frequency (EF)

11- Slope factor of acrylamide (SF)

12- Correction factor (CF)

13- Age-dependent adjustment factor (ADAF)

14- Average time (AT)

15- Target hazard quotient (THQ)

1- Margins of Exposure (MOE)

2 - Benchmark dose lower confidence limit 10 (BMDL10)

3- Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additive (JECFA)

4- Harderian gland

5- European Food Safety Authority (EFSA)

۶- فرآیند نئوپلاستیک معمولاً به مجموعه ای از جهش های سوماتیک در ژن های خاص اطلاق می شود که متعاقباً باعث ایجاد تومور می شوند. به عبارت دیگر نئوپلاسم رشد غیر طبیعی بافتی است که می تواند خوش خیم (غیر سرطانی) یا بدخیم (سرطانی) باشد.

بالا تر در اسپرسوسازهای تجاری باشد که منجر به استخراج طیف وسیعی از ترکیبات خواهد شد.

نتایج اعتبارسنجی که در جدول ۲ نشان داده شده است، بیانگر پاسخ خطی در محدوده غلظتی ۲۵-۳۰۰۰ میکروگرم بر لیتر با ضریب تعیین ۰/۹۹۷ بود. تکرارپذیری داده‌ها قابل قبول بوده و ضریب تغییرات طی سه روز متوالی کمتر از ۴ درصد (۳/۵۹-۰/۶۵ درصد) به دست آمد. مقادیر LOD و LOQ به ترتیب ۹/۱۹ و ۳۰/۶۲ میکروگرم بر لیتر محاسبه شدند. به مقادیر ۵ و ۲۰/۴ میکروگرم بر کیلوگرم از طریق HPLC-DAD (Endshaw & Belay, 2020)، ۶ و ۲۳ میکروگرم بر کیلوگرم از طریق SPE-HPLC-UV (Haiyan Wang, 2008) و محدوده ۳/۶-۴/۳ و ۱۲/۱-۱۴/۳ توسط HPLC-UV (Oroian,) (Amariei, & Gutt, 2015) به ترتیب برای LOD و LOQ در منابع اشاره شده است. درصد بازیابی از نمونه قهوه ۱۰۰ درصد عربیکا با درجه برشتگی متوسط ۱/۵ ± ۹۲ بدست آمد. کارایی انواع روش‌های آنالیز به شکل قابل توجهی به روش استخراج و آنالیز بستگی دارد. در یک مقاله مروری جامع (Sebastià et al., 2023)، انواع روش‌های استخراج و آنالیز آکریل آمید مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی‌ها نشان دادند که درصد بازیابی آکریل آمید در بین مقالات مورد مطالعه از ۷۰ تا ۱۰۹ درصد متغیر بود.

مقدار آکریل آمید در قهوه‌های اسپرسو

مقدار آکریل آمید نمونه‌ها در شکل ۲ خلاصه شده که نشان‌دهنده تنوع محتوای آکریل آمید در اسپرسوهای مورد مطالعه می‌باشد. مقدار میانگین در ۳۵ نمونه ۲/۱۱ ± ۴/۰۶ میکروگرم بر ۱۰۰ میلی‌لیتر گزارش شد. با این حال، طیف تغییرات غلظت آکریل آمید در ES-C گسترده‌تر از ES-H بود. این مقدار در ES-C از ۰/۱۱ ± ۲/۱۵ تا ۰/۴۵ ± ۹/۱۶ میکروگرم بر ۱۰۰ میلی‌لیتر و در ES-H از ۰/۰۵ ± ۰/۹۳ تا ۰/۱۱ ± ۴/۰۰ میکروگرم بر ۱۰۰ میلی‌لیتر بدست آمد. با توجه به اینکه مقادیر بالای آکریل آمید می‌تواند خطر سرطان‌زایی را افزایش دهد، تنها درصدی از نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق، در محدوده خطر قرار می‌گیرند که در بخش‌های بعدی به آن خواهیم پرداخت. اگرچه، روش دم کردن قهوه بر غلظت آکریل آمید در قهوه تأثیر قابل توجهی دارد، با این حال، مقادیر حاصل از این پژوهش با سایر گزارش‌ها همخوانی داشت. در مقالات به مقادیر ۵/۸ - ۲/۷ و ۴/۹ - ۲/۴ میکروگرم بر ۱۰۰ میلی‌لیتر به ترتیب برای اسپرسوهای کافئین دار و بدون کافئین پودرهای تجاری موجود در بازار (Alves, Soares, Casal,) (Fernandes, & Oliveira, 2010)، ۴/۰ - ۰/۷۷ میکروگرم بر ۱۰۰

غذایی i ($\mu\text{g/kg bw/day}$) و RFD^1 دوز مرجع خوراکی آکریل آمید یا به عبارتی "مصرف روزانه قابل تحمل" (TDI^2) آن ترکیب است. JECFA مقدار RFD را برای آکریل آمید در ۱ الی ۴ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز تعیین کرده است که در این مطالعه مقدار متوسط ۲ ($\mu\text{g/kg bw/day}$) در نظر گرفته شد. اگر THQ بیشتر از یک باشد، بیانگر وجود یک خطر بالقوه و غیرقابل قبول برای سلامت جامعه انسانی مورد مطالعه است (Aghvami et al., 2023; Karami et al., 2022).

$$\text{THQ} = \frac{\text{EDI}}{\text{RFD}} \quad (5)$$

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

استخراج تمامی نمونه‌ها در دو تکرار انجام شده و نتایج به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار بیان شدند. نتایج مورد تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) قرار گرفته و مقایسه میان میانگین داده‌های آزمایشی با آزمون دانکن در سطح اطمینان ۵ درصد ($p < 0.05$) انجام پذیرفت. نتایج با نرم‌افزار Minitab آنالیز و نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel ترسیم شدند.

