

Acrylamide in Food and the Environment: A Narrative Review on Sources, Identification, Analytical Methods and Control

Mahdi Asadi-Ghalhari

Associate Professor of Environmental Engineering, Department of Environmental Health, Research Center for Environmental Pollutants, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran

Mohammad Ebrahim Ghafari

Assistant Professor of Biostatistics, Department of Biostatistics and Epidemiology, School of Health, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran

Ali Salehi

* Phd in Food Safety and Hygiene, Research Center for Environmental Pollutants, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran **(Corresponding Author)** salehia15@gmail.com

Abstract

Background and Objective: Acrylamide, as one of the emerging contaminants in food and the environment, has become a global concern in the field of food safety and human health. It is primarily formed by the Maillard reaction between reducing sugars and the asparagine under high temperatures. Additionally, the widespread use of polyacrylamides (PAMs) in various industries, including water treatment, drilling, and agriculture, has led to increased environmental pollution. The aim of the present study is to narrative review of the presence of acrylamide in food, examine its possible risks to human health and the environment, and review the current and novel strategies for its detection, reduction, and control.

Materials and Methods: In this review study, a comprehensive approach was adopted to examine the sources and mechanisms of acrylamide formation, environmental contamination pathways, health and environmental effects, and its detection methods (such as GC-MS and LC-MS). Moreover, relevant technologies and mitigation strategies such as the Acrylamide Toolbox and the ALARA principle were discussed.

Results: Acrylamide possesses carcinogenic, neurotoxic, genotoxic, and reproductive toxicity potential, and its presence in the food supply and water sources poses a major threat to public health. The findings indicate that controlling this contaminant involves significant coordination among policymakers, the food industry, scientists, and regulatory agencies, along with the creation and enforcement of contemporary benchmarks and the application of cutting edge scientific innovations.

Conclusion: Effective management of acrylamide requires an integrated collaborative approach involving scientific, industrial, and regulatory frameworks. Constructing proper frameworks of collaboration can greatly aid public health through reduced exposure if knowledge, international standards, and new technologies are properly applied.

Keywords: Acrylamide, Emerging Contaminant, Food Safety, Environmental Hazards, Acrylamide Toolbox, LC-MS, GC-MS, ALARA Principle

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

Received: 2025/02/28

Accepted: 2025/06/01

Doi:10.22038/jreh.2025.89613.1722

► **Citation:** Asadi-Ghalhari M, Ghafari M.E, Salehi A. Acrylamide in Food and the Environment: A Narrative Review on Sources, Identification, Analytical Methods and Control. *Journal of Research in Environmental Health*. 11(3):11-32.

آکریلامید در مواد غذایی و محیط زیست: مروری نقلی بر منابع، شناسایی، روش‌های تجزیه‌ای و کنترل

مهدی اسدی - قاهره

دانشیار مهندسی محیط زیست، گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت مرکز تحقیقات آلاینده‌های محیطی، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران.

محمد ابراهیم غفاری

استادیار آمار زیستی، گروه آمار زیستی و اپیدمیولوژی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران.

علی صالحی

* دکترای بهداشت و ایمنی مواد غذایی، مرکز تحقیقات آلاینده‌های محیطی، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران. (نویسنده مسئول)
salehia15@gmail.com

چکیده

زمینه و هدف: آکریلامید به‌عنوان یک آلاینده نوظهور در اثر واکنش میلارد میان قندهای کاهنده و آسپاراژین در دمای بالا در مواد غذایی تشکیل می‌شود. این ترکیب به شکل پلی‌آکریل‌آمیدها در صنایعی مانند تصفیه آب، حفاری و کشاورزی، به یک نگرانی جهانی در حوزه ایمنی غذایی و آلودگی‌های زیست‌محیطی تبدیل شده است. هدف مطالعه حاضر ارائه مروری نقلی بر حضور آکریلامید در مواد غذایی، بررسی مخاطرات بالقوه آن برای سلامت انسان و محیط زیست و تحلیل راهکارهای موجود و نوین برای شناسایی، کاهش و کنترل این ترکیب می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه مروری، با رویکردی جامع، به بررسی منابع و مکانیسم تشکیل آکریلامید، مسیرهای آلودگی محیطی، اثرات بهداشتی و زیست‌محیطی و روش‌های شناسایی آن پرداخته شد. همچنین فناوری‌ها و راهکارهای کاهش آکریلامید از جمله جعبه‌ابزار آکریلامید و اصل ALARA، مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: آکریلامید دارای پتانسیل سرطان‌زایی، سمیت عصبی، ژنوتوکسیک و اختلال در تولیدمثل است و حضور آن در زنجیره غذایی و منابع آب، خطری جدی برای سلامت عمومی به‌شمار می‌آید. یافته‌ها نشان می‌دهد برای کنترل اثربخش این آلاینده، نیاز به هماهنگی و مشارکت بین سیاست‌گذاران، صنایع غذایی، محققان و نهادهای نظارتی، تدوین و استقرار استانداردهای به‌روز و بهره‌گیری از جدیدترین دستاوردهای علمی وجود دارد.

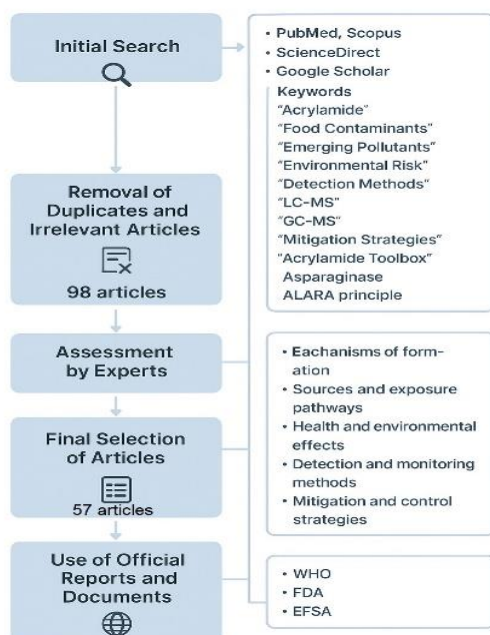
نتیجه‌گیری: مدیریت مؤثر آکریلامید نیازمند رویکردی چندبعدی مبتنی بر همکاری میان بخش‌های علمی، صنعتی و نظارتی است. استفاده از دانش روز، استقرار استانداردهای بین‌المللی و به‌کارگیری فناوری‌های نوین می‌تواند به کاهش معنادار مواجهه انسانی و حفظ سلامت عمومی کمک کند.

