Journal of Arak University of Medical Sciences
Volume 29, Issue 3
August & September 2026

Review Article

Application of Artificial Intelligence in Rapid Detection of Mycotoxins and Food Safety Enhancement

Seyed Abolfazl Hasheminia[1, 2], Ali Bakhtiari Sardari[1, 2], Afsane Vaezi[*1]

[1] Department of Laboratory Sciences, School of Allied Medical Sciences, Iran University of medical sciences, Tehran, Iran
[2] Student Research Committee, School of Allied Medical Sciences, Iran University of medical sciences, Tehran, Iran

*** Corresponding author**: Afsane Vaezi, Department of Laboratory Sciences, School of Allied Medical Sciences, Iran University of medical sciences, Tehran, Iran. Email: vaeziiafsane@gmail.com

DOI: 10.61882/jams.29.3.296

How to Cite this Article:
Hasheminia SA, Bakhtiari Sardari A, Vaezi A. Application of Artificial Intelligence in Rapid Detection of Mycotoxins and Food Safety Enhancement. *J Arak Uni Med Sci*. 2026;**29**(3): 296- 303. DOI: 10.61882/jams.29.3.296

Received: 09.11.2025
Published: 01.08.2026
Keywords:
Artificial intelligence;
Food Contamination;
Fungi;
Mycotoxin Detection

© 2024 Arak University of Medical Sciences

Abstract

Introduction: Mycotoxins are secondary metabolites produced by certain fungal species, primarily belonging to the genera Aspergillus, Fusarium, Alternaria, and Penicillium. They are important natural contaminants of food and agricultural products, including maize, peanuts, tree nuts, cereals, fruits, and animal feed. Mycotoxins threaten human and animal health, adversely affect agricultural productivity, and cause substantial economic losses. Aflatoxin, ochratoxin, trichothecenes, fumonisin, zearalenone and patulin are some of the main mycotoxins affecting food and agricultural products. Although, mycotoxin-producing fungi are usually identified by biological methods, most mycotoxins are identified and quantified by traditional methods based on analytical chemistry.

Methods: These methods are time-consuming, laborious, costly, and unstable due to the diversity of the sampling process of different products. This study was conducted to investigate recent advances and applications of artificial intelligence (AI) in the detection, prediction and measurement of mycotoxin contamination. The integration of advances in computer science and AI with spectroscopy and imaging technologies have overcome the limitations of traditional methods.

Conclusions: AI techniques, using advanced algorithms, are able to detect mycotoxins with high accuracy and efficiency in various types of agricultural products. However, the use of AI in mycotoxin detection requires diverse data and appropriate computational infrastructure. Future research should focus on developing more optimized algorithms, integrating multi-source data, and practical implementation of these technologies in industrial environments to ensure food safety.

Copyright *© 2024 The Author(s); Published by Journal of Arak University of Medical Sciences. This is an open access article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http"//creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) witch permits others to copy and redistribute material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cited.*

مقاله مروری

کاربرد هوش مصنوعی در تشخیص سریع مایکوتوکسین‌ها و بهبود ایمنی مواد غذایی

سیدابوالفضل هاشمی‌نیا[۱،۲]، علی بختیاری سردری[۱،۲]، افسانه واعظی*[۱]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم آزمایشگاهی، دانشکده پیراپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران
[۲] کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده پیراپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران

* نویسنده مسئول: افسانه واعظی، گروه علوم آزمایشگاهی، دانشکده پیراپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.
ایمیل: vaeziiafsane@gmail.com

DOI: 10.61882/jams.29.3.296

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۸
تاریخ چاپ: ۱۴۰۵/۰۵/۱۰

واژگان کلیدی:
آلودگی موادغذایی؛
تشخیص مایکوتوکسین؛
قارچ؛
هوش مصنوعی

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی اراک محفوظ است.

چکیده

مقدمه: مایکوتوکسین‌ها، به عنوان متابولیت‌های ثانویه ازمهم‌ترین آلاینده‌های طبیعی محصولات غذایی و محصولات کشاورزی مانند ذرت، بادام زمینی، آجیل، غلات، میوه‌جات و گندم و خوراک دام می‌باشند که عمدتاً توسط بسیاری از گونه‌های خاصی از جنس آسپرژیلوس، فوزاریوم، آلترناریا و پنیسیلیوم ساخته می‌شوند که علاوه بر به خطر انداختن سلامتی، سلامت انسان و حیوانات، آسیب های جبران‌ناپذیر و اثرات نامطلوبی جدی را به کشاورزی و اقتصاد را سبب می‌شوند. آفلاتوکسین، اکراتوکسین، تریکوتسن، فومونیزین، زرالنون و پاتولین برخی از مایکوتوکسین‌های اصلی مؤثر برمحصولات غذایی و کشاورزی هستند. در حالی که قارچهای تولیدکننده مایکوتوکسین معمولاً با روش‌های بیولوژیکی شناسایی می‌شوند اما بیشترمایکوتوکسین‌ها با روش‌های سنتی مبتنی بر شیمی تحلیلی شناسایی و تعیین مقدار می‌گردند.

روش کار: مطالعه حاضر بر روی تکنیک‌های غیرتخریبی تصویربرداری و طیف‌سنجی از جمله تصویربرداری فراطیفی، طیف‌سنجی رامان، طیف‌سنجی مادون قرمز و همچنین فناوری‌های مبتنی بر نانو برای شناسایی آلودگی‌ها می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ادغام پیشرفت‌های حوزه کامپیوتر و هوش مصنوعی با فناوری‌های طیف‌سنجی و تصویربرداری، توانسته است محدودیت‌های روش‌های سنتی را رفع کند.

نتیجه‌گیری: تکنیک‌های هوش مصنوعی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته، قادرند مایکوتوکسین‌ها را با دقت و کارآیی بسیار بالایی در گونه‌های مختلف محصولات کشاورزی شناسایی کنند. اگرچه استفاده از هوش مصنوعی در تشخیص مایکوتوکسین‌ها نیازمند داده‌های متنوع و زیرساخت‌های محاسباتی مناسب است. تحقیقات آینده باید بر توسعه الگوریتم‌های بهینه‌تر، ادغام داده‌های چندمنبعی و پیاده‌سازی عملی این فناوری‌ها در محیط‌های صنعتی متمرکز شوند تا ایمنی مواد غذایی تضمین گردد.

ارجاع: هاشمی‌نیا سیدابوالفضل، بختیاری سردری علی، واعظی افسانه. کاربرد هوش مصنوعی در تشخیص سریع مایکوتوکسین‌ها و بهبود ایمنی مواد غذایی. *مجله دانشگاه علوم پزشکی اراک* ۱۴۰۵؛ ۲۹ (۳): ۲۹۶- ۳۰۳.

مقدمه

شیوع عفونت‌های قارچی در طی ۳-۲ دهه گذشته به واسطه افزایش روزافزون بیماران بدخیمی، دریافت کنندگان پیوند، نوتروپنی، کموتراپی، کورتیکواستروئیدتراپی، بیماران با نقص ایمنی اکتسابی (ایدز) یا ایمنی سرکوب شده، جمعیت مسن، دیابت و چاقی افزایش چشمگیری داشته است (۳-۱).

