

تحلیل جامع عوامل خطر و فناوری‌های نسل جدید تشخیصی برای کنترل آفلاتوکسین در زنجیره تأمین پسته

نادره تبریزی^{۱*} و شهین زمردی^۲

^{۱*} بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران
تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹

چکیده

پسته محصولی است با ارزش از نظر تغذیه و اقتصاد و جایگاهی مهم در امنیت غذایی جهانی و تجارت بین‌المللی دارد. این دانه روغنی با فراهم کردن پروتئین، چربی‌های اشباع‌نشده، فیبر و آنتی‌اکسیدان‌ها، نقشی اساسی در تقویت اقتصاد ایران دارد. با این حال، آلودگی به آفلاتوکسین‌ها که از متابولیت‌های سمی و سرطان‌زا توسط گونه‌های قارچ آسپرژیلوس به‌ویژه آسپرژیلوس فلاوس و آسپرژیلوس پاراتیکوس به وجود می‌آید، چالشی ماندگار و جهانی محسوب می‌شود و تجارت این محصول را با موانع جدی روبه‌رو می‌کند. آفلاتوکسین B₁ ب‌قوی‌ترین سرطان‌زای طبیعی شناخته می‌شود و همین امر منجر به وضع مقررات سختگیرانه و نگرانی‌های گسترده بهداشتی شده است. در این مرور سیستماتیک، خطر آلودگی در تمامی مراحل زنجیره تأمین پسته، از تنش‌های اقلیمی و حمله آفات پیش از برداشت تا فرآیند خشک‌کردن و انبارداری پس از برداشت بررسی شده است. روش‌های متداول تشخیص مانند روش‌های کروماتوگرافی با کارایی بالا (HPLC) و طیف‌سنجی جرمی با تفکیک بالا (LC-MS/MS) از نظر دقت، هزینه و سرعت ارزیابی شده‌اند. ابزارهای غربالگری سریع مانند آزمایش‌های ایمنوسوربنت آنزیمی (ELISA) و آزمون‌های جریان جانبی (LFA) برای کاربردهای عملی مورد بحث قرار گرفته‌اند، در حالی که بیوسنسورهای نوین شامل پلتفرم‌های الکتروشیمیایی و نوری تقویت‌شده با اپتامر و نانومواد، به‌عنوان راهکارهایی امیدوارکننده برای تشخیص در محل معرفی شده‌اند. نتایج این مرور نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌های فناوری، چالش‌هایی مانند اثر بافت، نیاز به کالیبراسیون دقیق، و پایداری در شرایط محیطی سخت همچنان وجود دارد. سرانجام، با استفاده از مدیریت یکپارچه آفات (IPM)، بیوکنترل با سویه‌های غیرسم‌زا، و ترکیب سامانه‌های تشخیص سریع با پایش دیجیتال، می‌توان خطر آلودگی را در زنجیره تأمین پسته به طور مؤثری کاهش داد و به استانداردهای بین‌المللی ایمنی غذا دست یافت.

واژه‌های کلیدی: پسته، آفلاتوکسین، بیوسنسور، اپیدمیولوژی، سنجش جریان جانبی، اینترنت اشیا

مقدمه

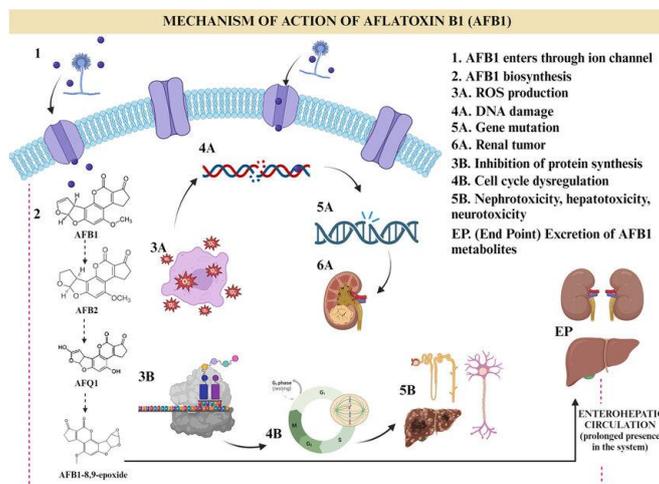
قلبی - عروقی و برخی سرطان‌ها دارد (Kamil & Chen).
(2012) تولید جهانی پسته در سال ۲۰۲۲ به بیش از ۱/۱ میلیون تن رسید که ایران، ایالات متحده، و ترکیه حدود ۸۰ درصد این تولید را در اختیار داشتند (USDA, 2023). به‌طور خاص، چهار نوع اصلی آفلاتوکسین شامل AFG₁، AFB₂، AFB₁ و AFG₂ در پسته یافت می‌شوند که AFB₁ قوی‌ترین ترکیب سرطان‌زای طبیعی شناخته شده است. پیامدهای بهداشتی