کلیدواژه‌ها: آکریلامید

در دهه‌های اخیر، نگرانی‌های رو به افزایشی در خصوص حضور آلاینده‌های نوظهور^۱ در زنجیره‌ی غذایی انسان مطرح شده است. این گروه از آلاینده‌ها، که ممکن است طی فرآوری، بسته‌بندی، نگهداری یا حتی پخت غذا به آن راه یابند، غالباً دارای ساختارهای شیمیایی فعال، پایداری بالا و پتانسیل بالقوه برای اثرات منفی بر سلامت انسان و محیط زیست هستند (۱). برخلاف آلاینده‌های شناخته‌شده‌ای نظیر فلزات سنگین یا آفت‌کش‌ها، آلاینده‌های نوظهور فاقد مقررات جامع نظارتی بوده و شناسایی و پایش آن‌ها نیز اغلب با چالش‌های تحلیلی مهمی همراه است (۲).

آکریلامید یکی از مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین آلاینده‌های نوظهور در مواد غذایی است؛ ترکیبی با قطبیت و واکنش‌پذیری بالا که نخستین بار در سال ۲۰۰۲ در مواد غذایی حرارت‌دیده مورد شناسایی قرار گرفت (۳). تشکیل آکریلامید عمدتاً در غذاهای غنی از کربوهیدرات که تحت فرآیندهایی نظیر سرخ‌کردن، برشته‌کردن یا پخت در دماهای بیش از ۱۲۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرند، رخ می‌دهد و از واکنش میان قندهای احیاکننده و اسید آمینه آسپاراژین طی واکنش میلارد حاصل می‌شود (۴). این ماده در بسیاری از محصولات پرمصرف مانند چیپس، نان، قهوه، بیسکویت و غلات صبحانه وجود دارد و مطالعات متعدد، خواص نوروٹوکسیک، ژنوتوکسیک و احتمالاً سرطان‌زای آن را در انسان نشان داده‌اند (۵).

مطالعات متعددی تاکنون به بررسی حضور آکریلامید در مواد غذایی پرداخته‌اند. در یکی از این پژوهش‌ها، پوگاشی و همکاران میزان آکریلامید را در چهار محصول پرمصرف روزانه در رومانی ارزیابی کرده و هم‌چنین مقدار مواجهه افراد با این ترکیب را در مصرف یک وعده محاسبه کردند. نتایج نشان داد که قهوه با میانگین ۱۹۹ میکروگرم در کیلوگرم بیشترین میزان آکریلامید را دارا بود و پس از آن به‌ترتیب چیپس سیب‌زمینی (۱۳۴ میکروگرم در کیلوگرم)، چوب‌شور (۱۲۰ میکروگرم در کیلوگرم) و نان (۱۴ میکروگرم در کیلوگرم) قرار گرفتند. بررسی مقدار آکریلامید بر اساس یک وعده مصرفی نیز نشان داد



شکل ۱. شماتیک غربالگری مقالات و مستندات

یافته‌ها

آکریلامید^۱ که با نام‌های دیگری نظیر آکریلیک‌آمید یا پروپ-۲-ان‌آمید^۲ نیز شناخته می‌شود، ترکیبی آلی با فرمول شیمیایی C_3H_5NO و وزن مولکولی ۷۱/۰۸ گرم بر مول می‌باشد. این ماده به‌صورت جامد بلوری، سفید، بی‌بو و به‌خوبی محلول در آب است. آکریلامید به‌طور طبیعی در مواد غذایی خام وجود ندارد و عمدتاً طی فرآیندهای حرارتی نظیر سرخ‌کردن، برشته‌کردن، پختن و کباب‌کردن (به‌ویژه در محصولات نشاسته‌ای) در دماهای بالاتر از ۱۲۰ درجه سلسیوس تشکیل می‌شود (۱۰، ۱۱

(۹۷-۱۰۸٪ بازیابی، RSDr و RSDiR کمتر از ۱۲٪)

در تعیین آکریلامید فراهم آوردند. این مطالعه نشان داد که انتخاب صحیح شرایط کروماتوگرافی و فرآیند آماده سازی نمونه، نقش تعیین کننده ای در کاهش خطاهای کمی سازی دارد (۱۸).

در مطالعه ی دیگری، تالوایا و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی آکریلامید و مشتقات مرتبط در خاک های اصلاح شده با هیدروژل ها پرداختند و با استفاده از LC-MS/MS موفق به اندازه گیری مقادیر بسیار کم (۰/۰۰۱ تا ۱ میکروگرم بر میلی لیتر) شدند. این روش با بازیابی قابل قبول (۷۰-۱۲۰٪) و دقت مناسب (%RSD > ۲۰) نشان داد که LC-MS/MS قابلیت کمی سازی ردیابی آکریلامید در ماتریس های پیچیده مانند خاک را نیز دارد و می تواند در ارزیابی ریسک محیطی استفاده شود (۱۹).