نتایج و بحث

اعتبارسنجی روش کروماتوگرافی

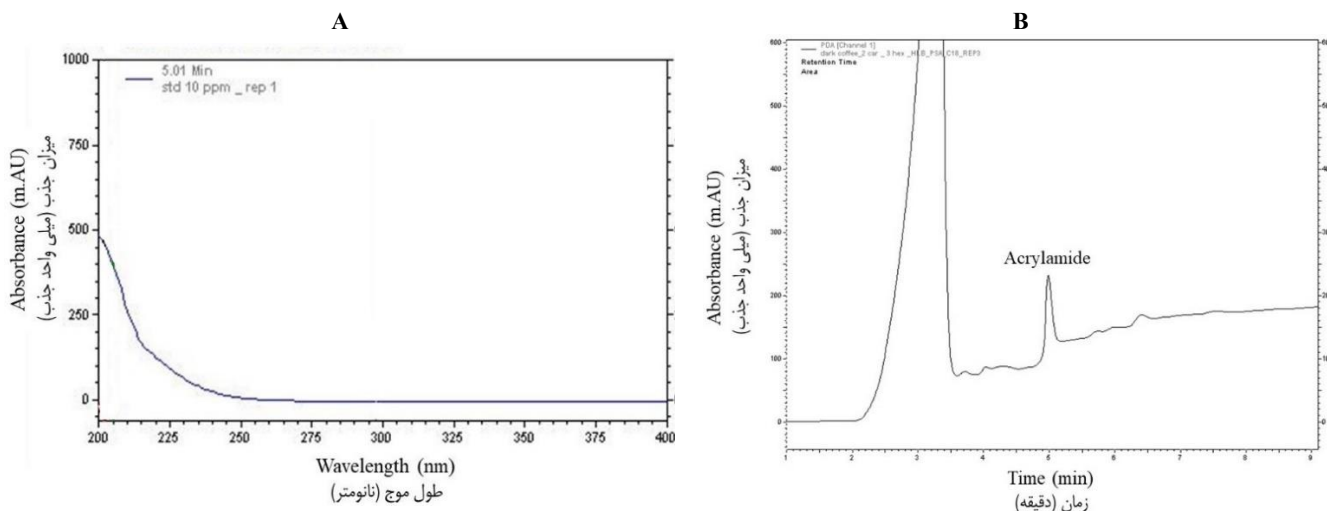
ترکیب حلال به منظور شناسایی آکریل آمید موجود در قهوه با نسبت آب (۹۷٪) / استونیتریل (۳٪) و سرعت ۰/۷ میلی‌لیتر بر دقیقه در ۲۰۲ نانومتر (شکل ۱-۱A)، منجر به تفکیک پذیری مطلوب آنالیت و تداخل‌گرها و ظهور پیک باریک از نمونه گردید که امکان شناسایی آکریل آمید را در زمانی کمتر از ۶ دقیقه فراهم کرد (شکل ۱-۱B). با توجه به نتایج سایر محققین (Michalak, Gujska, & Kunciewicz, 2013; Wang, Feng, Guo, Shuang, & Choi, 2013) حلال استونیتریل نسبت به متانول توانایی بهتری در جداسازی پیک نمونه و تداخل‌گرها دارد، جلوی پهن‌شدگی پیک را می‌گیرد، و فشار وارد بر ستون را کاهش می‌دهد. مهم‌تر از همه این که استونیتریل در طول موج‌های کم (مانند ۲۰۲ نانومتر)، تابش UV را نسبت به متانول کمتر جذب می‌کند و در نتیجه به دلیل کاهش نویز پس زمینه، خط پایه از ثبات بیشتری برخوردار خواهد بود (Shimadzu, 2021). مشاهدات تجربی ما نشان داد که کروماتوگرام‌های ES-C به مراتب آلوده‌تر از ES-H بود که می‌تواند به دلیل استفاده از مقادیر بیشتر قهوه، استفاده از قهوه‌ها با ترکیب شیمیایی و درجات برشته‌گی متفاوت، و یا دما و فشار

2- Tolerable daily intake (TDI)

1- Oral reference dose (RFD)

قهوه ترک، فرانسوی، فیلتر شده و اسپرسو (Michalak, Czarnowska-Kujawska, Gujska, Klepacka, & Tońska, 2020)، ۵۵۰ - ۳۹۰ نانوگرم بر ۱۰۰ میلی لیتر در قهوه سرد (Han, Boo, & Chung, 2020) و ۴۳۰-۳۵۰ و ۴۱۰-۵۴۰ نانوگرم بر ۱۰۰ میلی لیتر به ترتیب در قهوه گرم و قهوه سرد (Kang, Lee, Davaatseren, & Chung, 2020) اشاره شده است.

میلی لیتر در اسپرسوی وندینگ ماشین‌ها^۱ (Mesías, & Morales, 2016)، ۰/۴ الی ۱۵/۹ میکروگرم آکریل آمید در ۲۰۰ میلی لیتر قهوه (۲۲ قهوه فوری، ۷ قهوه سنتی ترک، ۱۲ قهوه دم کرده آماده برای نوشیدن) (Basaran, Aydin, & Kaban, 2020)، ۱/۰۵ الی ۲/۸۵ میکروگرم بر ۱۰۰ میلی لیتر قهوه فیلتر شده (Galuch et al., 2019)، ۴/۱۰، ۳/۱۹، ۲/۹۵ و ۲/۱۳ میکروگرم بر ۱۰۰ میلی لیتر نیز به ترتیب در



شکل ۱- (الف) طیف محلول استاندارد آکریل آمید. (ب) کروماتوگرام نمونه واقعی (۱۰۰ درصد عربیکا)

Fig. 1. (A) Spectra of acrylamide standard solution. (B) Chromatogram of real sample (100% Arabica coffee)

جدول ۲- پارامترهای اعتبارسنجی آنالیز آکریل آمید توسط کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا

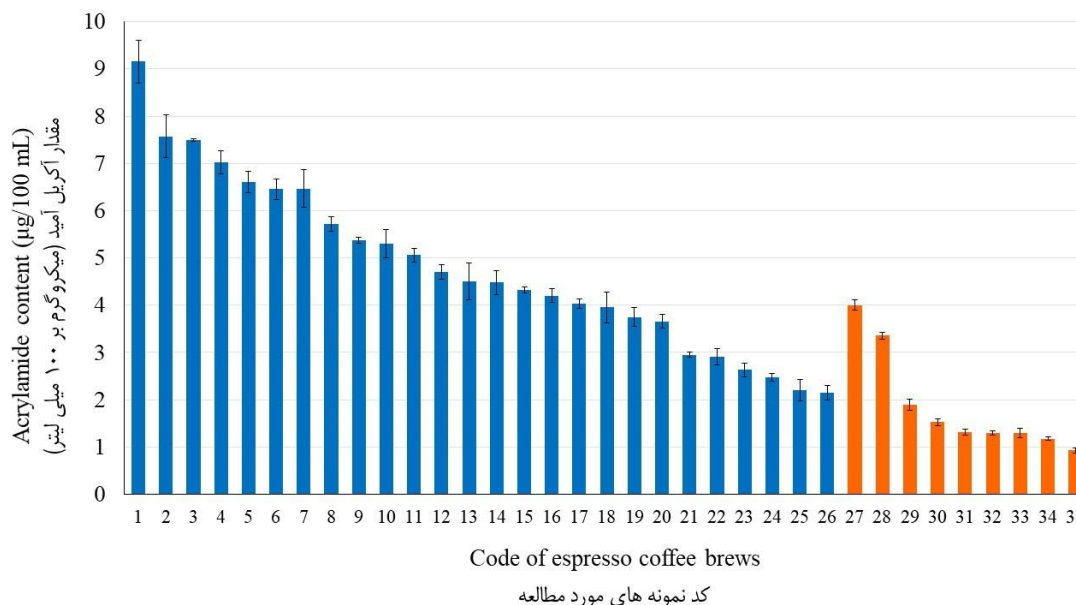
Table 2- Validation parameters for acrylamide analysis using HPLC-DAD