مایکوتوکسین‌ها گروهی از ترکیبات شیمیایی سمی طبیعی می‌باشند که بیشتر این متابولیت‌های ثانویه سمی توسط گونه‌های خاصی از قارچها که تولیایی تولید عفونت‌های قارچی دارند تولید می‌شود. از جمله قارچهای بیماری‌زا میتوان از گونه‌های آسپرژیلوس، پنیسیلیوم، فوزاریوم، آلترناریا و کلاویسپس نام برد. این قارچها در همه جا حضور دارند و در طیف گسترده‌ای از محصولات کشاورزی و غذایی مختلفی مانند: غلات، آجیل، ادویه‌ها، قهوه، لبنیات، نوشیدنی و میوه‌های خشک‌شده و خوراک دام مانند سبوس گندم، پوسته نخود فرنگی و دانه ذرت و خاک یافت می‌گردند (۶-۴). رشد مشخص و واضح گونه‌های قارچی در میزبان‌های انسانی و حیوانی، بیماری‌هایی را ایجاد می‌کنند که در مجموع مایکوزیس نامیده می‌شوند، در حالی که مواجه با متابولیت‌های سمی قارچی از طریق بلع، رژیم غذایی، تنفسی، تماس پوستی و سایر موارد، باعث مایکوتوکسیکوزیس می‌شود (۵، ۷). قرار گرفتن در معرض مایکوتوکسین‌ها، با اثرات مضر حاد (مانند سمیت کبدی و کلیوی) و پیامدهای سمی مزمن (سرطان کبد، اثرات نفروتوکسیک و سرکوب سیستم ایمنی) مرتبط می‌باشد (۵، ۷، ۸). تولید مایکوتوکسین‌ها می‌تواند در زنجیره غذایی در مراحل قبل از برداشت، برداشت، خشک کردن و در طی ذخیره‌سازی محصولات کشاورزی در شرایط مطلوب رطوبت و دما رخ دهد. همچنین شیوه‌های نامناسب برداشت و کشاورزی، شرایط نامناسب خشک کردن، جابجایی، بسته‌بندی، ذخیره‌سازی و حمل و نقل، رشد قارچها و خطر تولید مایکوتوکسین‌ها را افزایش می‌دهد (۳، ۸، ۹).

شایع‌ترین مایکوتوکسین‌ها شامل آفلاتوکسین (AFs (Aflatoxins، تریکوتسن (THs (Trichothecenes، فومونیزین (FBs (Fumonisins، زرالنون (ZEA (Zearalenone، اکراتوکسین (OTs (Ochratoxins و پاتولین (PAT (Patulin هستند که برای سلامتی انسان و دام خطرات قابل توجهی را ایجاد می‌کنند (۵، ۱۰-۱۲).

آلودگی مایکوتوکسین‌ها و شیوع بالای قارچ‌های تولیدکننده مایکوتوکسین در مواد غذایی و محصولات کشاورزی و خوراک دام در مناطق مختلف جغرافیایی در سراسر جهان متفاوت است و اغلب در کشورهای کمتر توسعه یافته قابل مشاهده می‌باشد. علت این امر عمدتاً به دلیل نوسانات زیاد در شرایط آب و هوایی، شیوه‌های کشاورزی ضعیف، شرایط نامناسب نگهداری و کاربرد ضعیف صنایع فناوری فرآوری مواد غذایی می‌باشد (۱۳-۱۵). با توجه به این مهم که زنجیره تأمین مواد غذایی جهان به شدت به هم پیوسته و ارتباط دارند، وجود مایکوتوکسین‌ها نه تنها سلامت انسان و حیوانات را به خطر می‌اندازد، بلکه بر ثبات بازارهای کشاورزی و تجارت نیز اثر پررنگی می‌گذارد. تأثیر اقتصادی آلودگی مایکوتوکسین‌ها قابل ملاحظه می‌باشد و تخمین جهانی برای شناسایی، اجرای مقررات و تلاش‌هایی که برای مدیریت کاهش حضور مایکوتوکسین‌ها در مواد غذایی و خوراک دام انجام می‌پذیرد سالانه میلیاردها یورو است (۸، ۱۶، ۱۷). از این‌رو دانشمندان و محققان و سازمان‌های مختلف، مانند سازمان غذا و داروی آمریکا (Food and Drug FDA (Administration، سازمان ایمنی مواد غذایی اروپا (European EFSA (Food Safety Authority و کمیته Codex Alimentarius، برای تنظیم این مایکوتوکسین‌ها به منظور کاهش مواجه و تضمین ایمنی مواد غذایی، با یکدیگر همکاری می‌نمایند (۱۸). در نتیجه، تشخیص و مدیریت مایکوتوکسین‌ها در محصولات کشاورزی و مواد غذایی برای تضمین ایمنی مواد غذایی و محافظت از سلامت مصرف‌کنندگان در سراسر جهان و همچنین کمک به ثبات اقتصادی بسیار مهم و حائز اهمیت می‌باشد. طبق روش استاندارد، تشخیص مایکوتوکسین‌ها شامل سه مرحله اصلی: نمونه‌برداری، آماده‌سازی نمونه و تعیین تحلیلی است (۱۹). از جمله پرکاربردترین روش‌های تحلیلی برای تشخیص مایکوتوکسین‌ها می‌توان به تکنیک‌های کروماتوگرافی مانند کروماتوگرافی مایع (High-performance liquid chromatography) HPLC و کروماتوگرافی گازی (Gas chromatography) GC و ترکیب آن‌ها با طیف‌سنجی جرمی (LC-MS و GC-MS) اشاره کرد. این روش‌ها معمولاً همراه با روش‌های مبتنی بر سنجش ایمنی مانند سنجش‌های ایمونوسوربنت متصل به آنزیم (ELISA)، ایمونواسی شیمیایی لومینسانس و رادیوایمونواسی به کار می‌روند؛ اما این روش‌ها پرهزینه و زمان‌بر هستند و به پرسنل آموزش‌دیده و تجهیزات و وسایل پیشرفته نیازمندند. همچنین این روش‌ها شامل مراحل آماده‌سازی نمونه، استخراج و خالص‌سازی پیچیده‌ای هستند که با توجه به ماهیت متنوع و پیچیده محصولات غذایی مختلف نیاز به روش‌های تشخیصی مخصوص دارد که خود می‌تواند به پیچیدگی غربالگری بیفزاید و همراه با تجزیه و تحلیل‌های متنوع و با خطا بالا باشد (۲۰-۲۴).

روش‌های تشخیصی متداول مانند LC-MS، HPLC، GC-MS و ELISA داده‌ها و نتایج قابل اعتمادی را می‌توانند تولید کنند اما اغلب منجر به مجموعه داده‌های بزرگ و پیچیده‌ای می‌شوند که نیازمند تفسیر و تحلیل گسترده هستند. در سال‌های اخیر رویکردهای حوزه هوش مصنوعی AI (Artificial intelligence) و یادگیری ماشینی (Machine learning) ML به عنوان روش جایگزین برای تشخیص و پیش‌بینی وجود مایکوتوکسین‌ها افزایش پیدا کرده است. هوش مصنوعی و یادگیری ماشینی، به روش‌ها و تکنیک‌های محاسباتی آماری مختلفی اشاره دارند که برای ایجاد الگوریتم‌هایی استفاده می‌شوند که به کامپیوترها اجازه می‌دهند داده‌ها را ارزیابی و از آنها یاد بگیرند و بر اساس الگوها و استنتاج‌های شناسایی‌شده ظرفیت تصمیم‌گیری تقریباً مستقل از انسان‌ها را پیدا کنند و تصمیم‌گیری انجام دهند. بدون آن‌که بخواهند به طور صریح برای هیچ کار خاصی برنامه‌ریزی شده باشند (۲۵-۲۷). با استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشینی، محققان می‌توانند دانش و درک عمیق‌تری نسبت به داده‌های حاصل کسب نمایند و در مقایسه با تجزیه و تحلیل روش‌های آزمایشگاهی قدیمی، از نظر کارایی، هزینه و همچنین حفظ و بهبود دقت تشخیص مایکوتوکسین‌ها، مزایا قابل توجهی ارائه دهند و با فعال کردن تشخیص و ردیابی پیشرفته مایکوتوکسین‌ها در ماتریس‌های غذایی، امکانات بهبود ایمنی مواد غذایی را گسترش دهند (۲۶، ۲۸-۳۰). هدف از این بررسی، مرور پیشرفت‌های فعلی در کاربردهای هوش مصنوعی مورد استفاده برای تشخیص و پیش‌بینی و اندازه‌گیری آلودگی مایکوتوکسین‌ها در طیف وسیعی از محصولات غذایی و کشاورزی است. این مطالعه، ادغام هوش مصنوعی با پلتفرم‌های تحلیلی متنوع، از جمله طیف‌سنجی و تکنیک‌های تصویربرداری، را برای افزایش کارآیی، قابلیت اطمینان و سرعت تجزیه و تحلیل مایکوتوکسین ها بررسی می‌کند.