همچنین، پارتا و همکاران (۲۰۲۳) با توسعه ی روش LC-QqQ-MS/MS، شناسایی آکریلامید در محصولات غذایی آماده مصرف کودک را ممکن ساختند. بازیابی بالای ۱۰۰-۱۰۸٪ و محدودیت کمی سازی ۲۰ میکروگرم بر کیلوگرم، این روش را برای تحلیل های روتین و پایش استانداردهای اتحادیه اروپا مناسب نشان داد. نتایج این مطالعه نشان داد که آکریلامید در ۱۳٪ محصولات میوه ای و ۳۷٪ محصولات گوشتی یا سبزیجاتی یافت شد و در برخی نمونه ها، مقادیر بالاتر از حد مجاز اتحادیه اروپا بود، که اهمیت پایش مداوم و استفاده از روش های دقیق را برجسته می کند (۲۰).

با توجه به اهمیت کاهش آکریلامید به عنوان یک آلاینده ی بالقوه سرطان زا در مواد غذایی، تحقیقات اخیر به توسعه و ارزیابی فناوری ها و رویکردهای مؤثر در کاهش میزان این ماده متمرکز شده اند. مطالعات اخیر نشان می دهند که استفاده از رویکردهای آنزیمی و فناوری های

محصولات خمیری است. این مطالعه بر اهمیت توسعه فرموله‌های پایدار و مقرون به صرفه آنزیم برای کاربرد در سطح صنعتی تأکید دارد (۲۱).

مطالعه‌ی کالابرس و همکاران (۲۰۲۴) نیز کاربرد L-آسپاراژیناز در کاهش آکریلامید در نان خانگی را بررسی کرد. نتایج نشان داد استفاده از ۳۰۰ واحد بر کیلوگرم آسپاراژیناز می‌تواند کاهش ۷۸٪ در محتوای آکریلامید ایجاد کند، که با سطح مرجع اتحادیه اروپا (۵۰ میکروگرم بر کیلوگرم) مطابقت داشت و هیچ تأثیری بر خصوصیات ظاهری و رنگ محصول ندارد. این یافته‌ها، اثربخشی آنزیم در مواد غذایی پخته و غنی از نشاسته را تأیید می‌کند (۲۲).

از سوی دیگر، فناوری‌های نوین مبتنی بر نانو نیز امکان پایش سریع و حساس آکریلامید را فراهم می‌کنند. مطالعه آفریا و همکاران (۲۰۲۵) یک نانوسنسور بر پایه نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و Graphene Quantum Dots را ارائه کرد که قابلیت تشخیص آکریلامید در محدوده‌ی ۱۰ نانومولار تا ۲۰۰ نانومولار را با حساسیت بسیار بالا و حد تشخیص ۰/۶۷ داشت. این سیستم با استفاده از مواد کم‌هزینه و پایدار، امکان سنجش سریع و انتخابی آکریلامید را در محل تولید یا آزمایشگاه فراهم می‌آورد (۲۳).

به‌طور تحلیلی، ترکیب رویکردهای آنزیمی و فناوری‌های نانو، هم کاهش واقعی آکریلامید در مواد غذایی و هم پایش دقیق آن را امکان‌پذیر می‌سازد. روش‌های آنزیمی، به ویژه L-آسپاراژیناز، برای کاهش آکریلامید در محصولات غنی از نشاسته و سیب‌زمینی بسیار مؤثر هستند و می‌توانند به راحتی در فرآیندهای صنعتی و خانگی اعمال شوند. فناوری‌های مبتنی بر نانو، با ارائه‌ی حد تشخیص پایین و پاسخ سریع، ابزار ارزشمندی برای کنترل کیفیت و پایش ایمنی غذایی فراهم می‌آورند. در مجموع، این مطالعات بر ضرورت توسعه یک رویکرد ترکیبی شامل کاهش آنزیمی و پایش پیشرفته تأکید دارند تا کنترل آکریلامید در زنجیره‌ی غذایی به شکل مؤثر و قابل اعتماد انجام شود.

چشمگیری دارد. این تفاوت ناشی از نوع ماده‌ی اولیه (میزان آسپاراژین و قندهای احیاء)، شرایط فرآیند حرارتی (دما، زمان و روش پخت)، و عادات غذایی هر کشور است. در اغلب کشورها، بیشترین غلظت آکریلامید در محصولات سرخ‌شده‌ی سیب‌زمینی و قهوه‌ی فوری مشاهده شده است (بیش از ۲۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم در مواردی مانند کلمبیا و برزیل). در مقابل، نان، برنج و سس‌ها معمولاً غلظت‌های کمتر از ۱۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم دارند. در ایران نیز وضعیت مشابهی گزارش شده و محصولات سرخ‌کردنی صنعتی و بیسکویت‌ها بیشترین آلودگی را نشان می‌دهند. این یافته‌ها تأکید می‌کند که راهبردهای کاهش آکریلامید باید به‌صورت اختصاصی برای هر گروه غذایی و متناسب با الگوی مصرف هر کشور تدوین شود.

مخاطرات زیست‌محیطی و بهداشتی آکریلامید

مطالعات محیطی نشان داده‌اند که در برخی نمونه‌های آب آشامیدنی، آب سطحی و پساب‌های صنعتی، غلظت آکریلامید فراتر از حدود مجاز تعیین‌شده توسط سازمان‌های بین‌المللی است. برای نمونه، مقادیر تا ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در برخی مناطق ژاپن و ۹۲ میلی‌گرم بر لیتر در رودخانه‌ای در سوئد گزارش شده که در مقایسه با حداکثر مقدار مجاز این ماده در آب آشامیدنی، یعنی ۰/۵ میکروگرم بر لیتر بر اساس استاندارد سازمان جهانی بهداشت و صفر بر اساس سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده^۱، قابل تأمل است (۳۱).