پسته یکی از محصولات استراتژیک کشاورزی است که علاوه بر جایگاه تغذیه‌ای، منبع مهم درآمد ارزی در کشورهای تولیدکننده شناخته می‌شود (FAO, 2023). این خشکبار از پروتئین‌های گیاهی، اسیدهای چرب اشباع‌نشده، فیبر غذایی، و ترکیبات زیست‌فعال مانند پلی‌فنول‌ها و توکوفرول‌ها غنی است که اثر محافظتی در برابر بیماری‌های

این سموم از مسمومیت حاد کبدی تا تاثیرات مزمن مانند سرکوب سیستم ایمنی و سرطان کبد متغیر است (شکل ۱). بروز این آلودگی به شدت تحت تأثیر عوامل پیش از برداشت مانند تنش خشکی و دمای بالا و همچنین شیوه‌های مدیریتی پس از برداشت مانند فرآوری، حمل‌ونقل و انبارداری قرار دارد. این چالش‌ها که به‌ویژه در کشورهای با زیرساخت‌های ضعیف‌تر و مقررات نظارتی کمتر به بحران بهداشتی و اقتصادی جدی تبدیل می‌شوند از برداشت نشأت می‌گیرند و در مراحل پس از برداشت تشدید می‌شوند (Ranjbar *et al.*, 2025). شرایط اقلیمی نامساعد، به‌ویژه تنش خشکی و دمای بالا، با تضعیف سیستم دفاعی گیاه میزبان و ایجاد شکاف در پوسته، زمینه را برای تهاجم قارچ‌های فرصت‌طلب آسپرژیلوس، به‌ویژه آسپرژیلوس فلاووس فراهم می‌آورد. این آسیب اولیه با دخالت آفات نباتی، که به عنوان ناقلان فیزیکی اسپورها عمل می‌کنند، پیچیده‌تر می‌شود. با این حال، نقطه بحرانی تکثیر قارچ و تولید سم، در مراحل پس از برداشت و به دلیل مدیریت نامناسب رطوبت و دما رخ می‌دهد. تأخیر در خشک کردن محصول و نگهداری آن در شرایط انبارداری غیراستاندارد، ریسک آلودگی را به صورت نمایی افزایش می‌دهد. این چالش‌ها، به‌ویژه در مناطقی که با کمبود زیرساخت‌های

فناورانه و ضعف در سیستم‌های نظارتی و کنترلی مواجه هستند، به بحران بهداشتی-اقتصادی جدی منجر می‌شود و از یک سو با رد شدن محموله‌های صادراتی به دلیل منطبق نبودن با استانداردهای سختگیرانه بین‌المللی و از سوی دیگر با تهدید سلامت عمومی از طریق افزایش خطر ابتلا به سرطان کبد و تضعیف سیستم ایمنی، هزینه‌های هنگفتی را تحمیل می‌کند.

مسمومیت حاد آفلاتوکسین هرچند نادر است، اما بر اثر مصرف دوزهای بسیار بالا (در حد میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن بدن) رخ می‌دهد. نشانه‌های آن می‌تواند شامل نکروز شدید کبد، یرقان، ادم ریوی، استفراغ، درد شکمی و خونریزی داخلی باشد که در برخی موارد کشنده است. میزان مرگ و میر در برخی موارد شیوع تا ۴۰ درصد گزارش شده است (Bennett & Klich, 2003; Lewis *et al.*, 2005; Probst *et al.*, 2007). نمونه شاخص آن، شیوع سال ۲۰۰۴ در کنیا بود که منجر به مرگ بیش از ۱۲۵ نفر بر اثر مصرف ذرت آلوده با سطوح AFB1 بالاتر از ۱۰۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم گزارش شد. موارد مشابه در تانزانیا (۲۰۱۸) و هند (۲۰۲۲) نشان‌دهنده آسیب‌پذیری سیستم‌های کشاورزی معیشتی هستند (Lewis *et al.*, 2005; Kamala *et al.*, 2018; Sharma *et al.*, 2023; Khan, 2024).