روش کار

در مطالعه حاضر با استفاده از جستجو در پایگاه‌های داده‌های PubMed، ScienceDirect، Scopus، Google Scholar با استفاده از کلیدواژه‌های «هوش مصنوعی»، «تشخیص مایکوتوکسین»، «آلودگی موادغذایی»، «قارچ»، «تصویربرداری فراطیفی» و ...، کلیه مقالات مرتبط طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ استخراج شد. تمامی مقالات یافت شده بر اساس عناوین و چکیده غربالگری گشتند، جهت حذف موارد تکراری و نامرتبط مقالات بازیابی شدند و درآخر مطابق با معیارهای مطالعه، متن کامل مقالات منتخب بررسی گردید تا اطلاعات استخراج شود. داده‌های کلیدی شامل نوع الگوریتم هوش مصنوعی مورد استفاده، نوع محصول غذایی یا کشاورزی هدف، روش تحلیلی ادغام شده (مانند طیف‌سنجی یا تصویربرداری) و دقت یا کارایی مدل، استخراج شد و برای تحلیل نهایی انتخاب گردید به عنوان مثال: ("Artificial Intelligence"[MeSH] AND "Hyperspectral Imaging"[MeSH] AND "Food Mycotoxins"[MeSH] AND "Fungi"[MeSH]) Contamination به دلیل تنوع روش‌شناسی و الگوریتم‌های استفاده شده در مطالعات، انجام متاآنالیز کمی امکان‌پذیر نبود. بنابراین، نتایج به صورت کیفی و بر اساس تکنیک‌های تشخیصی (طیف‌سنجی، تصویربرداری، حسگرها) دسته‌بندی گردیدند.

یافته‌های حاصل از مرور مطالعات

کاربردهای هوش مصنوعی در تشخیص و پیش‌بینی آلودگی مایکوتوکسین‌ها

تکنیک‌های هوش مصنوعی می‌توانند مزایای فراوانی، مانند مقرون به

صـرفه و قابل اطمینان بودن، توانایی مدیریت عدم قطعیت و زمان پردازش را درچندین کاربرد ارائه دهند (۳۱). کاربردهای هوش مصنوعی اغلب همواره به دسترسی به مجموعه داده‌های بزرگ و با کیفیت مناسب و بالا نیازمند است. مفهوم هوش مصـنوعی (AI) این اسـت که یک سـیسـتم مبتنی بر فناوری شامل ابزارها و شبکه‌های پیشرفته مختلفی است که می‌توانند هوش انسانی را تقلید کنند (۳۲). تکنیک‌های یادگیری ماشـین را می‌توان به طور کلی به سه دسته تقسیم کرد: یادگیری نظارت‌شده (Supervised learning) SL، یادگیری بدون نظارت (Unsupervised learning) UL و یادگیری تقویتی (Reinforcement learning) RL. در یادگیری نظارت‌شده، یک الگوریتم با استفاده از یک مجموعه داده که شامل ورودی‌ها و خروجی‌ها است، آموزش داده می‌شـود. مدل یاد می‌گیرد که ورودی‌ها را با خروجی‌ها مرتبط کند. سـپس بعد از آموزش، مدل این رابطه آموخته‌شـده را برای پیش‌بینی خروجی‌ها و ورودی‌های جدید و دیده نشـده اعمال می‌نماید. در یادگیری بدون نظارت، یک الگوریتم فقط با داده‌های ورودی ارائه می‌شـود و الگوها و ساختارهای موجود در داده‌ها را تنها بر اساس ورودی‌ها شناسایی می‌نماید. سـپس بعد از آموزش، ورودی‌های جدید را بر اسـاس الگوهایی که قبلا فراگرفته اسـت، طبقه‌بندی می‌کند. در یادگیری تقویتی، یک الگوریتم می‌آموزد که با انجام اقداماتی برای دستیابی به یک هدف، بتواند تصمیم‌گیری کند. این الگوریتم بازخورد را از طریق پاداش‌ها یا جریمه‌های مرتبط با اقدامات خود پردازش می‌کند و از این اطلاعات برای توسـعه یک چارچوب تصـمیم‌گیری که هدف آن به حداکثر رسـاندن پاداش‌ها اسـت، بهره می‌برد (۳۳). یادگیری ماشـینی برای تشـخیص مایکوتوکسـین‌ها، از منابع علمی در اسـتفاده از انواع داده‌های مختلف، از جمله پارامترهای آب و هوایی (دما، بارندگی و رطوبت نسـبی)، فنولوژی محصـول، اطلاعات زراعی محصـولات و تصـویربرداری طیفی تأکید دارند. همچنین، داده‌های که شـامل اطلاعات جمع‌آوری‌شـده در طول زمان و در مکان‌های مختلف هسـتند، با ترکیب متغیرهای کلیدی محیطی، نقش مهمی در شناخت، فهم و پیش‌بینی آلودگی مایکوتوکسین‌ها ایفا می‌کنند (۳۰).

الگوریتم‌های یادگیری ماشـین شـامل تکنیک‌های اسـت که برای مدیریت داده‌های ساختاریافته طراحی شده‌اند. ماشین‌های بردار پشتیبان (Support vector machines) SVM، جنگل تصادفی(Random forest) RF، گرادیان تقویتی (Gradient boosting) GB، درخت‌های تصـمیم‌گیری(Decision trees) DT، شـبکه‌های عصـبی مصـنوعی (Artificial neural networks) ANNs از جمله این تکنیک‌ها هسـتند (۳۴). به عنوان مثال مدل‌های یادگیری ماشـینی می‌توانند اطلاعات زمانی آب و هوا را سریعا برای پیش‌بینی احتمال آلودگی مایکوتوکسین‌ها استفاده کنند. با کمک یک مدل شـبکه عصـبی کانولوشـنی بر اساس میزان تنفس CO_2 و مشـاهده شـکل ظاهری تشـکیل قارچ‌ها برای طبقه‌بندی آلودگی مایکوتوکسـین در دانه‌های گندم ذخیره شـده در ظروف دربسـته را با دقت بیش از ۸۰ درصـد ارائه نمودند (۳۵). در یک مدل دیگر، منابع داده‌ای متعددی از جمله سوابق زمانی (Time series data) TSD آفلاتوکسین و فومونیزین، شرایط روزانه آب و هوایی، تصاویر ماهواره‌ای، ویژگی‌های مکانی خاک و اطلاعات کاربری زمین، برای پیش‌بینی سـطح مایکوتوکسـین در ذرت مورد اسـتفاده قرار گرفت. این داده‌ها با اسـتفاده از ماشـین تقویت گرادیان (Gradient boosting machine) GBM و یک شـبکه عصـبی هوش مصنوعی پردازش شدند و سطح مایکوتوکسین در یک دوره یک‌ساله پیش‌بینی شد. دقت پیش‌بینی بیش از ۷۰ درصد برای آفلاتوکسین و ۸۵ درصـد برای فومونیزین گزارش گردید (۳۶). داده‌های مربوط به عوامل زراعی که شـامل جزئیات محصـولات قبلی، اسـتفاده از قارچ‌کش‌ها و آفت‌کش‌ها و الگوهای کشت است به عنوان متغیرهای ورودی در مدل‌های ماشـین تقویت گرادیان برای پیش‌بینی آفلاتوکسـین‌ها و فومونیزین‌ها در ذرت استفاده شدند (۳۷).