ویژگی پایداری شیمیایی بالای آکریلامید در محیط آبی، به‌ویژه در شرایط کم‌نور و دمای پایین، موجب می‌شود تجزیه‌ی زیستی آن به‌کندی انجام پذیرد. زمان تجزیه‌ی زیستی این ترکیب در منابع آبی بسته به شرایط می‌تواند از چند روز تا بیش از ۴۰ روز متغیر باشد. علاوه بر این، حضور مواد ضدعفونی‌کننده مانند کلر

جدول ۱. مقایسه میزان آکریلامید در مواد غذایی مختلف در ایران و سایر کشورها

ردیف	کشور-سال	نوع مواد غذایی بررسی شده	محدوده یا میانگین آکریلامید (میکروگرم بر کیلوگرم)	نکات کلیدی و یافته ها	منبع
۱	ایران-۲۰۲۰	۱۹۵ نمونه شامل (نان های سنتی و صنعتی، کیک و بیسکویت، شیرینی و شکلات، محصولات پزیایه سیب زمینی و ذرت، قهوه، انواع آجیل و تنقلات، پیتزا و سوسیس و کالباس)	۱۲۵۰-۲۰	بیشترین میزان در چیپس و بیسکویت، کمترین در نان سنتی.	(۳۳)
۲	کره جنوبی- ۲۰۰۶	جو و ذرت پرشته، چیپس، نودل	۳۲۴۱-۱۲	پالانترین میزان در چیپس سیب زمینی، نودل زیر ۳۷ میکروگرم بر کیلوگرم دما اثر بیشتری از زمان پخت تشکیل داشت.	(۳۴)
۳	برزیل- ۲۰۰۷	۱۹ گروه غذایی شامل چیپس، قهوه، نان	کمتر از ۲۵۲۸-۲۰	بیشترین میزان در سیب زمینی سرخ کرده و قهوه قوری، کمترین در محصولات ذرت و کاساوا.	(۳۵)
۴	رومانی- ۲۰۲۱	قهوه، چیپس، پرتزل، نان	۱۹۹-۱۴	بیشترین در قهوه (۱۹۹)، سیس چیپس (۱۳۴)، نان کمترین میزان را داشت (۱۴).	(۶)
۵	ایتالیا- ۲۰۱۵	بیسکویت و غلات صبحانه	۹۴۰-۳۰	۹۵/۵٪ بیسکویت ها آلوده، ۲۲.۷٪ پالانتر	

میزان کاربرد این پلیمر بین ۲۵ تا ۵۰ کیلوگرم در هکتار متغیر است. شکل‌های متفاوت PAM (گرانول خشک، بلوک جامد، یا امولسیون مایع) می‌تواند به طرق مختلف راه‌یابی به محیط زیست داشته باشد. نبود نظارت کافی بر مصرف و دفع این ترکیبات، موجب شده است که در صورت عدم کنترل صحیح، PAM ها و به تبع آن آکریلامید منشأ آلودگی منابع آب و خاک گردند (۵۰).

صنعت خمیر و کاغذ

در صنعت خمیر و کاغذ، مصرف آب طی سال‌های اخیر کاهش یافته اما پساب حاصل هم‌چنان حاوی ترکیبات مضر از جمله آکریلامید است. در فرآیند تصفیه و لخته‌سازی پساب این صنعت، استفاده از PAM رایج است که می‌تواند باعث نشت مقادیر قابل توجهی از آکریلامید گردد. طبق بررسی‌ها، غلظت آکریلامید در آب فرآیندی کارخانه‌های کاغذسازی تا ۴/۴۵ میکروگرم بر لیتر و در فاضلاب تصفیه‌شده شهری حدود ۴/۱۷ میکروگرم بر لیتر گزارش شده است (۵۱، ۵۲).

شواهد جهانی و نمونه‌های مستند در منابع آبی

مطالعات متعدد نشان‌دهنده حضور آکریلامید در منابع آب مختلف هستند. به‌طور نمونه، آب آشامیدنی جمع‌آوری‌شده از لوله‌های گروت‌شده با آکریلامید در ژاپن، دارای غلظتی تا ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بود که چالشی جدی از منظر ایمنی عمومی ایجاد کرد (۱۱، ۳۱). هم‌چنین، در سوئد و در پایین‌دست احداث تونل در منطقه‌ی وادباکن^۲، غلظت آکریلامید تا ۹۲ میلی‌گرم بر لیتر در آب رودخانه ثبت شد که نشان‌دهنده‌ی ریسک نشت مستقیم آکریلامید از عملیات ساختمانی به محیط‌های آبی است (۴۵). افزون بر این، اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در بریتانیا و دیگر کشورها در پساب صنعت

نتایج این مطالعات بر ضرورت تدوین مقررات سخت‌گیرانه‌تر و توسعه فناوری‌های تصفیه مؤثرتر آکریلامید در آب و خاک تأکید دارد. مصرف چشمگیر پلی‌آکریلامید در صنایع مختلف، فقدان مدیریت مناسب پسماند و کاربری ناصحیح، به نشت مداوم آکریلامید به منابع آب و خاک انجامیده است. این موضوع، تهدیدی جدی برای سلامت عمومی و محیط زیست است و نیازمند همکاری بین‌بخشی، به‌روزرسانی الزامات قانونی و به‌کارگیری رهیافت‌های فناورانه و نظارتی روزآمد می‌باشد.

روش‌های شناسایی و پایش آکریلامید

شناسایی و اندازه‌گیری دقیق آکریلامید در نمونه‌های غذایی و محیطی، یکی از ارکان اصلی مدیریت ریسک و کنترل این آلاینده در زنجیره غذا و محیط‌زیست محسوب می‌شود. ویژگی‌های شیمیایی آکریلامید مانند قطبیت بالا، جرم مولکولی پایین و ناپایداری نسبی، چالش‌هایی را در فرایند تجزیه و شناسایی این ماده ایجاد می‌کند (۵۳). به همین دلیل، توسعه و به‌کارگیری روش‌های تحلیلی پیشرفته، به‌ویژه در کشورهای دارای استانداردهای سخت‌گیرانه مانند هلند، بریتانیا و استرالیا، بسیار مهم تلقی شده و منجر به تدوین راهبردهای ملی و بین‌المللی تنظیم مجاز آکریلامید در مواد غذایی و آب آشامیدنی گردیده است (۵۴).