پارامترها Parameters	اعتبار Values
محدوده خطی منحنی کالیبراسیون Linearity range (µg/L)	25-3000
ضریب تعیین (N = ۶) Coefficient of determination (N = 6)*	0.997
حداقل غلظت قابل تشخیص Limit of detection (LOD) (µg/L)**	9.19
حداقل غلظت قابل اندازه گیری Limit of quantification (LOQ) (µg/L)**	30.62
بازیابی Recovery (%)	92 ± 1.5
ضریب تغییرات (CV%) برای سه محلول استاندارد طی سه روز متوالی***	250 µg/L 3.5 ± 0.29
Coefficient of variation (%CV) for three standard solutions during the three sequential days	500 µg/L 2.8 ± 0.11 1000 µg/L 0.65 ± 0.02

* N تعداد محلول‌های استاندارد منحنی کالیبراسیون، ** محاسبه شده از نسبت سیگنال به نویز ۳ (حد تشخیص) و ۱۰ (حد اندازه گیری)، *** غلظت‌های ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰

میکروگرم بر لیتر به ترتیب به عنوان سطوح کم، متوسط و زیاد منحنی کالیبراسیون انتخاب شده و برای تعیین ضریب تغییرات طی سه روز متوالی مورد آزمون قرار گرفتند.

*N number of calibration curve standard, **Calculated from the signal to noise ratio of 3 (LOD) and 10 (LOQ), *** The concentrations of 250, 500, and 1000 µg/L were selected as the low, medium, and high levels of the calibration curve, respectively, and were tested to determine the coefficient of variation over three consecutive days.



شکل ۲- مقدار آکریل آمید (میکروگرم در ۱۰۰ میلی لیتر) در قهوه اسپرسو ستون‌های آبی رنگ (کد ۱ الی ۲۶) نمونه‌های جمع‌آوری شده از کافی شاپ‌های سطح شهر (ES-C) و ستون‌های نارنجی (کد ۲۷ الی ۳۵)، انواع تهیه شده توسط اسپرسوساز خانگی (ES-H) می‌باشند.

Fig. 2. Concentration of acrylamide ($\mu\text{g}/100\text{ mL}$) in espresso coffee analyzed in the present study Blue columns (code 1 to 26) are espresso coffee obtained from coffee shops (ES-C); Orange columns (code 27 to 35) are espresso prepared using household espresso machine (ES-H)

استانداردسازی محاسبات در نظر گرفته شد. این مقدار در محدوده حداقل مقادیر متداول برای تهیه اسپرسو قرار دارد و با توجه به تفاوت در نوع دستگاه، اندازه سید پرتافیلتر، درجه آسیاب و عادات مصرف‌کنندگان، ممکن است در شرایط واقعی مقدار پودر قهوه مصرف‌شده بیشتر از این مقدار باشد. در چارچوب محاسبات این مطالعه، استفاده از مقدار بیشتر پودر قهوه برای تهیه همان حجم اسپرسو، مقدار آکریل آمید متناظر بر حسب میکروگرم بر کیلوگرم پودر قهوه و در نتیجه برآورد دریافت روزانه را کاهش می‌دهد. بنابراین، استفاده از مقدار ۷/۵ گرم در محاسبات، از کم‌برآورد شدن مواجهه و خطر جلوگیری کرده و برآوردی محافظه‌کارانه‌تر ارائه می‌دهد. با این حال، تبدیل مقدار آکریل آمید از مبنای نوشیدنی به مبنای پودر قهوه و برآورد دریافت روزانه، همچنان با درجاتی از عدم قطعیت همراه است. در پژوهش حاضر، داده‌های ستون "مقدار آکریل آمید متناظر در پودر قهوه" در تمامی محاسبات بعدی به‌عنوان C_i یا همان مقدار آکریل آمید در ماده غذایی i (میکروگرم بر کیلوگرم) جهت مطالعه ارزیابی خطر مورد استفاده قرار گرفتند. شایان ذکر است که طبق مقررات اتحادیه اروپا به شماره ۲۱۵۸/۲۰۱۷ مصوب سال ۲۰۱۷، سطح معیار آکریل آمید برای قهوه برشته‌شده ۴۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم و برای قهوه فوری ۸۵۰ میکروگرم بر کیلوگرم در نظر گرفته شده است (Strocchi, Rubiolo, & Cordero, Bicchì, & Liberto, 2022).

بررسی ارزیابی خطر

تخمین دریافت روزانه آکریل آمید از طریق مصرف قهوه

اسپرسو

برای تخمین مواجهه با آکریل آمید از طریق مصرف مواد غذایی، دو نوع داده شامل داده‌های وقوع (غلظت آکریل آمید در قهوه به‌دست‌آمده) و داده‌های مصرف (میزان دریافت محصول غذایی توسط یک جمعیت معین) مورد نیاز است (Nematollahi et al., 2020). قرار گرفتن در معرض آکریل آمید از طریق مصرف ماده غذایی با ضرب این دو داده محاسبه می‌شود و سپس بر میانگین وزن بدن جمعیت تقسیم می‌شود و به‌صورت میلی گرم یا میکروگرم آکریل آمید بر کیلوگرم وزن بدن در روز بیان می‌شود (Akbari-Adergani et al., 2023). در این مطالعه، حجم انواع اسپرسوها بین ۴۰ تا ۷۰ میلی لیتر متغیر بودند که به‌طور میانگین ۵۰ میلی لیتر در نظر گرفته شد. بر این اساس، همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، به‌طور متوسط مقدار آکریل آمید در هر فنجان ۵۰ میلی لیتری برای ES-C و ES-H به‌ترتیب 0.92 ± 0.41 و 0.53 ± 0.93 میکروگرم در ۵۰ میلی لیتر و در مجموع ۳۵ نمونه مورد مطالعه 1.06 ± 0.23 میکروگرم در ۵۰ میلی لیتر بدست آمد. با فرض این که برای استخراج هر ۵۰ میلی لیتر اسپرسو، ۷/۵ گرم پودر قهوه مصرف شده باشد، مقدار آکریل آمید متناظر در پودر قهوه مورد مطالعه محاسبه گردید (جدول ۳). لازم به ذکر است که این فرض به‌منظور

جدول ۳- حداقل، حداکثر و میانگین مقدار آکریل آمید در قهوه‌های اسپرسو و تخمین مقدار متناظر آن در پودر قهوه*

Table 3- Minimum, maximum and average concentration of acrylamide in espresso coffees and estimation of its respective content in coffee powder*

نمونه Sample	تعداد نمونه‌ها Number of samples	مقدار آکریل آمید در نمونه‌های اسپرسو Acrylamide content in espresso samples (µg/50 mL)			مقدار آکریل آمید متناظر در پودر قهوه Acrylamide content in respective coffee powder (µg/kg)		
		حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Average	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Average
اسپرسو - کافی شاپ Espresso - Coffee shop (ES-CS)	26	1.08	4.58	2.41 ± 0.92	143.33	610.50	320.90 ± 122.57
اسپرسو - تهیه شده در منزل Espresso - Household espresso machine (ES-H)	9	0.46	2.00	0.93 ± 0.53	61.83	266.99	124.30 ± 71.59
مجموع نمونه‌ها All samples	35	-	-	2.03 ± 1.06	-	-	270.35 ± 140.90

* در تمامی نمونه‌ها فرض شد که هر فنجان قهوه اسپرسو معادل ۵۰ میلی‌لیتر باشد و از ۷/۵ گرم قهوه آسیاب شده استخراج شده باشد.