شکل ۱- مکانیزم اثر AFB1 (Rodríguez *et al.*, 2024)

Fig 1- Mechanism of action of AFB1 (Rodríguez *et al.*, 2024)

از آنجا که نشانه‌ها می‌توانند ظرف چند ساعت بروز کنند، وجود سیستم‌های پاسخ سریع اهمیت حیاتی دارد، به‌ویژه با توجه به اینکه درمان‌ها عمدتاً محدود به اقدامات حمایتی مانند هیدراتاسیون و محافظت کبدی هستند (Bennett & Klich, 2003; Probst *et al.*, 2007). گزارش می‌شوند، داده‌های سازمان جهانی بهداشت نشان می‌دهد که مسمومیت حاد همچنان موجب هزاران مرگ سالانه در آفریقا و آسیا می‌شود (WHO, 2018).

مسمومیت مزمن با دوزهای پایین (در حد میکروگرم بر کیلوگرم روزانه) شایع‌تر ولی پنهان‌تر است. این نوع مواجهه می‌تواند به مشکلات جدی و بلندمدتی مانند کارسینوم هپاتوسلولار¹ (HCC) منجر شود که سومین دلیل مرگ ناشی از سرطان در جهان به شمار می‌رود (Bennett & Klich, 2003; IARC, 2012; Wild & Gong, 2010).

آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان² (IARC) AFB₁ را به عنوان سرطان‌زای قطعی انسانی (گروه ۱) طبقه‌بندی کرده است و شواهد نشان می‌دهد مواجهه با آن می‌تواند خطر ابتلا به HCC را تا ۳۰ برابر افزایش دهد (IARC, 2012; Groopman *et al.*, 2014).

عفونت ویروس هپاتیت B یا C اثر هم‌افزایی خطرناکی دارد، به طوری که در مناطقی مانند آفریقا و جنوب شرق آسیا که شیوع HBV بالاست، تا ۵۰ درصد موارد HCC به این ترکیب نسبت داده می‌شود (Wild & Gong, 2010; Liu & Wu, 2010).

مطالعه‌ای در چین بود که نشان داد بهبود شرایط انبارداری و کاهش مواجهه با آفاتوکسین، بروز HCC را طی دو دهه حدود ۱۹ درصد کاهش داده است (Zhang *et al.*, 2017).

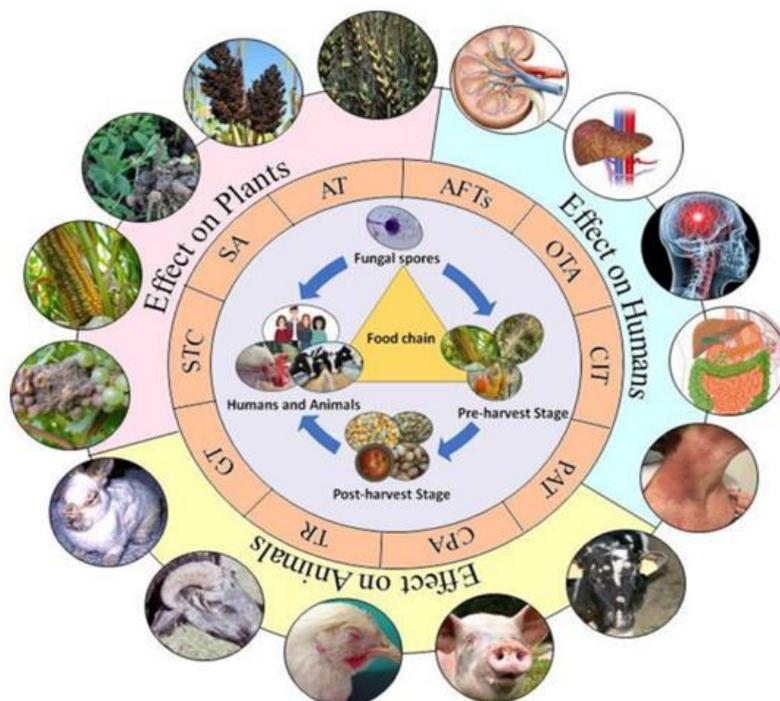
اثرهای مزمن محدود به سرطان نیستند. آفاتوکسین می‌تواند سیستم ایمنی را با تضعیف عملکرد سلول‌های T و کاهش تولید سیتوکین مختل کند، که این امر حساسیت به عفونت‌هایی مانند HIV و سل را افزایش می‌دهد (Navel *et al.*, 2021).