شناسایی آکریلامید با کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی (GC-MS)

یکی از روش‌های نسبتاً متداول برای شناسایی و اندازه‌گیری آکریلامید، استفاده از کروماتوگرافی گازی همراه با طیف‌سنجی جرمی (GC-MS) است. با توجه به ماهیت قطبی و فراریت پایین آکریلامید، آنالیز مستقیم این ترکیب با GC ممکن نیست و معمولاً به مشتق‌سازی شیمیایی (برم‌دار کردن) نیاز است تا مولکول آکریلامید به مشتقاتی نظیر ۲،۳-دی‌بروموپروپیون‌آمید تبدیل شده و در نتیجه قابلیت بالاتری برای تفکیک کروماتوگرافی و شناسایی جرمی پیدا کند (۵۵). این واکنش با استفاده

در بخش جداسازی، ستون‌های فاز معکوس نظیر Atlantis، Hypercarb و Primisphere C18-HC. dC18 نقش مهمی در جداسازی سریع و انتخاب‌پذیر آکرلامید دارند (۶۲). همچنین ستون‌های تبادل یونی مانند IonPac ICE-AS1 برای افزایش تفکیک پذیری در ماتریس‌های پیچیده به کار رفته‌اند (۶۳).

روش LC-MS/MS به علت حذف مرحله مشتق‌سازی، دقت و صحت بالاتر و حساسیت بسیار زیاد (در حد نانوگرم بر لیتر)، روش انتخابی آزمایشگاه‌های تحلیلی پیشرفته است و عمدتاً برای پایش‌های گسترده و ملی توصیه می‌شود (۶۴). محدودیت‌های اصلی عبارت‌اند از هزینه بالای تجهیزات، نیاز به اپراتور ماهر، اثر تداخلات ماتریسی و وابستگی زیاد نتایج به کیفیت مراحل استخراج و پاک‌سازی.

در مقابل، روش‌های LC-MS/MS و LC-QqQ-MS/MS با حساسیت و دقت بالاتر، امکان شناسایی آکرلامید حتی در ماتریس‌های پیچیده مانند غذاهای آماده کودک، محصولات قهوه، غلات و حتی خاک اصلاح‌شده با هیدروژل‌ها را فراهم می‌کنند. فرآیند آماده‌سازی نمونه در این روش‌ها ساده‌تر بوده و با کنترل تداخلات تحلیلی، نتایج معتبر و قابل اعتماد ارائه می‌دهد.

LC-QqQ-MS/MS به‌ویژه برای نمونه‌های با مقادیر بسیار کم آکرلامید مناسب است و با محدودیت کمی‌سازی پایین، توانایی پایش دقیق مواد غذایی با الزامات استانداردهای اتحادیه اروپا را دارد (۶۶، ۶۷). در جدول ۳ مقایسه‌ای از روش‌های کروماتوگرافی گازی و مایع برای شناسایی آکرلامید آورده شده است.

جدول ۲. مقادیر گزارش شده آکرلامید در منابع آبی در کشورهای مختلف

کشور	منبع یا نوع نمونه	غلظت آکرلامید گزارش شده (میکروگرم بر لیتر)	توضیحات
------	-------------------	--	---------

جدول ۳. مقایسه روش‌های کروماتوگرافی گازی (GC) و مایع (LC) برای شناسایی آکریلامید (۲۰، ۶۲، ۶۸، ۶۹)

ویژگی	LC (Liquid Chromatography)	GC (Gas Chromatography)
مکانیزم پایه	جداسازی مبتنی بر حل شدن نمونه در فاز مایع و عبور از ستون کروماتوگرافی	جداسازی مبتنی بر تبخیر نمونه و عبور بخار از ستون کروماتوگرافی
دتکتورهای متداول	MS/MS (Triple Quadrupole Mass Spectrometry), QqQ-MS, DAD, UV	NPD (Nitrogen Phosphorus Detector), MS (Mass Spectrometry), FPD (Flame Photometric Detector)
محدوده حساسیت	حساسیت بالاتر نسبت به GC برای ماتریس‌های پیچیده	میکروگرم بر کیلوگرم تا میلی‌گرم بر کیلوگرم
دقت و قابلیت اطمینان	بسیار بالا، مناسب برای نمونه‌های پیچیده، خاک، محصولات کودک و غذاهای فرآوری‌شده	بالا، مخصوصاً در نمونه‌های غذایی با ماتریس ساده‌تر
نمونه‌های مناسب	غذاهای پیچیده، نوشیدنی‌ها، محصولات کودک، خاک و نمونه‌های حاوی ماتریس‌های متنوع	چپس، نان، سیب‌زمینی سرخ‌کرده، غذاهای حرارت‌دیده با ماتریس نسبتاً ساده
مزایا	- حساسیت و دقت بسیار بالا - توانایی شناسایی آکریلامید در ماتریس‌های پیچیده - امکان اندازه‌گیری همزمان چند ترکیب مشابه (مانند N,N-acrylic acid, methylene bis-acrylamide)	- روش استاندارد و شناخته‌شده - هزینه پایین‌تر تجهیزات نسبت به LC-MS/MS - جداسازی خوب ترکیبات فرار
معایب	- هزینه بالاتر تجهیزات و نگهداری - پیچیدگی بیشتر فرآیند آماده‌سازی نمونه - نیاز به کالیبراسیون دقیق و کنترل تداخل‌های ماتریسی	- نیاز به مشتق‌سازی برای آکریلامید به دلیل

پیش‌فرآوری و استفاده از آنزیم‌ها را به‌صورت کمی ارزیابی کنند (۷۵، ۷۶).