* It was assumed that each espresso cup contains 50 mL and was prepared using 7.5 g coffee powder

(۱/۱۰۶)، فرانسه (۰/۱۶۸)، و سوئد (۰/۱۷۱) تفاوت قابل توجهی با هم دارند. در اسپانیا، مقدار دریافت آکریل آمید از قهوه تهیه شده در وندینگ ماشین‌ها در محدوده ۰/۰۱۸ الی ۰/۰۵۶ (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) گزارش شد (Mesías, & Morales, 2016). در ترکیه نیز EDI گروه‌های مختلف سنی از ۱۸ الی ۶۵ سال در حدود ۰/۰۸۴ ± (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) بدست آمد (Basaran, & Aydin, 2020).

به‌طور خلاصه، میزان EDI برای نوجوانان در محدوده ۰/۰۰۹ - ۰/۰۰۱ و برای بزرگسالان در محدوده ۰/۰۱۶ - ۰/۰۰۲ (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) متغیر بود (جدول ۴). با توجه به تفاوت در فرهنگ‌ها و عادات غذایی، مقادیر متفاوتی برای مواجهه با آکریل آمید از طریق مصرف قهوه در بین کشورهای مختلف گزارش شده است. به‌عنوان مثال مقدار دریافت آکریل آمید بر حسب (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) در کشوری مانند انگلستان (۰/۰۰۵)، ایرلند (۰/۰۰۴)، هلند (۰/۰۴۸)، لاتویا (۰/۰۲۹)، دانمارک

جدول ۴- تخمین دریافت آکریل آمید (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) از طریق مصرف قهوه اسپرسو توسط نوجوانان (۱۷-۱۱ سال) و بزرگسالان (۶۰-۱۸ سال)

Table 4- Estimation of dietary intake of acrylamide (µg/body weight/day) via espresso coffee in adolescents (11-17 years) and adults (18-60 years)

نمونه Sample	تعداد نمونه‌ها Number of samples	نوجوانان Adolescents			بزرگسالان Adults		
		حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Average	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Average
اسپرسو - کافی شاپ Espresso - Coffee shop (ES-C)	26	0.002	0.009	0.005	0.004	0.016	0.009
اسپرسو - تهیه شده در منزل Espresso - Household espresso machine (ES-H)	9	0.001	0.004	0.002	0.002	0.004	0.003
مجموع نمونه‌ها All samples	35	-	-	0.004	-	-	0.007

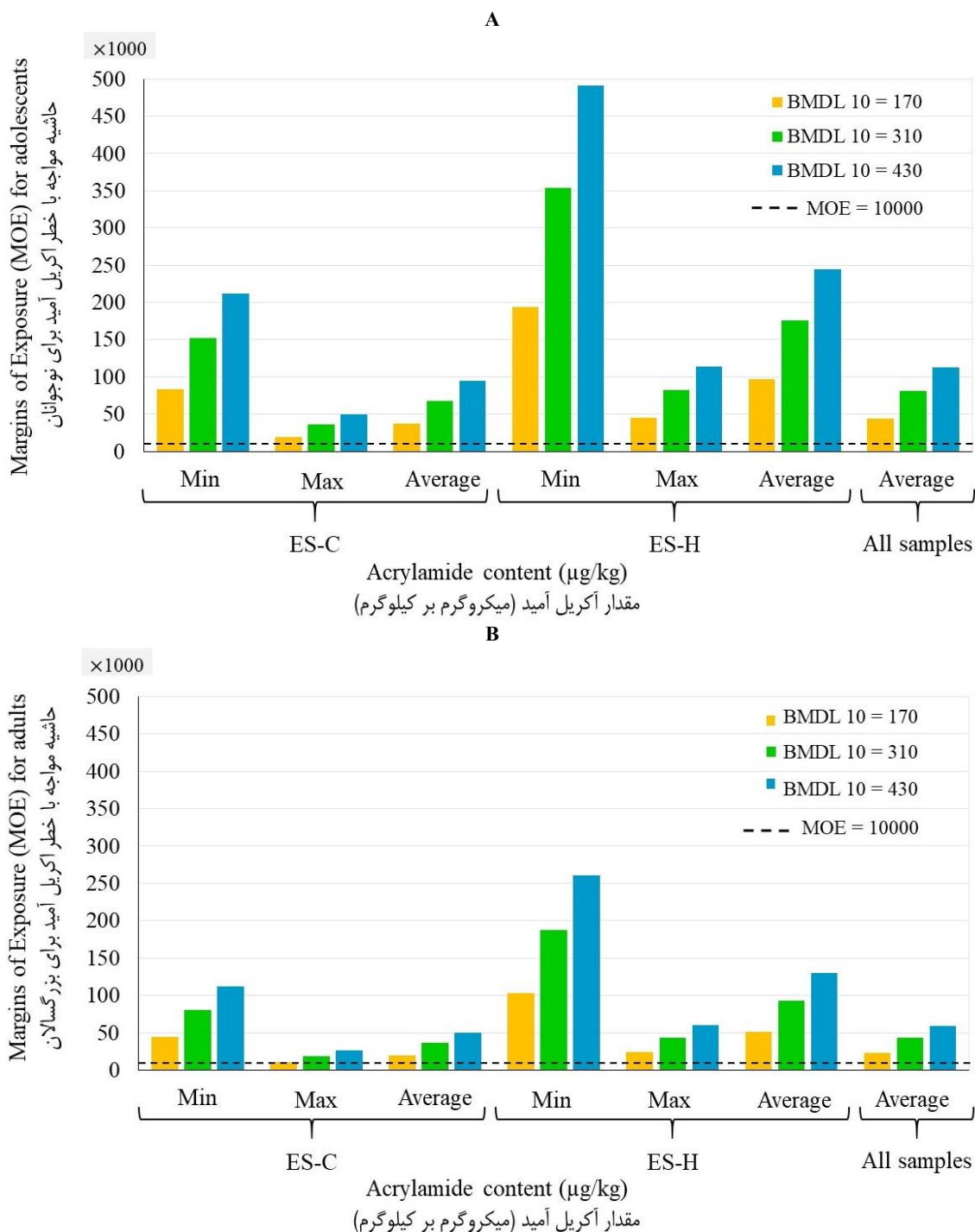
طبق توصیه‌های WHO و طبق قوانین EFSA، مقادیر MOE معادل ۱۰۰۰۰ یا بالاتر، "سطحی از قرار گرفتن در معرض" یک ترکیب را بیان می‌کند که نگران‌کننده نیست و با اولویت پایین برای مدیریت خطر شناخته می‌شود. در مقابل، مقادیر کمتر از ۱۰۰۰۰ برای MOE، بیانگر پتانسیل بالای خطر برای سلامت جامعه هدف به شمار می‌روند (Akbari-Adergani et al., 2023; Fan et al., 2023). مقدار MOE در همه نمونه‌ها و برای هر دو گروه سنی نوجوانان (شکل ۳-۳A)، و بزرگسالان (شکل ۳-۳B)، بیشتر از ۱۰۰۰۰ بود. بنابراین خطر اثرات نامطلوب بر سلامتی مانند سرطان‌زایی در اثر مصرف اسپرسو در جمعیت مورد مطالعه احتمالاً ناچیز است. کمترین مقدار MOE محاسبه شده در این پژوهش که می‌تواند با سطح خطر نسبتاً بالا همراه باشد، ۱۰۴۴۲ بود که در اسپرسوی کد ۱ و برای افراد بزرگسال، توسط BMDL₁₀ با مقدار ۱۷۰ (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) محاسبه گردید (شکل ۳-۳B). به‌طور کلی، MOE برآورد شده ناشی از میانگین دریافت روزانه از طریق مصرف قهوه اسپرسو توسط بزرگسالان از نوجوانان کمتر است. به عبارتی، خطر آکریل آمید بر سلامتی بزرگسالان جدی‌تر از نوجوانان است. در هر دو گروه سنی مورد مطالعه، ES-C نسبت به ES-H به دلیل داشتن مقادیر بیشتر آکریل آمید، MOE کمتری را نشان دادند که با خطر بیشتر برای سلامتی رابطه مستقیم دارد.