ادغام هوش مصنوعی با پلتفرم‌های تحلیلی متنوع برای افزایش کارآیی، قابلیت اطمینان، سرعت تجزیه و تحلیل مایکوتوکسین‌ها

ادغام هوش مصنوعی با تکنیک‌های تصویربرداری برای تجزیه و تحلیل مایکوتوکسین‌ها، نویدبخش بهبود دقت، سرعت و سازگاری تشخیص بوده است. در طول چند دهه گذشته، صنعت فرآوری موادغذایی، از سیستم‌های بینایی کامپیوتری CVSs (Computer vision systems) با تکنیک‌های طیف‌سنجی برای شناسایی و تعیین کمیت آلودگی‌های مختلف در غلات، آجیل و محصـولات آنها اسـتفاده کرده اسـت (۳۸). از این‌رو روش‌های تشخیص و تعیین مقدار مایکوتوکسین باید بسیار حساس باشند و این قابلیت باید به اندازه چند قسـمت در میلیارد (Parts per billion) ppb باشـد، زیرا کشـورهای مختلف محدودیت‌های مختلفی در تنظیم مقدار مایکوتوکسـین دارند. با این حال، اکثر روش‌های فعلی تشـخیص و تعیین مقدار مایکوتوکسـین مخرب، زمان‌بر و پرهزینه می‌باشـد و با چالش‌هایی مربوط به تنوع نمونه‌برداری ناشـی از توزیع ناهموار آلودگی در نمونه‌های فله مواجه می‌باشند (۳۹).

فناوری‌های نوظهور شـامل تصـویربرداری فراطیفی، بینی الکترونیکی، حسـگرهای زیسـتی مبتنی بر آپتامر، پلیمرهای قالب‌گیری مولکولی، رویکردهای مبتنی بر نانوذرات، تصویربرداری (Red-green-blue (RGB imaging) RGB، اشـعه ایکس، طیف‌سـنجی فلورسـانس، تصـویربرداری نزدیک به مادون قرمز مرئی رویکردهای مورد استفاده اولیه برای شناسایی مایکوتوکسین‌های مختلف در غلات و آجیل هستند که با الگوریتم یادگیری ماشین ترکیب شده‌اند (۴۰). علاوه بر تصویربرداری، هوش مصنوعی به طور فزاینده‌ای با طیف‌سـنجی جرمی و کروماتوگرافی برای تجزیه و تحلیل مایکوتوکسـین ادغام می‌شـود. هوش مصـنوعی در تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های بزرگ و پیچیده تولید شده از این پلتفرم‌ها شناسایی را افزایش و به کاهش زمان تجزیه و تحلیل داده‌ها کمک می‌کند (۴۱). یکی از قدرتمندترین رویکرد تصـویربرداری برای تشـخیص مایکوتوکسـین‌ها با اسـتفاده از یادگیری ماشـینی، تصـویربرداری فراطیفی (Hyperspectral imaging) HSI است که می‌تواند خواص شـیمیایی غذاهای کشـاورزی و محصـولات غذایی را توصـیف کند. این تکنیک، اکثرا برای شـناسـایی مایکوتوکسـین‌ها در دانه‌های غلات، بادام، بادام زمینی، پسته، گندم و ذرت استفاده می‌شود (۴۲). تصویربرداری فراطیفی ویژگی‌های طیفی مختلفی را در طول موج‌های متفاوت برای تشخیص مایکوتوکسـین‌ها درغلات و آجیل ارائه می‌دهد. بسته به کاربردها، یک سیستم تصویربرداری فراطیفی می‌تواند محدوده طیفی خاصـی را در ناحیه فرابنفش (Ultraviolet) UV، طول موج‌های کلیدی در نواحی مرئی مادون قرمز نزدیک (Vis-NIR) و مادون