استراتژی‌های حرارتی جایگزین و بهینه‌سازی شرایط پخت نیز مکمل اقدامات پیش‌فرآوری و آنزیمی هستند. به‌عنوان مثال، کاهش دمای پخت، تغییر زمان فرآیند و اعمال روش‌های حرارتی نوین مانند پخت در خلأ یا استفاده از فرکانس رادیویی و مایکروویو، می‌تواند تشکیل آکریلامید را بدون آسیب جدی به کیفیت محصول کاهش دهد (۷۷، ۷۸).

جعبه‌ابزار آکریلامید (Acrylamide Toolbox)

یکی از موفق‌ترین نمونه‌های اقدامات صنعت غذا در این حوزه، تدوین «جعبه‌ابزار آکریلامید» است که توسط Food Drink Europe و با مشارکت شرکت‌های پیشرو اروپایی طراحی و در سال‌های اخیر به نسخه ۲۰۱۹ ارتقاء یافته است (۷۹). جعبه‌ابزار، راهنما و مجموعه‌ای عملیاتی بر مبنای شواهد علمی و تجارب صنعتی ارائه می‌دهد که اقدامات کاهش‌دهنده آکریلامید را در قالب محورهای زیر طبقه‌بندی کرده است (۸۰، ۸۱):

۱. کشاورزی و مواد اولیه: انتخاب ارقام و شرایط

نگهداری گیاهان با محتوای پایین قندهای احیاءکننده و آسپاراژین از طریق اصلاح نژاد، مدیریت برداشت و ذخیره.

۲. فرمولاسیون: افزودن اسیدها (سیتریک،

آسکوربیک)، نمک‌ها (کلسیم) و آمینواسیدهای جایگزین برای کاهش تشکیل آکریلامید.

۶. افزودن این آنزیم، که به‌ویژه در تولید فرآورده‌های سیب‌زمینی و نان اثربخش است.

کنترل کیفیت محصول نهایی: بکارگیری آزمون‌های رنگ به‌عنوان شاخص غیرمستقیم شدت واکنش میلارد و جداسازی اپتیکی محصولات با رنگ خیلی تیره از خط تولید.

نکته کلیدی در استفاده از این ابزار، ماهیت ترکیبی و مکمل بودن رویکردهای پیشنهادی است و هیچ راهکاری به طور مطلق برای همه‌ی محصولات قابل کاربرد نیست. هم‌چنین این راهبردها باید متناسب با ویژگی‌ها و فرمولاسیون هر محصول تنظیم شوند تا از کاهش بیش از حد کیفیت حسی و ارگانولپتیک جلوگیری شود. بنابراین، جعبه‌ابزار آکریلامید نمونه‌ای علمی و عملیاتی از راهبردهای موفق مشارکتی صنعت غذا در کاهش آلاینده‌های نوظهور با حفظ مسئولیت اجتماعی و ارتقاء ایمنی غذایی است (۵۴).

پروژه Heatox رویکرد علمی اروپا

پروژه Heatox که در قالب ششمین برنامه چارچوب تحقیق و توسعه اروپا و با همکاری ۲۴ آزمایشگاه از ۱۴ کشور اجرا شد، نقاط عطفی در شناسایی مکانیسم تشکیل، ارزیابی ریسک و ارائه راهکارها برای کنترل ترکیبات سمی ناشی از حرارت‌دهی غذا، به‌ویژه آکریلامید رقم زد (۸۲).

گرچه بخشی از پروژه روی سایر آلاینده‌های حرارتی متمرکز بود، اما توجه ویژه به آکریلامید، تحلیل نقش ترکیب مواد اولیه، شرایط فرآیند و راهبردهای مؤثر در کاهش آن را ممکن ساخت (۸۳). یافته‌های Heatox تأکید دارند که با وجود امکان کاهش جدی آکریلامید، حذف کامل آن از رژیم غذایی عملاً غیرممکن است و رویکرد واقع‌بینانه، کاهش تا حد معقول این آلاینده است.

اصل "تا حد معقول قابل دستیابی" در مدیریت کاهش آکریلامید (As Low As Reasonably Achievable)

یکی از مفاهیم کلیدی برگرفته از اقدامات علمی و اجرایی، اصل

جدول ۴. مقایسه فناوری‌ها و رویکردهای کاهش آکریلامید (۸۷-۸۹)

فناوری / روش کاهش	مزایا	محدودیت‌ها	اثرگذاری نسبی / ملاحظات عملی
Acrylamide Toolbox (EFSA)	چارچوب عملی برای تولیدکنندگان، شامل راهنمای کاهش آکریلامید در مواد غذایی، مبتنی بر شواهد علمی و تجارب صنعتی	نیازمند پیروی کامل از پروتکل‌ها، اثرگذاری متغیر بر مواد مختلف	اثرگذاری بالا در کاهش آکریلامید در محصولات فرآوری شده، اما نیازمند آموزش اپراتورها و نظارت دقیق
استفاده از آنزیم L - آسپاراژیناز	کاهش مؤثر آکریلامید در محصولات غنی از آسپاراژین، سازگار با فرآیند پخت، حفظ کیفیت حسی	هزینه نسبتاً بالا، حساسیت به دما و pH، نیازمند کنترل دقیق فرآیند	اثرگذاری قابل توجه در محصولات آردی و سیب‌زمینی، مناسب برای صنایع بزرگ و تولید صنعتی
کاهش دمای پخت و تغییر زمان	ساده، قابل اعمال در خطوط تولید، بدون نیاز به تجهیزات پیچیده	ممکن است کیفیت حسی محصول (رنگ، طعم، بافت) کاهش یابد	اثرگذاری متوسط، نیاز به تعادل بین ایمنی غذایی و کیفیت محصول
فرآیند پیش‌فرآوری (soaking یا blanching)	کاهش پیش‌سازهای آکریلامید، روش ساده و کم‌هزینه، قابل اعمال در محصولات سیب‌زمینی و غلات صبحانه	ممکن است مواد مغذی و طعم از دست برود، اثر محدود در محصولات با ماتریس پیچیده	اثرگذاری متوسط، مناسب برای محصولات صنعتی و خانگی، مکمل سایر روش‌ها
نانوحسگرها و روش‌های پایش نوین	پایش سریع و حساس، کاهش زمان و هزینه اندازه‌گیری، امکان ارزیابی اثربخشی اقدامات کاهش	در حال توسعه، نیازمند استانداردسازی و	