تعیین و ارزیابی خطر سلامتی سطوح آکریل آمید در انواع پودر خالص قهوه فوری و کافی‌میکس موجود در بازار تهران توسط کرمی و همکاران (Karami et al., 2022) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بیانگر بیشتر بودن مقدار آکریل آمید در پودر خالص قهوه فوری نسبت به کافی‌میکس بود. آن‌ها با استفاده از (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) BMDL₁₀ = ۱۷۰، مقدار MOE را ۵۰۰۰۰۰ (پودر خالص) و ۵۲۰۰۰۰ (کافی میکس) و با استفاده از (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) BMDL₁₀ = ۴۳۰، مقدار MOE را ۲۰۰۰۰۰ (پودر خالص) و ۲۰۸۰۰۰ (کافی میکس) محاسبه کردند که به مراتب از مقادیر محاسبه شده در این پژوهش بالاتر بود. این نتایج بیانگر خطر ناچیز آکریل آمید این محصولات برای سلامت جامعه مصرف‌کننده است (Karami et al., 2022). در برخی از مطالعات پیشین که در آن‌ها MOE با مقادیر کم بدست آمده بود، ارتباط مثبتی بین EDI و سمیت ژنتیکی و سرطان‌زایی آکریل آمید گزارش شد (Riboldi, Vinhas, & Moreira, 2014).

نعمت‌اللهی و همکاران (Nematollahi et al., 2020)، محتوای آکریل آمید را در ۱۹۵ نمونه غذایی (۲۵ نمونه نان صنعتی و سنتی، ۴۲ نمونه کیک و بیسکوئیت، ۲۶ نمونه شکلات و شربتی، ۵۰ نمونه اسنک بر پایه سیب‌زمینی و ذرت، ۱۶ نمونه قهوه، ۲۴ نمونه مغزیجات برشته و ۱۲ نمونه فست فود مانند پیتزا، سوسیس و همبرگر) موجود در سوپرمارکت‌های تهران اندازه‌گیری کرده و ارزیابی خطر ناشی از دریافت آن را در طیف وسیعی از مردم اعم از کودکان، نوجوانان و بزرگسالان بررسی کردند. مقدار آکریل آمید برندهای مختلف قهوه بین ۱۰۶ تا ۱۷۱۰ میکروگرم بر کیلوگرم بدست آمد که علیرغم غلظت بالا، به دلیل کمترین میزان پایین مصرف در روز برای تمام گروه‌های سنی، تنها ۱ تا ۲ درصد از دریافت روزانه را به خود اختصاص دادند (Nematollahi et al., 2020). نتایج ما با این پژوهشگران همخوانی داشت. با در نظر گرفتن سهم ۱/۵ درصد، به‌طور متوسط مقدار EDI برای نوجوانان ۰/۱۵ و برای بزرگسالان ۰/۰۹ (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) محاسبه شد. مطالعات اخیر در اسپانیا نیز ادعا کرده‌اند که مصرف قهوه تنها مسئول ۳ درصد از دریافت روزانه آکریل آمید در این کشور است (Peris-Camarasa, Pardo, Fernández, Dualde, & Coscollà, 2023).

حاشیه مواجهه با خطر آکریل آمید

استفاده از MOE مهمترین راه برای ارزیابی خطر ناشی از مصرف آکریل آمید در قهوه است. به غیر از آب آشامیدنی، برای سایر مواد خوراکی TDI مشخص و معینی در اتحادیه اروپا توصیه نشده است. به همین دلیل، MOE به‌منظور ارزیابی خطر این آلاینده بر سلامت انسان توسط JECFA ارائه گردید (Xu et al., 2014). همانطور که در بخش مواد و روش‌ها ذکر شد، MOE با استفاده از BMDL₁₀ معادل ۱۷۰، ۳۱۰ و ۴۳۰ (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز)، محاسبه گردید. BMDL مقداری از آلاینده است که از مطالعات اپیدمیولوژیک یا مطالعات بر روی حیوانات آزمایشگاهی بدست می‌آید و حداقل دوز از یک آلاینده را بیان می‌کند که خطری واضح برای سلامتی ایجاد می‌کند. به‌عنوان مثال BMDL₅ یا BMDL₁₀، به‌ترتیب بیانگر غلظتی از آلاینده هستند که باعث افزایش ۵ یا ۱۰ درصدی القای سرطان یا شروع رشد تومر می‌شوند (Kashani et al., 2021). به‌طور کلی، MOE ابزاری است که توسط محققین برای بیان سطوح ایمن ناشی از وجود آلاینده در غذا و خوراک استفاده می‌شود (Barrios-Rodríguez et al., 2021) و رهنمودهایی را برای مسئولین مدیریت خطر فراهم کرده و نشان می‌دهد که مواجهات انسانی تا چه حد به مواجهات قابل سنجش در حیوانات آزمایشگاهی، نزدیک هستند.