قرمز موج کوتاه (SWIR) را پوشش دهد که با خواص شیمیایی مایکوتوکسین‌های مختلف همبستگی دارند (۴۳). این فناوری تجزیه و تحلیل طیفی را با قابلیت‌های تصویربرداری فضایی ادغام و برای تولید ده‌ها یا حتی صدها باند طیفی باریک برای هر پیکسل مکانی استفاده می‌نماید و پوشش طیفی پیوسته را امکان‌پذیر می‌سازد. درطی مراحل اولیه آلودگی، ظاهر خارجی محصولات کشاورزی (مانند رنگ، بافت و مورفولوژی) تفاوت قابل توجهی با حالت عادی آنها نشان نمی‌دهد، اما تغییرات ترکیب داخلی از بدو آلودگی در حال رخ دادن بوده است. در طول فرآیند کپک زدن، تولید سموم قارچی مانند آفلاتوکسین، دئوکسی نیوالنول و زیرالنون منجر به تغییرات ساختاری مولکولی در داخل محصول می‌شود که به نوبه خود بر بازتاب طیفی آن اثرمی‌گذارد. بنابراین، وجود و تغییرات غلظت در این سموم، ویژگی‌های بازتاب طیفی خاصی را در مناطق طیفی منحصر به فرد ایجاد می‌کند که فناوری فراطیفی با تشخیص بازتاب طیفی محصولات کشاورزی، امکان نظارت سریع و غیرمخرب بر محتوای سم را برای تشخیص زودهنگام آلودگی ناشی از قارچها فراهم می‌کند (۴۳). طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک (Spect-NIR) در محدوده ۷۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر، به‌دلیل توانایی آن در بررسی ارتعاشات مولکولی پیوندهای O–H، C–H و N–H در ترکیبات آلی، به‌عنوان ابزاری قدرتمند در شناسایی و مدیریت آلودگی‌های غذایی مطرح شده است. این تکنیک قادر است تغییرات شیمیایی ناشی از آلودگی از جمله تغییر در محتوای کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و آب را که در طول فرایند کلونیزاسیون پاتوژن‌ها رخ می‌دهد، شناسایی کند (۴۴). به عنوان مثال طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک، با شناسایی تغییرات طیفی مشخصه در طول موج‌های ۱۲۰۰ نانومتر و ۱۴۵۰ نانومتر مرتبط با تخریب نشاسته، با دقت بیش از ۹۰ درصد، دانه‌های گندم سالم و آلوده به فوزاریوم را با موفقیت از هم متمایز کرده است (۴۵). طیف‌سنجی رامان (Raman spectroscopy) RS بر اساس اصل پراکندگی غیرالاستیک عمل می‌کند و اطلاعات ارتعاشی پیوند شیمیایی را به وسیله تجزیه و تحلیل تغییرات فرکانس ناشی از برهمکنش‌های بین نور فرودی (Incident light) IL و ارتعاشات مولکولی کسب می‌نماید. علاوه براین، این تکنیک حساسیت بالایی به پیوندهای غیرقطبی مانند C-C ، S-S و همچنین ساختارهای مولکولی متقارن نشان می‌دهد. این ویژگی‌ها به تجزیه و تحلیل غیرمخرب محصولات غذایی با رطوبت بالا، از جمله نوشیدنی‌ها و محصولات کشاورزی تازه کمک می‌کند. طیف‌سنجی رامان هنگامی که با استخراج ویژگی مبتنی بر یادگیری عمیق ادغام می‌شود، از طریق مهندسی بستر نانومقیاس به تقویت سیگنال قابل توجهی دست می‌یابد و امکان غربالگری سریع آفت‌کش‌ها و مایکوتوکسین‌ها در سطح ناچیز را فراهم می‌کند (۴۶). ترکیب تصویربرداری فراطیفی با طیف‌سنجی رامان تقویت‌شده سطحی (Surface-enhanced raman spectroscopy) SERS، تصویربرداری اجزای ماکرومقیاس و تجزیه و تحلیل مولکولی میکرومقیاس را با هم ترکیب می‌کند و با ترکیب اطلاعات چندمقیاسی از طریق مدل‌های یادگیری عمیق چندوجهی، حساسیت تشخیص بقایای آفت‌کش‌ها و مایکوتوکسین‌ها را افزایش می‌دهد و غربالگری سریع، دقیق و غیرمخرب محصولات غذایی با رطوبت بالا مانند نوشیدنی‌ها و محصولات تازه، امکان‌پذیر می‌گردد. طیف‌سنجی فلورسانس (Fluorescence FS (spectroscopy با نظارت برعبورهای سطح انرژی الکترونیکی و ثبت سیگنال‌های انتشار مشخص، حساسیت فوق‌العاده‌ای در تشخیص ترکیبات حاوی پیوندهای دوگلنه مزدوج یا حلقه‌های آروماتیک، از جمله ویتامین B2، کلروفیل و هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای دارد. فناوری فلورسانس با تفکیک زمانی، از طریق تحریک پالسی که خودفلورسانس کوتاه‌مدت را از انتشارهای هدف با عمر طولانی متمایز می‌کند، ویژگی تحلیلی را افزایش می‌دهد و امکان تعیین دقیق سموم کمیاب در ماتریس‌های پیچیده را فراهم می‌کند. اگر این فناوری با الگوریتم‌های مدل‌سازی متوالی ترکیب شود، می‌تواند به‌صورت پویا بر تغییرات ناشی از تخریب آدنوزین تری‌فسفات (ATP) در محصولات آبزی نظارت کند و در عین حال ارزیابی بلادرنگی از کاهش کیفیت میوه‌ها و سبزیجات در طول نگهداری ارائه دهد (۴۷).

یک حس‌گر زیستی (Biosensor) یک ابزار تحلیلی پیشرفته است که از گیرنده‌های زیستی مانند آنزیم‌ها، آنتی‌بادی‌ها، اندامک‌ها، بافت‌ها و سلول‌ها تشکیل شده است و با مبدل‌های مختلفی از جمله اجزای الکتروشیمیایی، نوری، پیزوالکتریک و حرارتی، بسته به طراحی خاص حسگر زیستی، متصل می‌شود. بخش گیرنده زیستی که به عنوان آشکارساز نیز شناخته می‌شود، دارای یک جایگاه انتخابی است که قادر به تشخیص آنالیت هدف و تبدیل بالقوه آن به محصولات است (۴۸). تکنیک‌های حس‌گرهای زیستی فلورسانس به دلیل عملکرد آسان، زمان تحلیلی کوتاه و خولندن راحت سیگنال، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. فلورسانس، پدیده‌ای که شامل جذب و انتشار مجدد فوتون‌ها توسط اتم‌ها یا مولکول‌ها در طول موج‌های بلندتر است، اساس حسگرهای فلورسانس را تشکیل می‌دهد. الکتروشیمی‌لومینسانس (ECL) که همچنین به عنوان کمی‌لومینسانس القاشده به‌وسیله فرایندهای الکتروشیمیایی شناخته می‌شود، نوعی از حس‌گرهای زیستی نوری است که نسبت به سایر روش‌های نوری، مزایای بالقوه‌ای ارائه می‌دهد. مهم‌ترین مزیت این روش آن است که نیازی به منبع نور خارجی برای تحریک ندارد. این ویژگی، سیستم اندازه‌گیری را ساده‌تر کرده و تأثیر آلودگی را حذف می‌کند؛ در نتیجه، اثر لومینسانس پس‌زمینه و نور پراکنده ناشی از ناخالصی‌ها را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. بسته به نوع عناصر حس‌گر به کار رفته، حسگرهای زیستی ECL را می‌توان به سه گروه: حس‌گرهای مبتنی بر آنتی‌بادی‌ها، آپتامرها وهمچنین پلیمرهای قلب‌گیری مولکولی طبقه‌بندی کرد (۴۹، ۵۰). آپتامرها مولکول‌های کوتاه و تک‌رشته‌ای DNA یا RNA (ssDNA یا ssRNA) هستند که می‌توانند به طور انتخابی به یک هدف خاص، از جمله پروتئین‌ها، مولکول‌های کوچک، سموم و حتی سلول‌های زنده متصل شوند. آپتامرها برخلاف آنتی‌بادی‌ها، به دما حساس نیستند و از نظر شیمیایی پایدارمی‌باشند. اتصال نانوذرات با خواص فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فرد به انتهای رشته‌های DNA، پتانسیل قابل‌توجهی برای افزایش کارایی تابش الکتروشیمی‌لومینسانس در حس‌گرهای زیستی دارد. این قابلیت، توجه زیادی را به حسگرهای زیستی مبتنی بر آپتامر (B-AB) به‌عنوان ابزارهایی نویدبخش برای تشخیص کمی مایکوتوکسین‌ها جلب کرده است (۵۰). یک دستگاه هوشمند مبتنی بر حس‌گر به نام سیستم بینی الکترونیکی (Electronic nose) EN برای تشخیص و طبقه‌بندی بوهای پیچیده با استفاده از حسگرهای غیرانتخابی