از نظر اقتصادی، این پیامدها هزینه‌های هنگفتی برای مراقبت‌های بهداشتی و کاهش بهره‌وری ایجاد می‌کنند. بر اساس گزارش بانک جهانی (World Bank, 2023)، بار مالی سالانه ناشی از آفاتوکسین در کشورهای کم‌درآمد حدود ۵۰۰ میلیون دلار برآورد شده است. اهمیت موضوع زمانی برجسته می‌شود که بدانیم بیش از ۱۰۰ کشور مقررات سخت‌گیرانه‌ای برای حداکثر سطوح مجاز آفاتوکسین در مواد غذایی وضع کرده‌اند.

³ Stunting

¹ Hepatocellular Carcinoma

² International Agency for Research on Cancer



شکل ۲- تأثیر سموم قارچی بر زنجیره غذایی و سلامت گیاهان، دام و انسان (Navel et.al,2021).

Fig 2- The impact of mycotoxins on the food chain and the health of plants, livestock and humans (Navel et.al, 2021).

۲۰۲۳، سالانه بیش از ۵۰۰۰ تن پسته از بازار آمریکا برگشت داده شد که ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلیون دلار ضرر برای صادرکنندگان ایجاد کرد (USDA, 2023). در ایران، بزرگ‌ترین تولیدکننده پسته جهان، مشکلات آفلاتوکسین موجب از دست رفتن ۱۰ تا ۱۵ درصد سهم بازار اتحادیه اروپا شده که معادل ۱۵۰ میلیون دلار در سال است (FAO, 2022; Iranian Pistachio Association, 2021). در مقیاس جهانی، خسارت ناشی از مایکوتوکسین‌ها در کشاورزی بیش از ۵ میلیارد دلار برآورد می‌شود (Wu, 2015; FAO, 2020). پیشرفت‌های فناوری تشخیص آفلاتوکسین طی دو دهه گذشته، مسیر مقابله با این آلودگی را تغییر داده است. روش‌های کروماتوگرافی با کارایی بالا (HPLC) و طیف‌سنجی جرمی با تفکیک بالا (LC-MS/MS) استانداردهای مرجع شناخته می‌شوند، اما علاوه بر هزینه، نیاز به تجهیزات پیشرفته و زمان طولانی تجزیه، مانع استفاده گسترده از آن‌ها در پایش روزمره شده است

برای مثال، اتحادیه اروپا در مقررات (EU) Regulation (EU) 2023/915 حد مجاز AFB₁ را ۸ و مجموع آفلاتوکسین‌ها را ۱۰ میکروگرم بر کیلوگرم در پسته آماده مصرف تعیین کرده است، در حالی که ایالات متحده حد ۲۰ میکروگرم بر کیلوگرم را برای مجموع آفلاتوکسین‌ها در نظر می‌گیرد (European Commission, 2023; FDA, 2022). تجربه‌هایی مانند تاییدنشدن پسته ترکیه در سال ۲۰۱۹ به دلیل تجاوز از حدود مجاز، نشان می‌دهد که هر محموله آلوده می‌تواند به اعتبار کل صنعت کشور آسیب جدی وارد کند (EFSA, 2020). اجرای شیوه‌های خوب کشاورزی (GAP) و تحلیل نقاط کنترل بحرانی (HACCP)¹ می‌تواند این خسارت‌ها را تا ۵۰ درصد کاهش دهد، همان‌گونه که در صنعت پسته کالیفرنیا مشاهده شده است (USDA, 2021; Palumbo et al., 2014).