شکل ۳- مقدار حاشیه مواجهه با خطر سرطان‌زایی آکریل‌آمید (MOE) با استفاده از (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) ۴۳۰، ۳۱۰، ۱۷۰ در BMDL₁₀ در (الف) نوجوانان (۱۱-۱۷ سال) و (ب) بزرگسالان (۶۰-۱۸ سال). ES-C (اسپرسوی کافی شاپ‌ها)، ES-H (اسپرسوی تهیه شده با اسپرسوساز خانگی)

Fig. 3. Margin of exposure (MOE) values for carcinogenicity of acrylamide based on BMDL₁₀= 170, 310, 430 ($\mu\text{g/kg bw/day}$) for (A) adolescents (11–17 years), and (B) adults (18–60 years). ES-C (espresso obtained from coffee shops), ES-H (espresso prepared using household espresso machine)

خطر غیرسرطان‌زایی (THQ) و سرطان‌زایی (ILCR)

آکریل آمید

یکی دیگر از خروجی‌های قابل استفاده، تخمین خطر با محاسبه ILCR است. مقادیر حاصل از تخمین خطر افزایش سرطان در طول عمر یا همان ILCR در جدول ۵ نشان داده شده است. در تمامی نمونه‌ها و در هر دو گروه سنی مورد مطالعه، مقدار محاسبه شده کمتر از 1×10^{-5} است. نکته قابل توجه این است که علی‌رغم EDI متفاوت بین دو گروه سنی، خطر سرطان‌زایی (هر چند بسیار ناچیز) برای هر دو گروه سنی نسبتاً مشابه بود. این عدد یعنی 1×10^{-5} ، حد مجاز خطر

سرطان‌زایی آکریل آمید در طول عمر است که توسط USEPA تعیین شده و بدین معنی است که از هر ۱۰۰۰۰۰ نفری که در مواجهه با این غلظت آکریل آمید قرار گیرند، حد مجاز ابتلا به سرطان در طول عمر، یک نفر خواهد بود (Eslamizad et al., 2019). بنابراین، طبق نتایج جدول ۵، هر دو گروه سنی مورد مطالعه با مصرف انواع قهوه اسپرسو در معرض خطر سرطان‌زایی آکریل آمید قرار ندارند. هیچ شواهد اپیدمیولوژیک واضحی وجود ندارد که نشان دهد آکریل آمید در دوزهای پایین، خطر سرطان را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (Eslamizad et al., 2019).

جدول ۵- تخمین خطر افزایش سرطان در طول عمر (ILCR) و خطر غیرسرطان‌زایی (THQ)

Table 5- Estimation of incremental lifetime cancer risk (ILCR) and target hazard quotient (THQ)

نمونه Sample	تعداد نمونه‌ها Number of samples	مقدار آکریل آمید Acrylamide content (µg/kg)	ILCR		THQ	
			نوجوانان Adolescents	بزرگسالان Adults	نوجوانان Adolescents	بزرگسالان Adults
اسپرسو - کافی شاپ Espresso - Coffee shop (ES-CS)	26	حداقل Min	$10^{-5} \times 0.129$	0.117×10^{-5}	0.001	0.0019
		حداکثر Max	$10^{-5} \times 0.550$	0.500×10^{-5}	0.0043	0.0081
		میانگین Average	$10^{-5} \times 0.289$	0.263×10^{-5}	0.0023	0.0043
اسپرسو - تهیه شده در منزل Espresso - Household espresso machine (ES-H)	9	حداقل Min	$10^{-5} \times 0.055$	0.050×10^{-5}	0.0004	0.0008
		حداکثر Max	$10^{-5} \times 0.241$	0.219×10^{-5}	0.0019	0.0036
		میانگین Average	$10^{-5} \times 0.112$	0.102×10^{-5}	0.0009	0.0017
مجموع نمونه‌ها All samples	35	میانگین Average	$10^{-5} \times 0.244$	0.221×10^{-5}	0.0019	0.0036

اسپرسو ممکن است برای سلامتی مضر باشد، اما این خطر بسیار ناچیز است. همچنین THQ حاصل از مصرف ES-C تقریباً دو برابر بیشتر از ES-H بدست آمد که به دلیل مقدار بیشتر آکریل آمید در این دسته از اسپرسوها بود. همچنین، خطر غیرسرطان‌زایی برای بزرگسالان نیز در حدود دو برابر بیشتر از نوجوانان برآورد شد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، خطر ناشی از مصرف آکریل آمید از طریق مصرف قهوه اسپرسو مورد ارزیابی قرار گرفت. ۲۶ قهوه اسپرسو از کافی‌شاپ‌های سطح شهر جمع‌آوری شدند (ES-C) و ۹ نمونه نیز توسط اسپرسوساز خانگی و از پودرهای تجاری، تهیه شدند (ES-H).

تخمین خطر غیرسرطان‌زایی آکریل آمید با محاسبه ضریب خطر هدف^۱ (THQ) محاسبه شد که از تقسیم EDI بر RFD (به‌طور متوسط ۲ میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) بدست می‌آید (Aghvami et al., 2023). در مطالعات ارزیابی خطر آکریل آمید مشخص شده است که اگر THQ کمتر از ۱ باشد، احتمال اثرات نامطلوبی آکریل آمید بر سلامتی ناچیز است، در حالی که THQ برابر یا بیشتر از ۱، بیانگر وجود یک خطر بالقوه و غیرقابل قبول برای سلامت جامعه هدف است (Aghvami et al., 2023; Karami et al., 2022). در پژوهش ما، میانگین THQ برآورد شده از طریق مصرف قهوه اسپرسو در مجموع ۳۵ نمونه مورد مطالعه برای نوجوانان 0.0019 و در بزرگسالان 0.0036 بدست آمد که به مراتب کمتر از ۱ است. این بدان معنی است که اگرچه دریافت آکریل آمید از طریق مصرف قهوه

1- Target hazard quotient (THQ)

نتایج این مطالعه نشان داد که آکریل آمید در تمامی نمونه‌های قهوه اسپرسو مورد بررسی، قابل شناسایی بود و غلظت آن در نمونه‌های تهیه شده در کافی‌شاپ‌ها عموماً بالاتر از اسپرسوهای تهیه شده از پودرهای تجاری در شرایط خانگی بدست آمد، که می‌تواند به دلیل تفاوت در وارپته‌های قهوه، مقدار قهوه جهت استخراج و نیز تفاوت در پارامترهای استخراج (دما، فشار، میزان فشرده کردن پودر داخل پرتافیلتر) و مدل دستگاه اسپرسوساز باشد. میانگین دریافت روزانه آکریل آمید توسط نوجوانان و بزرگسالان به ترتیب 0.004 و 0.007 (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) بدست آمد. مقادیر شاخص‌های ارزیابی خطر شامل حاشیه مواجهه (MOE)، خطر سرطان‌زایی و شاخص خطر غیرسرطان‌زایی همگی در محدوده‌ای قرار داشتند که نشان‌دهنده نگرانی اندک از نظر سلامت عمومی است. بنابراین، مصرف قهوه اسپرسو به تنهایی در جامعه مورد مطالعه تهدید جدی برای سلامت مصرف‌کنندگان محسوب نمی‌شود. با این حال، باید توجه داشت که قهوه اسپرسو یکی از منابع بالقوه دریافت آکریل آمید در رژیم غذایی است و مصرف آن می‌تواند به افزایش دریافت تجمعی این ترکیب در بدن منجر شود. از آنجا که آکریل آمید در طیف وسیعی از مواد غذایی فرآوری شده حرارتی مانند محصولات سیب‌زمینی، نان و فرآورده‌های غلات نیز تشکیل می‌شود، دریافت همزمان آن از چندین منبع غذایی ممکن است سطح مواجهه کلی را افزایش دهد. از این رو، ارزیابی خطر آکریل آمید نباید صرفاً محدود به یک ماده غذایی باشد و لازم است الگوی کلی رژیم غذایی در نظر گرفته شود. همانند هر مطالعه‌ای، این پژوهش نیز با محدودیت‌هایی همراه بوده است. از جمله محدودیت‌های این مطالعه می‌توان به تعداد کم نمونه، و نیز عدم تفاوت میان مصرف‌کنندگان (بانوان و آقایان) اشاره کرد. همچنین داده‌های مصرف