جدول ۱. تکنیک‌های هوش مصنوعی در تشخیص مایکوتوکسین‌ها در مواد غذایی

تکنیک هوش مصنوعی/ روش تحلیلی	محصول هدف	پارامترها/ ویژگی‌ها	نتایج کلیدی
شبکه عصبی کانولوشنی (CNN)	گندم (ذخیره شده)	میزان تنفس و شکل ظاهری قارچ	طبقه‌بندی آلودگی با دقت بیش از ۸۰٪
ماشین تقویت گرادیان (GBM) + شبکه عصبی	ذرت	داده‌های هواشناسی، تصاویر ماهواره‌ای، ویژگی‌ها و بافت خاک	پیش‌بینی سطح آفلاتوکسین (دقت بیش از ۷۰٪) و فومونیزین (دقت ۸۵٪)
ماشین تقویت گرادیان (GBM)	ذرت	جزئیات محصولات قبلی، قارچ‌کش‌ها، الگوهای کشت	پیش‌بینی آفلاتوکسین و فومونیزین با استفاده از عوامل زراعی و مدل‌سازی دقیق ریسک آلودگی بر اساس مدیریت مزرعه
تصویربرداری فراطیفی (HSI) + یادگیری ماشین	غلات و آجیل (بادام، پسته، گندم، ذرت)	بازتاب طیفی در نواحی UV، Vis-NIR، SWIR	تشخیص زودهنگام تغییرات شیمیایی داخلی و نظارت سریع قبل از تغییر ظاهری
طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک (NIR)	گندم (آلوده به فوزاریوم)	تغییرات طیفی در ۱۲۰۰ و ۱۴۵۰ نانومتر (تخریب نشاسته)	تشخیص اثربخش در تفکیک گندم سالم از آلوده با دقت بیش از ۹۰٪
طیف‌سنجی رامان (RS) + یادگیری عمیق	محصولات با رطوبت بالا (نوشیدنی تازه)	سیگنال‌های پراکندگی ناشی (Inelastic scattering) IES؛ پیوندهای C-C، S-S	افزایش چشمگیر حساسیت تشخیص و غربالگری سریع
حسگر زیستی الکتروشیمی لومینسانس (ECL)	مواد غذایی مختلف	سیگنال‌های لومینسانس القاشده به‌وسیله فرآیندهای الکتروشیمیایی	کاهش اثرات پس‌زمینه و آلودگی؛ استفاده از آپتامرها برای افزایش پایداری شیمیایی
سیستم بینی الکترونیکی (EN)	محصولات کشاورزی	تشخیص ترکیبات آلی فرار (VOCs) منتشر شده از بافت آلوده	تشخیص زودهنگام و غیرتهاجمی عفونت‌های بیماری‌زا، افزایش بهره‌وری کشاورزی
پلیمرهای قالب‌گیری مولکولی (MIP)	پلتفرم‌های حسگری (نوری/الکتروشیمیایی)	حفره‌های پلیمری سه‌بعدی با خاصیت آفلینی برای آنالیت هدف	افزایش انتخاب‌پذیری و اثربخشی حسگرها در تشخیص هدفمند سموم

مختلف ساخته شده است. سیستم بینی الکترونیکی از سیستم بویایی انسان الهام گرفته شده که کاربردهای متنوعی از جمله ارزیابی کیفیت مواد غذایی، نظارت بر محیط زیست و افزایش ایمنی دارد. این سیستم‌ها با استفاده از مجموعه‌ای از حسگرهای گازی، بویایی انسان را تقلید کرده و ترکیبات آلی فرار (VOCs (Volatile organic compounds منتشر شده توسط گیاهان را در پاسخ به عفونت‌های بیماری‌زا تشخیص می‌دهند. بینی الکترونیکی از طریق توانایی خود در تشخیص دقیق بوهای منتشر شده توسط گیاهان آلوده، یک رویکرد تشخیص غیرتهاجمی و زودهنگام ارائه می‌دهد که می‌تولند به کاهش شیوع عوامل بیماری‌زای گیاهی و افزایش بهره‌وری کشاورزی کمک کند (۵۱). پلیمرهای قالب مولکولی (Molecularly imprinted polymers) MIPs چندمنظوره هستند و می‌توانند بسته به هدف، برای تشخیص نمونه‌های آنالیت تنظیم شوند. فرآیند اساسی تهیه پلیمرهای قالب مولکولی معمولاً شامل پیش‌پلیمریزاسیون، پلیمریزاسیون و شستشوی مولکول‌های قالب است. در نهایت، از روش‌های فیزیکی یا شیمیایی برای حذف مولکول‌های قالب استفاده می‌شود. بنابراین، پلیمرهای سه‌بعدی با حفره‌های ثابت که شکل و عملکرد مولکول‌های قالب را برای تشخیص تکمیل می‌کنند، به دست می‌آیند (۵۲). اثربخشی روش‌های پیش‌فرآوری، حسگرهای الکتروشیمیایی و نوری را می‌توان با تهیه پلیمرهای قالب مولکولی و گنجاندن آنها به عنوان عناصر تشخیص در پلتفرم‌های مختلف حسگری، بررسی و بهینه کرد. یافته‌های مطالعه و تکنیک‌های هوش مصنوعی به صورت خلاصه در جدول ۱ نشان داده شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

مایکوتوکسین‌ها، همچنان به عنوان یک تهدید جدی برای سلامت عمومی و ثبات اقتصادی هستند که مستلزم اقدامات قاطع و صحیح برای تشخیص و مدیریت آنها می‌باشد. نوآوری‌های مداوم درروش‌های هوش مصنوعی درصنایع غذایی و کشاورزی برای تشخیص مایکوتوکسین‌ها با استفاده از تکنیک‌های تحلیلی، مانند حسگرهای زیستی، فناوری نانو، بینی‌های الکترونیکی وتصویربرداری فراطیفی و رویکردهای یادگیری ماشینی، برای تضمین دقت و قابلیت اطمینان ضروری هستند وعملکرد تکنیک‌های تشخیص را به طرز چشمگیری بهبود بخشیده‌اند. نتایج این مطالعه براستفاده گسترده از تکنیک‌های هوش مصنوعیاز جمله یادگیری ماشین (ML) و یادگیری عمیق (Deep learning) DL، برای شناسایی و تعیین مقدار مایکوتوکسین‌ها در دسته‌های مختلف مواد غذایی تأکید دارد. در طول دهه گذشته، تکنیک‌های مختلف هوش مصنوعی، توانسته‌اند مایکوتوکسین‌ها را با دقت و کارآیی بالا در گونه‌های مختلف محصولات کشاورزی مانند بادام زمینی، گندم، ذرت، برنج و جو و سایر موارد تشخیص دهند. با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌های قابل توجهی همچنان وجود دارد، ازجمله پیچیدگی فرآیندهای محاسباتی، شناسایی و نیازهای منابع برخی از الگوریتم‌های هوش مصنوعی مانع ازاستفاده عملی آنها در محیط‌های با منابع محدود می‌شود، کیفیت و تنوع داده‌ها و قابلیت تعمیم مدل‌های هوش مصنوعی در محیط‌ها و ماتریس‌های غذایی متنوع و بودجه ناکافی برای تامین تجهیزات زیرساختی جهت بهره‌مندی از منابع هوش مصنوعی مانع آن می‌شود. برای پرداختن به این چالش‌ها، یک رویکرد چندوجهی شامل همکاری بین محققان، نهادهای نظارتی و سازمان های مربوطه در بهبود روش‌های تحلیلی برای تشخیص دقیق، سریع و زود هنگام و مقرون به‌صرفه بودن مایکوتوکسین‌ها و استفاده از تجهیزات و زیرساخت‌های فناوری‌های مبتنی برهوش مصنوعی مورد نیاز است. که منجر به بهبود تضمین ایمنی و کیفیت محصولات غذایی و کشاورزی، کاهش بارزیست‌محیطی و مدیریت آلودگی‌ها به شیوه‌ای پیشگیرانه و پایداری سلامت و بهداشت عمومی می‌گردد. اگرچه پیشرفت‌های اخیر در زمینه هوش مصنوعی امکان شناسایی زود هنگام و غیرمخرب مایکوتوکسین‌ها را فراهم می‌کند، اما به داده‌های متنوع و زیرساخت محاسباتی مناسب نیاز دارد. تحقیقات آینده باید بر توسعه الگوریتم‌های بهینه، ادغام چند منبع داده و کاربرد عملی در محیط‌های صنعتی، به منظور ایمنی مواد غذایی و بهره‌وری اقتصادی، تمرکز یابد.