رعایت نشدن این استانداردها می‌تواند به برگشت محموله‌ها منجر شود. برای مثال، بین سال‌های ۲۰۱۸ تا

¹ Hazard Analysis and Critical Control Points

از کمبود آب موجب تضعیف بافت‌های گیاهی و کاهش تولید ترکیبات دفاعی مانند فیتوالکسین‌ها می‌شود و حساسیت میوه‌ها به نفوذ قارچ را افزایش می‌دهد (Calderari *et al.*, 2017). یکی دیگر از عوامل مهم، حمله آفات حشره‌ای مانند کرم ناف پرتقالی^۱ است که با ایجاد زخم روی پوسته و انتقال مستقیم اسپور قارچ، می‌تواند تا ۲۰ درصد میوه‌ها را آلوده سازد (Palumbo *et al.*, 2014). شکاف زودرس پوسته پسته نیز پدیده‌ای است که هرچند تنها در ۲ تا ۵ درصد میوه‌ها رخ می‌دهد، اما همین مقدار اندک مسئول تجمع حدود ۸۰ درصد آفات توکسین در محصول برداشت شده است (Michailides & Morgan, 2004). به‌طور کلی، کنترل این عوامل در مرحله پیش‌برداشت نیازمند تلفیق مدیریت آبیاری، استفاده از واریته‌های مقاوم، پایش مستمر شرایط اقلیمی و مبارزه بیولوژیک یا شیمیایی با آفات ناقل قارچ است.

مرحله برداشت پسته نیز نقطه‌ای حساس در زنجیره تأمین به شمار می‌آید که می‌تواند آلودگی ایجادشده در مرحله قبل را تشدید یا حتی زمینه‌ساز آلودگی جدید شود. تأخیر در برداشت، به‌ویژه در شرایطی که دما و رطوبت بالا باشد، باعث ادامه رشد قارچ روی درخت و افزایش غلظت آفات توکسین می‌شود (Abbas *et al.*, 2020). روش برداشت نیز نقش مهمی دارد، برداشت مکانیکی نامناسب یا استفاده از تجهیزات آسیب‌زا می‌تواند موجب ترک خوردن پوسته یا ایجاد خراش روی سطح میوه شود که این آسیب‌ها، دروازه ورود قارچ هستند. تماس مستقیم میوه‌ها با خاک آلوده، چه در اثر ریزش طبیعی و چه در اثر برداشت غیرحرفه‌ای، خطر انتقال اسپورهای آسپرژیلوس را به‌شدت بالا می‌برد (Pitt *et al.*, 2009). شرایط آب‌وهوایی در زمان برداشت، به‌ویژه بارندگی یا شبنم سنگین، نیز رشد قارچ را تسهیل می‌کند، زیرا رطوبت موجود در سطح میوه، فرصت کافی برای جوانه‌زنی اسپورها را فراهم می‌آورد (Kaaya *et al.*, 2006).

(Turner *et al.*, 2009). به همین دلیل، روش‌های سریع مانند آزمایش‌های ایمنوسوربنت آنزیمی (ELISA) و آزمون‌های جریان جانبی (LFA) برای غربالگری میدانی توسعه یافته‌اند (Zheng *et al.*, 2021). علاوه بر این، ظهور بیوسنسورهای نسل جدید شامل سامانه‌های نوری، الکتروشیمیایی و آپتامری با کمک نانومواد، همراه با قابلیت اتصال به سامانه‌های اینترنت اشیا، امکان پایش سریع و هوشمند زنجیره تأمین را فراهم کرده است (Rhouati *et al.*, 2016).

در این مقاله مروری، هدف ارائه تصویری جامع از وضعیت کنونی و آینده مدیریت آلودگی آفات توکسین در پسته است که ابتدا به بررسی اپیدمیولوژی و اثرهای بهداشتی این سموم پرداخته می‌شود، پس از آن عوامل خطر در مراحل مختلف زنجیره تأمین را تحلیل می‌کند، و سرانجام به ارزیابی فناوری‌های تشخیص مرجع و نوین پرداخته می‌شود.