سازمان جهانی بهداشت (WHO)، به همراه FAO و کمیته مشترک (JECFA)، گزارش‌های جامعی درباره ارزیابی ریسک و دستورالعمل‌های بهداشتی ارائه کرده است (۵۱). بر اساس آخرین ارزیابی JECFA، مقدار دریافت غذایی آکریلامید در بسیاری از رده‌های سنی از سطح نگرانی سلامت تجاوز می‌کند. در زمینه کیفیت آب آشامیدنی نیز، WHO مقدار راهنمایی ۰/۵ میکروگرم بر لیتر آکریلامید را به عنوان حد مجاز توصیه می‌کند که با استاندارد اروپایی هم‌راستا است (۹۳).

استاندارد، مقررات و قوانین ملی ایران

در ایران تا کنون استاندارد ملی مشخصی برای حد مجاز آکریلامید در مواد غذایی وجود ندارد و سیاست‌گذاری‌های فعلی عمدتاً بر اساس الگوبرداری از رهنمودهای بین‌المللی (WHO، EU، FDA) استوار است. با این حال، پژوهش‌های داخلی نشان داده‌اند که میزان آکریلامید در برخی محصولات غذایی و منابع آبی کشور عمدتاً در محدوده‌ی پایین‌تر از حدود بین‌المللی است، اما نیاز به پایش‌های دوره‌ای، استانداردسازی و تدوین مقررات صریح ملی جهت مدیریت ریسک وجود دارد (۳۳، ۹۴-۹۷). در حوزه‌ی آب آشامیدنی نیز، با توجه به نبود استاندارد اختصاصی داخلی، معمولاً از مقادیر راهنمایی جهانی (۱/۰ تا ۰/۵ میکروگرم بر لیتر) پیروی می‌شود. مطالعات داخلی همچون بررسی‌های انجام‌شده در بازار تهران و ارزیابی خطر در نان، بیسکویت و آب آشامیدنی، بر لزوم تدوین مقررات و تقویت نظام پایش تاکید داشته‌اند (۳۳، ۹۵-۹۷). هرچند هنوز تفاوت‌هایی بین رویکردهای منطقه‌ای و الزامات قانونی وجود دارد، روند جهانی به سمت سخت‌گیرانه‌تر شدن مقررات و تشویق الزام صنایع به رعایت اصل ALARA و جعبه‌ابزار کاهش آکریلامید حرکت می‌کند. در این راستا، پایش مستمر و تطبیق با دانش روز و شرایط بومی، زیرساخت‌های اساسی مدیریت این آلاینده در سطح ملی و جهانی محسوب می‌شود.

۴: پیشنهادات برای تحقیقات و اقدامات آینده

می‌شود.

تعارض منافع: نویسندگان اظهار می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع با یکدیگر ندارند.

حمایت مالی: هیچ‌گونه حمایت مالی برای این مطالعه وجود ندارد.

ملاحظات اخلاقی: کلیه ملاحظات اخلاقی از جمله عدم سرقت ادبی، انتشار دواگان، تحریف داده‌ها و داده‌سازی در این مطالعه رعایت شده است. با توجه به عدم ثبت به عنوان طرح تحقیقاتی، دارای کد اخلاق نمی‌باشد.

سهم نویسندگان: جناب آقای دکتر مهدی اسدی- قاله‌ری در ایده‌ی ایده‌ی پژوهشی و طراحی مطالعه، جناب آقای دکتر محمدابراهیم غفاری در نگارش، بازبینی و مرور و آقای دکتر علی صالحی در طراحی مطالعه، جمع‌آوری داده‌ها و نگارش مقاله همکاری کرده‌اند.

References

1. Kaur, N. and N.G. Halford, Reducing the risk of acrylamide and other processing contaminant formation in wheat products. *Foods*, 2023. 12(17): p. 3264. <https://doi.org/10.3390/foods12173264> PMID:37685197 PMCID:PMC10486470
2. Barroso, P.J., et al., Emerging contaminants in the atmosphere: Analysis, occurrence and future challenges. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2019. 49(2): p. 104-171. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1540761>
3. Xu, X., et al., The relationship between acrylamide and neurodegenerative diseases: gut microbiota as a new intermediate cue. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024: p. 1-13.
4. Maan, A.A., et al., Acrylamide formation and different mitigation strategies during

- Environmental Monitoring and Assessment, 2022. 194(12): p. 875.
<https://doi.org/10.1007/s10661-022-10569-9>
PMid:36227428 PMCID:PMC9558033
13. Godwin Uranta, K., et al., Studying the effectiveness of polyacrylamide (PAM) application in hydrocarbon reservoirs at different operational conditions. *Energies*, 2018. 11(9): p. 2201.
<https://doi.org/10.3390/en11092201>
14. Hasan, G.A., A.K. Das, and M.A. Satter, Detection of acrylamide traces in some commonly consumed heat-treated carbohydrate-rich foods by GC-MS/MS in Bangladesh. *Heliyon*, 2022. 8(10).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11092>
PMid:36276720 PMCID:PMC9583123
15. Karami, M., et al., 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*, 2024. 104(13): p. 3016-3025.
<https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2076225>
16. AL-Hammadi, M.M., et al., Optimization, validation, and application of a quantitative gc/npd method for acrylamide determination in yemeni fried fish samples. *Sana'a University Journal of Applied Sciences and Technology*, 2023. 1(4).
<https://doi.org/10.59628/jast.v1i4.698>
17. Skinner, M.M., et al., Instrumentation for routine analysis of acrylamide in French fries: assessing limitations for adoption. *Foods*, 2021. 10(9): p. 2038.
<https://doi.org/10.3390/foods10092038>
PMid:34574148 PMCID:PMC8469642
18. Desmarchelier, A., et al., Towards a consensus LC-MS/MS method for the determination of ac