برای برآورد دریافت روزانه بر اساس فرضیات عمومی مصرف بوده و ممکن است بازتاب‌دهنده دقیق الگوی مصرف در همه جمعیت‌ها نباشد. این مورد در ایران نیازمند مطالعه‌ای دقیق و گسترده است که می‌تواند از طریق تکمیل پرسش‌نامه‌ها در شهرهای مختلف، منجر به ارزیابی‌هایی قابل قبول و نزدیک به واقعیت گردد. در نهایت، با توجه به روند رو به افزایش مصرف انواع قهوه در جامعه ایرانی و تفاوت‌های الگوی مصرف بر اساس جنسیت (بانوان و آقایان) و سن (نوجوانان و بزرگسالان)، انجام مطالعات تکمیلی و گسترده‌تر در این زمینه ضرورت دارد. این پژوهش می‌تواند به عنوان نقطه آغازین در مسیر شناخت دقیق‌تر میزان مواجهه و ارزیابی خطرات بالقوه مصرف قهوه از منظر سلامت عمومی تلقی شود. علاوه بر این، انجام مطالعات جامع‌تر برای ارزیابی دریافت تجمعی آکریل آمید از منابع مختلف غذایی در کنار بررسی الگوهای واقعی مصرف قهوه در گروه‌های سنی مختلف می‌تواند به ارائه برآورد دقیق‌تر از سطح مواجهه و مدیریت بهتر خطرات احتمالی برای سلامت جامعه کمک کند.

منابع تأمین مالی

این کار توسط دانشگاه فردوسی مشهد (۵۱۷۰۸ / ۳) پشتیبانی مالی شد.

میزان مشارکت نویسندگان

شیمیا تقوی: انجام آزمایش‌ها. **مرضیه معین فرد:** مفهوم‌سازی، نظارت، منابع، تأمین مالی، مدیریت پروژه، تحقیق و بررسی، نرم‌افزار، تحلیل رسمی، اعتبارسنجی، نوشتن - پیش‌نویس اصلی، نوشتن - بررسی و ویرایش. **رضا فرهوش:** نظارت، منابع.

References

1. Aghvami, M., Mohammadi, A., Khaniki, G.J., Ahmadi, M., Moazzen, M., Arabameri, M., & Shariatifar, N. (2023). Investigation of cocoa and cinnamon effect on acrylamide formation in cakes production using GC/MS method: A risk assessment study. *Food Chemistry: X*, 18, 100629. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100629>
2. Akbari-Adergani, B., Shahbazi, R., Esfandiari, Z., Kamankesh, M., Vakili Saatloo, N., Abedini, A., . . . Sadighara, P. (2023). Acrylamide content of industrial and traditional popcorn collected from Tehran's market, Iran: A risk assessment study. *Journal of Food Protection*, 86(1), 100001. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2022.10.001>
3. Alves, R.C., Soares, C., Casal, S., Fernandes, J.O., & Oliveira, M.B.P.P. (2010). Acrylamide in espresso coffee: Influence of species, roast degree and brew length. *Food Chemistry*, 119(3), 929-934. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.07.051>
4. Ariseto, A.P., & Vicente, E. (2015). Chapter 65 - Estimate of Acrylamide Intake from Coffee and Health Risk Assessment. In V. R. Preedy (Ed.), *Coffee in Health and Disease Prevention* (pp. 575-584). San Diego: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00065-6>
5. Barrios-Rodríguez, Y.F., Pedreschi, F., Rosowski, J., Gómez, J.P., Figari, N., Castillo, O., & Mariotti Celis, M.S. (2021). Is the dietary acrylamide exposure in Chile a public health problem? *Food Additives & Contaminants: Part A*, 38(7), 1126-1135. <https://doi.org/10.1080/19440049.2021.1914867>

6. Basaran, B., & Aydin, F. (2020). Estimating the acrylamide exposure of adult individuals from coffee: Turkey. *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess*, 37(12), 2051-2060. <https://doi.org/10.1080/19440049.2020.1819570>
7. Basaran, B., Aydin, F., & Kaban, G. (2020). The determination of acrylamide content in brewed coffee samples marketed in Turkey. *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess*, 37(2), 280-287. <https://doi.org/10.1080/19440049.2019.1685133>
8. Bertuzzi, T., Martinelli, E., Mulazzi, A., & Rastelli, S. (2020). Acrylamide determination during an industrial roasting process of coffee and the influence of asparagine and low molecular weight sugars. *Food Chemistry*, 303, 125372. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125372>
9. Deribew, H.A., & Woldegiorgis, A.Z. (2021). Acrylamide levels in coffee powder, potato chips and French fries in Addis Ababa city of Ethiopia. *Food Control*, 123, 107727. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107727>
10. EFSA, E. P. o. C. i. t. F. C. (2015). Scientific Opinion on acrylamide in food. *EFSA Journal*, 13(6), 4104. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.4104>
11. Endeshaw, H., & Belay, A. (2020). Optimization of the roasting conditions to lower acrylamide content and improve the nutrient composition and antioxidant properties of Coffea arabica. *PloS One*, 15(8), e0237265. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237265>
12. Eslamizad, S., Kobarfard, F., sitsimpikou, C., Tsatsakis, A., Tabib, K., & Yazdanpanah, H. (2019). Health risk assessment of acrylamide in bread in Iran using LC-MS/MS. *Food and Chemical Toxicology*, 126, 162-168. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.02.019>
13. Fan, M., Xu, X., Lang, W., Wang, W., Wang, X., Xin, A., . . . Zhu, B. (2023). Toxicity, formation, contamination, determination and mitigation of acrylamide in thermally processed plant-based foods and herbal medicines: A review. *Ecotoxicology Environment Safty*, 260, 115059. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115059>
14. Freitas, V.V., Borges, L.L.R., Castro, G.A.D., Almeida, L.F., Crepalde, L.T., Kobi, H.d.B., . . . Stringheta, P.C. (2024). Influence of roasting levels on chemical composition and sensory quality of Arabica and Robusta coffee: A comparative study. *Food Bioscience*, 59, 104171. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104171>
15. Galuch, M.B., Magon, T.F.S., Silveira, R., Nicacio, A.E., Pizzo, J.S., Bonafe, E.G., . . . Visentainer, J. V. (2019). Determination of acrylamide in brewed coffee by dispersive liquid-liquid microextraction (DLLME) and ultra-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS). *Food Chem*, 282, 120-126. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.114>
16. Garg, R., & Singla, N. (2025). An architecture for acrylamide detection in carbohydrate-rich food products using deep learning method. *Journal of Food Composition and Analysis*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107497>
17. Haiyan Wang, A.W.M.L.C., Shaomin Shuang, A., Martin, M.F. (2008). SPE/HPLC/UV studies on acrylamide in deep-fried flour-based indigenous Chinese foods. *Microchemical Journal*, 89(2), 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2007.12.006>
18. Han, J.-W., Boo, H., & Chung, M.-S. (2020). Effects of extraction conditions on acrylamide/furan content, antioxidant activity, and sensory properties of cold brew coffee. *Food Science and Biotechnology*, 29(8), 1071-1080. <https://doi.org/10.1007/s10068-020-00747-1>
19. Kang, D.-e., Lee, H.-U., Davaatseren, M., & Chung, M.-S. (2020). Comparison of acrylamide and furan concentrations, antioxidant activities, and volatile profiles in cold or hot brew coffees. *Food Science and Biotechnology*, 29(1), 141-148. <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00644-2>
20. Karami, M., Akbari-Adergani, B., Jahed Khaniki, G., Shariatifar, N., & Sadighara, P. (2022). Determination and health risk assessment of acrylamide levels in instant coffee products available in Tehran markets by GC-MS. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-10. <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2076225>
21. Kashani, H., Gharibzadeh, F., Nakhjirgan, P., Younesian, M., & Zaeim, M. (2021). *WHO Human Health Risk Assessment Toolkit: Chemical Hazard* (Second Edition ed.). Tehran: Teymour Zadeh Novin.
22. Khaloo Kermani, P., Moeenfar, M., Farhoosh, R., & Alves, A. (2023). Modified QuEChERS purification method for analysis of acrylamide in roasted *Phoenix dactylifera* L. seeds via HPLC-PDA. *Journal of Food Measurement and Characterization*. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-02015-2>
23. Malmir, H., Shayanfar, M., Mohammad-Shirazi, M., Tabibi, H., Sharifi, G., & Esmailzadeh, A. (2019). Tea and coffee consumption in relation to glioma: a case-control study. *European Journal of Nutrition*, 58(1), 103-111. <https://doi.org/10.1007/s00394-017-1575-z>
24. Mesías, M., & Morales, F.J. (2016). Acrylamide in coffee: Estimation of exposure from vending machines. *Subtropical Plant Science*, 48, 8-12. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.02.005>