تشکر و قدردانی

نویسـندگان از هیچ فرد یا سـازمانی برای انجام این پژوهش حمایت مالی یا کمک ویژه‌ای دریافت نکرده‌اند.

سهم نویسندگان

تمامی نویسندگان در تمامی قسمت‌های مقاله نقش داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان تصدیق می‌کنند که هیچ تضاد منافعی وجود ندارد.

References

1. Fakhim H, Vaezi A, Morovati H, Bandegani A, Abbasi K, Emami S, et al. In-vivo efficiency of the novel azole compounds (ATTAF-1 and ATTAF-2) against systemic candidiasis in a murine model. J Mycol Med. 2023;33(4):101437. **pmid**: 37804566 **doi:** 10.1016/j.mycmed.2023.101437.
2. Diba K, Makhdoomi K, Nasri E, Vaezi A, Javidnia J, Gharabagh DJ, et al. Emerging Candida species isolated from renal transplant recipients: Species distribution and susceptibility profiles. Microb Pathog. 2018;125:240-5. **pmid**: 30240817 **doi:** 10.1016/j.micpath.2018.09.026.
3. Vaezi A, Moghadaszadeh M, Nasri E, Gharibi S, Diba K, Matkowski A, et al. In vitro activity of juglone (5-hydroxy-1,4-naphthoquinone) against both fluconazole-resistant and susceptible Candida isolates. Rev Iberoam Micol. 2022;39(2):50-53. **doi:** 10.1016/j.riam.2022.01.004.
4. The World Health Organization (WHO). Food Safety. The World Health Organization. 2023. [Internet]. Available from: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mycotoxins.
5. Marin S, Ramos AJ, Cano-Sancho G, Sanchis V. Mycotoxins: occurrence, toxicology, and exposure assessment. Food Chem Toxicol. 2013;60:218-37. **pmid**: 23907020 **doi:** 10.1016/j.fct.2013.07.047
6. Okechukwu V, Adelusi O, Kappo AP, Njobeh P, Mamo M. Aflatoxins: Occurrence, Biosynthesis, Mechanism of Action and Effects, Conventional/Emerging Detection Techniques. Food Chemistry. 2023;436:137775. **pmid**: 37866099 **doi:** 10.1016/j.foodchem.2023.137775
7. Bennett JW, Klich M. Mycotoxins. Clinical Microbiology Reviews. 2003;16(3):497-516. **doi**: 10.1128/CMR.16.3.497-516.2003
8. Marroquín-Cardona AG, Johnson NM, Phillips TD, Hayes AW. Mycotoxins in a changing global environment – A review. Food and Chemical Toxicology. 2014;69:220-30. **pmid**: 24769018 **doi:** 10.1016/j.fct.2014.04.025
9. van der Fels-Klerx HJ, Liu C, Focker M, Montero-Castro I, Rossi V, Manstretta V, et al. Decision support system for integrated management of mycotoxins in feed and food supply chains. World Mycotoxin Journal. 2022;15(2):119-34. **doi**: 10.3920/WMJ2020.2603
10. Tola M, Kebede B. Occurrence, importance and control of mycotoxins: A review. Cogent Food & Agriculture. 2016;2(1):1191103. **doi:**10.1080/23311932.2016.1191103
11. Casu A, Camardo Leggieri M, Toscano P, Battilani P. Changing climate, shifting mycotoxins: A comprehensive review of climate change impact on mycotoxin contamination. Compr Rev Food Sci Food Saf. 2024;23(2):e13323. **pmid**: 38477222 **doi:** 10.1111/1541-4337.13323
12. Darwish W, Ikenaka Y, Nakayama S, Ishizuka M. An Overview on Mycotoxin Contamination of Foods in Africa. J Vet Med Sci. 2014;76(6):789–97. **pmid**: 24572628 **doi:** 10.1292/jvms.13-0563
13. Logrieco A, Battilani P, Leggieri MC, Jiang Y, Haesaert G, Lanubile A, et al. Perspectives on Global Mycotoxin Issues and Management From the MycoKey Maize Working Group. Plant Dis. 2021;105(3):525-37. **pmid**: 32915118 **doi:** 10.1094/PDIS-06-20-1322-FE
14. Leggieri MC, Lanubile A, Dall'Asta C, Pietri A, Battilani P. The impact of seasonal weather variation on mycotoxins: maize crop in 2014 in northern Italy as a case study. World Mycotoxin Journal. 2020;13(1):25-36. **doi** 10.3920/WMJ2019.2475
15. Adelusi OA, Gbashi S, Adebo JA, Aasa AO, Oladeji OM, Kah G, et al. Seasonal and Geographical Impact on the Mycotoxigenicity of Aspergillus and Fusarium Species Isolated from Smallholder Dairy Cattle Feeds and Feedstuffs in Free State and Limpopo Provinces of South Africa. Toxins (Basel). 2023;15(2):128. **pmid**: 36828441 **doi:** 10.3390/toxins15020128
16. Alshannaq A, Yu J-H. Occurrence, Toxicity, and Analysis of Major Mycotoxins in Food. Int J Environ Res Public Health. 2017;14(6):632. **pmid**: 28608841 **doi:** 10.3390/ijerph14060632.
17. Wu F. Global impacts of aflatoxin in maize: Trade and human health. World Mycotoxin Journal. 2015;8(2):137-42. **doi**:10.3920/WMJ2014.1737
18. Maphaisa T, Akinmoladun O, Adelusi O, Mwanza M, Fon F, Tangni E, et al. Advances in mycotoxin detection techniques and the crucial role of reference material in ensuring food safety. A review. Food Chem Toxicol. 2025;200:115387. **pmid**: 40081789 **doi:** 10.1016/j.fct.2025.115387
19. Whitaker T. Standardisation of mycotoxin sampling procedures: An urgent necessity. Food Control. 2003;14:233-7. **doi**: 10.1016/S0956-7135(03)00012-4
20. Anfossi L, Giovannoli C, Baggiani C. Mycotoxin detection. Curr Opin Biotechnol. 2016;37:120-6. PMID: 26723009 doi: 10.1016/j.copbio.2015.11.005
21. Maragos CM. Emerging Technologies for Mycotoxin Detection. Journal of Toxicology: Toxin Reviews. 2004;23(2-3):317-44. **doi:** 10.1081/TXR-200027859
22. Manzano-Sánchez L, Díaz-Galiano FJ, Martínez JA, Ferrer C, Fernández-Alba AR. Improved efficiency of ion trapping time-of-flight mass spectrometry for the analysis of pesticide residues and mycotoxins at trace levels in baby food. Talanta. 2024;278:126448. **pmid**: 38905962 **doi:** 10.1016/j.talanta.2024.126448.
23. Janik E, Niemcewicz M, Podogrocki M, Ceremuga M, Gorniak L, Stela M, et al. The Existing Methods and Novel Approaches in Mycotoxins' Detection. Molecules. 2021;26(13):3981. **pmid**: 34210086 **doi:** 10.3390/molecules26133981
24. Renaud J, Miller J, Sumarah M. Mycotoxin Testing Paradigm: Challenges and Opportunities for the Future. J AOAC Int. 2019;102(6):1681-8. **pmid**: 31003600 **doi:** 10.5740/jaoacint.19-0046
25. Wang J, Zhu R, Wu Y, Tang L, Wang C, Qiu M, et al. Dynamic surface-enhanced Raman spectroscopy and positively charged probes for rapid detection and accurate identification of fungal spores in infected apples via deep learning methods. Food Control. 2023;157:110151. **doi:** 10.1016/j.foodcont.2023.110151
26. Liakos KG, Busato P, Moshou D, Pearson S, Bochtis D. Machine Learning in Agriculture: A Review. Sensors (Basel). 2018;18(8):2674. **pmid**: 30110960 **doi:** 10.3390/s18082674
27. Chakraborty C, Bhattacharya M, Pal S, Lee S-S. From machine learning to deep learning: Advances of the recent data-driven paradigm shift in medicine and healthcare. Current Research in Biotechnology. 2024;7:100164. **doi:** 10.1016/j.crbiot.2023.100164