- and Pollution Research, 2021. 28(13): p. 15627-15645. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12775-3> PMID:33548042
29. Sáez-Hernández, R., et al., Determination of acrylamide in toasts using digital image colorimetry by smartphone. Food Control, 2022. 141: p. 109163. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109163>
30. Liyanage, D.W., et al., Processing strategies to decrease acrylamide formation, reducing sugars and free asparagine content in potato chips from three commercial cultivars. Food control, 2021. 119: p. 107452. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107452>
31. Tepe, Y. and A. Çebi, Acrylamide in environmental water: a review on sources, exposure, and public health risks. Exposure and Health, 2019. 11(1): p. 3-12. <https://doi.org/10.1007/s12403-017-0261-y>
32. Yaylayan, V.A. and R.H. Stadler, Acrylamide formation in food: a mechanistic perspective. Journal of AOAC International, 2005. 88(1): p. 262-267. <https://doi.org/10.1093/jaoac/88.1.262> PMID:15759750
33. Nematollahi, A., et al., Acrylamide content of collected food products from Tehran's market: A risk assessment study. Environmental science and pollution research, 2020. 27(24): p. 30558-30570. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09323-w> PMID:32468359
34. Koh, B.-K., Determination of acrylamide content of food products in Korea. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2006. 86(15): p. 2587-2591.

controlled release of anticancer drug. *Int J Biol Macromol*, 2019. 124: p. 1220-1229.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.045> PMID:30529202

47. Flanagan, D.C., et al., Using polyacrylamide to control erosion on agricultural and disturbed soils in rainfed areas. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003. 58(5): p. 301-311.

<https://doi.org/10.1080/00224561.2003.12457547>

48. Koh, J.K., et al., Recent advances of modified polyacrylamide in drilling technology. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022. 215: p. 110566.

<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110566>

49. Vermolen, E.C., et al., Pushing the Envelope for Polymer Flooding Towards High-temperature and High-salinity Reservoirs with Polyacrylamide Based Ter-polymers, in SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. 2011. p. SPE-141497-MS.

<https://doi.org/10.2118/141497-MS>

50. Sojka, R.E., et al., Polyacrylamide in Agriculture and Environmental Land Management, in *Advances in Agronomy*, D.L. Sparks, Editor. 2007, Academic Press. p. 75-162.

2024. 17(11): p. 1540-1549.
<https://doi.org/10.1007/s12161-024-02676-9>
63. Della Posta, S., et al., Miniaturized matrix solid-phase dispersion assisted by deep eutectic solvent for acrylamide determination in bread samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2025. 417(7): p. 1261-1269.
<https://doi.org/10.1007/s00216-024-05315-8> PMID:38740590
64. Negoită, M., et al., Development of SPE clean-up procedure for acrylamide determination from potato-based products by GC-MS/MS. *Open Agriculture*, 2020. 5(1): p. 305-316 <https://doi.org/10.1515/opag-2020-0039>
65. Kim, S.H., J.-H. Hwang, and K.-G. Lee, Analysis of acrylamide using gas chromatography-nitrogen phosphorus detector (GC-NPD). *Food Science and Biotechnology*, 2011. 20(3): p. 835-839.
<https://doi.org/10.1007/s10068-011-0116-4>
66. Prata, R., et al., Determination of Acrylamide in Commercial Baby Foods by LC-QqQ-MS/MS: a Simple Method for Routine Analyses. *Food Analytical Methods*, 2023. 16(8): p. 1413-1421.
<https://doi.org/10.1007/s12161-023-02510-8>
67. Ferrer-Aguirre, A., et al., Simple and Fast Determination of Acrylamide and Metabolites in Potato Chips and Grilled Asparagus by Liquid Chromatography Coupled to Mass Spectrometry. *Food Analytical Methods*, 2016. 9(5): p. 1237-1245.
<https://doi.org/10.1007/s12161-015-0304-6>
<

80. Delatour, T. and R.H. Stadler, Two decades of research in dietary acrylamide: What do we know today. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023. 63(33): p. 12169-12177.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2099344> PMID:35852101
81. Marta, M., J.M. Francisco, and D.-A. Cristina, Acrylamide in biscuits commercialised in Spain: a view of the Spanish market from 2007 to 2019. *Food & Function*, 2019. 10(10): p. 6624-6632.
<https://doi.org/10.1039/C9FO01554J> PMID:31553344
82. Spivey, A., A Matter Of Degrees: Advancing Our Understanding of Acrylamide. *Environmental Health Perspectives*, 2010. 118(4): p. A160-A167.
<https://doi.org/10.1289/ehp.118-a160>
83. Keramat, J., et al., Acrylamide in Baking Products: A Review Article. *Food and Bioprocess Technology*, 2011. 4(4): p. 530-543. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0495-1>
84. Acrylamide in Foods Generated through Heating (Contaminants). *Food Saf (Tokyo)*, 2016. 4(3): p. 74-88.
<https://doi.org/10.14252/foodsafetyfscj.2016013s> PMID:32231909 PMCid:PMC6989166
85. Adimas, M.A., et al., Traditional food processing and Acrylamide formation: A review. *Heliyon*, 2024. 10(9).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30258> PMID:38720707 PMCid:PMC11076960
86. Kalash, N., et al., An exploratory study to assess the knowledge, attitudes and practices of Lebanese residents towards ac