25. Michalak, J., Czarnowska-Kujawska, M., Gujska, E., Klepacka, J., & Tońska, E. (2020). Effect of the brewing process on the acrylamide content in coffee beverages. *Proceedings of the Nutrition Society*. 2020;79(OCE2):E293. <https://doi.org/10.1017/S0029665120002414>
26. Michalak, J., Gujska, E., & Kunciewicz, A. (2013). RP-HPLC-DAD studies on acrylamide in cereal-based baby foods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 32(1), 68-73. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.08.006>
27. Nematollahi, A., Kamankesh, M., Hosseini, H., Ghasemi, J., Hosseini-Esfahani, F., Mohammadi, A., & Mousavi Khaneghah, A. (2020). Acrylamide content of collected food products from Tehran's market: a risk assessment study. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(24), 30558-30570. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121896>
28. Oroian, M., Amariei, S., & Gutt, G. (2015). Acrylamide in Romanian food using HPLC-UV and a health risk assessment. *Food Addit Contam Part B Surveill*, 8(2), 136-141. <https://doi.org/10.1080/19393210.2015.1010240>
29. Peris-Camarasa, B., Pardo, O., Fernández, S. F., Dualde, P., & Coscollà, C. (2023). Assessment of acrylamide exposure in Spain by human biomonitoring: Risk and predictors of exposure. *Environmental Pollution*, 331, 121896. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121896>
30. PubChem. (2023). Acrylamide. Retrieved from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Acrylamide>
31. Riboldi, B.P., Vinhas, Á.M., & Moreira, J.D. (2014). Risks of dietary acrylamide exposure: A systematic review. *Food Chemistry*, 157, 310-322. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.02.046>
32. Roudbari, A., Rafiei Nazari, R., Shariatifar, N., Moazzen, M., Abdolshahi, A., Mirzamohammadi, S., . . . Arabameri, M. (2021). Concentration and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in commercial tea and coffee samples marketed in Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(4), 4827-4839. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10794-0>
33. Schouten, M.A., Tappi, S., & Romani, S. (2020). Acrylamide in coffee: formation and possible mitigation strategies - a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(22), 3821-3807. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1708264>
34. Sebastià, A., Pallarés, N., Bridgeman, L., Juan-García, A., Castagnini, J.M., Ferrer, E., . . . Berrada, H. (2023). A critical review of acrylamide green extraction and determination in food matrices: Current insights and future perspectives. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 167, 117267. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117267>
35. Sharma, N., Thakur, S., Bains, A., Goksen, G., Ali, N., Ansari, M.A., . . . Chawla, P. (2025). Green hydrothermal approach for the synthesis of carbon quantum dots from waste tea bags for acrylamide detection in drinking water: A fluorescence assay validated by HPLC-PDA analysis. *Food Chemistry: X*, 25, 102043. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102043>
36. Shimadzu. (2021). Differences Between Using Acetonitrile and Methanol for Reverse Phase Chromatography. Retrieved from <https://www.shimadzu.com/an/service-support/technical-support/analysis-basics/lib/1ctalk/35/35lab.html>
37. Strocchi, G., Rubiolo, P., Cordero, C., Bicchi, C., & Liberto, E. (2022). Acrylamide in coffee: What is known and what still needs to be explored. A review. *Food Chemistry*, 393, 133406. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133406>
38. Taghizadeh, S.F., Azizi, M., Hassanpourfard, G., Rezaee, R., & Karimi, G. (2023). Assessment of carcinogenic and non-carcinogenic risk of exposure to metals via consumption of coffee, tea, and herbal tea in Iranians. *Biological Trace Element Research*, 201(3), 1520-1537. <https://doi.org/10.1007/s12011-022-03239-x>
39. Wang, H., Feng, F., Guo, Y., Shuang, S., & Choi, M.M.F. (2013). HPLC-UV quantitative analysis of acrylamide in baked and deep-fried Chinese foods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 31(1), 7-11. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.02.006>
40. Xu, Y., Cui, B., Ran, R., Liu, Y., Chen, H., Kai, G., & Shi, J. (2014). Risk assessment, formation, and mitigation of dietary acrylamide: Current status and future prospects. *Food and Chemical Toxicology*, 69, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2014.03.037>
41. Yan, F., Wang, L., Zhao, L., Wang, C., Lu, Q., & Liu, R. (2023). Acrylamide in food: Occurrence, metabolism, molecular toxicity mechanism and detoxification by phytochemicals. *Food and Chemical Toxicology*, 175, 113696. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2023.113696>
42. Zahir, A., Ge, Z., & Khan, I.A. (2025). Public health risks associated with food process contaminants – A Review. *Journal of Food Protection*, 88(2), 100426. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2024.100426>