28. Siripatrawan U, Makino Y. Assessment of food safety risk using machine learning-assisted hyperspectral imaging: Classification of fungal contamination levels in rice grain. Microbial Risk Analysis. 2024;27-28:100295. **doi:**10.1016/j.mran.2024.100295
29. Zhao G, Zhao Q, Webber H, Johnen A, Rossi V, Nogueira Júnior AF. Integrating machine learning and change detection for enhanced crop disease forecasting in rice farming: A multi-regional study. European Journal of Agronomy. 2024;160:127317. **doi:** 10.1016/j.eja.2024.127317
30. Inglis A, Parnell AC, Subramani N, Doohan FM. Machine Learning Applied to the Detection of Mycotoxin in Food: A Systematic Review. Toxins (Basel). 2024;16(6):268. **pmid**: 38922162 **doi:** 10.3390/toxins16060268
31. Emri M. Methods of artificial intelligence and their application in imaging diagnostics. Magyar onkologia. 2020;64:145-52.
32. Paul D, Sanap G, Shenoy S, Kalyane D, Kalia K, Tekade RK. Artificial intelligence in drug discovery and development. Drug Discov Today. 2021;26(1):80-93. **pmid**: 33099022 **doi:** 10.1016/j.drudis.2020.10.010
33. Yousef M, Allmer J. miRNomics: MicroRNA Biology and Computational Analysis. Humana Press; 2014. **doi:**10.1007/978-1-62703-748-8
34. Rayhana R, Sangha JS, Ruan Y, Liu Z. Harnessing machine learning for grain mycotoxin detection. Smart Agricultural Technology. 2025;11:100923. **doi:** 10.1016/j.atech.2025.100923
35. Kim Y, Kang S, Solomon O, Mallipeddi R, Ha Y. Predicting early mycotoxin contamination in stored wheat using machine learning. Journal of Stored Products Research. 2024;106:102294. **doi**: 10.1016/j.jspr.2024.102294
36. Castano-Duque L, Winzeler E, Blackstock JM, Liu C, Vergopolan N, Focker M, et al. Dynamic geospatial modeling of mycotoxin contamination of corn in Illinois: unveiling critical factors and predictive insights with machine learning. Front Microbiol. 2023:14:1283127. **pmid**: 38029202 **doi**: 10.3389/fmicb.2023.1283127
37. Camardo Leggieri M, Mazzoni M, Battilani P. Machine Learning for Predicting Mycotoxin Occurrence in Maize. Front Microbiol. 2021:12:661132. **pmid**: 33897675 **doi:** 10.3389/fmicb.2021.661132
38. Huang M, Wan X, Zhang M, Zhu Q. Detection of insect-damaged vegetable soybeans using hyperspectral transmittance image. J. Food Eng. 2013;116(1):45-9. **doi:** 10.1016/j.jfoodeng.2012.11.014
39. Mishra G, Panda B, Ariza W, Jung H, Singh C, Lee S-H, et al. Research advancements in optical imaging and spectroscopic techniques for nondestructive detection of mold infection and mycotoxins in cereal grains and nuts. Compr Rev Food Sci Food Saf. 2021;20(5):4612-51. **pmid**: 34338431 **doi:** 10.1111/1541-4337
40. Tu K, Wu W, Cheng Y, Zhang H, Xu Y, Dong X, et al. AIseed: An automated image analysis software for high-throughput phenotyping and quality non-destructive testing of individual plant seeds. Computers and Electronics in Agriculture. 2023;207:107740. **doi:**10.1016/j.compag.2023.107740
41. Aggarwal A, Mishra A, Tabassum N, Kim Y-M, Khan F. Detection of Mycotoxin Contamination in Foods Using Artificial Intelligence: A Review. Foods. 2024;13(20):3339. **doi:** 10.3390/foods13203339
42. Kabir MA, Lee I, Singh CB, Mishra G, Panda BK, Lee S-H. Detection of mycotoxins in cereal grains and nuts using machine learning integrated hyperspectral imaging: a review. Toxins (Basel). 2025;17(5):219. **pmid**: 40423302 **doi:** 10.3390/toxins17050219
43. Guo L, Tian H, Wan D, Yu Y, Zhao K, Zheng X, et al. Detection of Aflatoxin B1 in Maize Silage Based on Hyperspectral Imaging Technology. Agriculture. 2025;15(10):1023. **doi:**10.3390/agriculture15101023
44. Yan H, Neves MDG, Wise BM, Moraes IA, Barbin DF, Siesler HW. The Application of Handheld Near-Infrared Spectroscopy and Raman Spectroscopic Imaging for the Identification and Quality Control of Food Products. Molecules. 2023;28(23):7891. **pmid**: 38067622 **doi:** 10.3390/molecules28237891
45. Sohn S-I, Pandian S, Oh Y-J, Zaukuu J-LZ, Kang H-J, Ryu T-H, et al. An overview of near infrared spectroscopy and its applications in the detection of genetically modified organisms. Int J Mol Sci. 2021;22(18):9940. **pmid**: 34576101 **doi:** 10.3390/ijms22189940
46. Sun Y, Tang H, Zou X, Meng G, Wu N. Raman spectroscopy for food quality assurance and safety monitoring: a review. Current Opinion in Food Science. 2022;47:100910. **doi:**10.1016/j.cofs.2022.100910
47. Lun Z, Wu X, Dong J, Wu B. Deep Learning-Enhanced Spectroscopic Technologies for Food Quality Assessment: Convergence and Emerging Frontiers. Foods. 2025;14(13):2350. **pmid**: 40647102 **doi:** 10.3390/foods14132350.
48. Gaudin V. Advances in biosensor development for the screening of antibiotic residues in food products of animal origin – A comprehensive review. Biosensors and Bioelectronics. 2017;90:363-77. **pmid**: 27940240 **doi:** 10.1016/j.bios.2016.12.005
49. Lu S, Li G, Lv Z, Qiu N, Kong W, Gong P, et al. Facile and ultrasensitive fluorescence sensor platform for tumor invasive biomaker β-glucuronidase detection and inhibitor evaluation with carbon quantum dots based on inner-filter effect. Biosens Bioelectron. 2016;85:358-62. **pmid**: 27196253 **doi:** 10.1016/j.bios.2016.05.021
50. Szelenberger R, Cichoń N, Zajaczkowski W, Bijak M. Application of Biosensors for the Detection of Mycotoxins for the Improvement of Food Safety. Toxins (Basel). 2024;16(6):249. **pmid**: 38922144 **doi:** 10.3390/toxins16060249
51. Mathivanan S. Perspectives of Nano-Materials and Nanobiosensors in Food Safety and Agriculture. 2021. **doi**: 10.5772/intechopen.95345
52. Fang L, Jia M, Zhao H, Kang L, Shi L, Zhou L, et al. Molecularly imprinted polymer-based optical sensors for pesticides in foods: Recent advances and future trends. Trends in Food Science & Technology. 2021;116:387-404. **doi:** 10.1016/j.tifs.2021.07.039