عوامل خطر در زنجیره تأمین پسته

عوامل خطر پیش‌برداشت در آلودگی آفات توکسین پسته، بخش قابل توجهی از بار کلی این سم را تشکیل می‌دهند و مطالعات نشان داده‌اند که حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد آلودگی نهایی محصول به این مرحله بازمی‌گردد. مهم‌ترین محرک‌های این آلودگی، شرایط اقلیمی گرم و مرطوب هستند که رشد قارچ‌های آسپرژیلوس فیلاووس و آسپرژیلوس پاراسیتیکوس را تسهیل می‌کنند (Cotty & Jaime & Garcia, 2007). دمای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس به‌همراه رطوبت نسبی بالای ۷۰ درصد محیطی ایده‌آل برای جوانه‌زنی اسپورها و تولید آفات توکسین ایجاد می‌کند (Battilani *et al.*, 2016). تغییرات اقلیمی نیز پیش‌بینی می‌کنند که تا سال ۲۰۳۰ در مناطق کشت پسته ایران، ترکیه و آمریکا، خطر آلودگی به دلیل افزایش امواج گرما و الگوهای بارش نامنظم، حدود ۳۰ درصد افزایش یابد (Medina *et al.*, 2017). افزون بر این، تنش خشکی ناشی

^۱ *Amyelois transitella*

زخم در میوه و تسهیل نفوذ اسپور قارچ آسپرژیلوس، موجب افزایش قابل توجه خطر آلودگی می‌شوند. در مرحله برداشت، تأخیر در جمع‌آوری محصول و تماس مستقیم پسته با خاک از عوامل بحرانی هستند که احتمال آلودگی را به‌ویژه در حضور شبنم یا آلودگی‌های سطحی به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند. در مرحله پس از برداشت نیز رطوبت بالا در فرآیند خشک‌کردن و شرایط نامناسب انبارداری (به‌ویژه در فعالیت آبی بالاتر از ۰/۷) شرایط مطلوبی را برای رشد قارچ و تولید آفلاتوکسین فراهم می‌کند. در جمع‌بندی، تغییرات اقلیمی به‌عنوان عاملی فراگیر، شدت همه این خطرها را افزایش می‌دهد و کنترل آلودگی را پیچیده‌تر می‌سازد. از این‌رو، به‌کارگیری راهبردهای نوین مانند مدیریت هوشمند مبتنی بر سامانه‌های اینترنت اشیا^۱ (IOT) و اجرای یکپارچه اصول GAP^۲ و GMP^۳ می‌تواند رویکردی مؤثر و پایدار برای کاهش آلودگی آفلاتوکسین در زنجیره تأمین پسته فراهم آورد.

در کنار مدیریت شرایط محیطی، راهکارهای بیوکنترول و مدیریت یکپارچه آفات (IPM) نقش کلیدی در کاهش آلودگی دارند. استفاده از سویه‌های غیرسم‌زا از آسپرژیلوس فلاووس که با سویه‌های تولیدکننده آفلاتوکسین رقابت می‌کنند، می‌توانند بار آلودگی را تا ۹۰ درصد کاهش دهند (Bandyopadhyay et al., 2016). این روش در ایالات متحده، ایران و برخی کشورهای آفریقایی به نتایج مثبتی رسیده است. در چارچوب IPM، تلفیق کنترل بیولوژیک با پایش جمعیت آفات، استفاده هدفمند از قارچ‌کش‌ها و مدیریت بقایای گیاهی می‌تواند میزان انتقال اسپورها و نفوذ قارچ را به حداقل برساند (Atehnkeng et al., 2016). بهبود ژنتیکی و پرورش ارقام مقاوم به ترک‌خوردگی پسته یا هجوم آفات می‌تواند در بلندمدت پایداری سیستم تولید را افزایش دهد.

به همین دلیل، انتخاب زمان بهینه برداشت و استفاده از تکنیک‌های مکانیکی پیشرفته که تماس محصول را با خاک به حداقل می‌رساند، از الزامات مدیریت خطر در این مرحله است.

مدیریت پس از برداشت شاید به اندازه مدیریت پیش از برداشت اهمیت داشته باشد، زیرا حتی اگر محصول در مزرعه سالم برداشت شود، خطا در این مرحله می‌تواند منجر به تولید آفلاتوکسین شود. خشک‌کردن پسته باید بلافاصله پس از برداشت و تا رسیدن به رطوبت زیر ۷ درصد به‌انجام برسد زیرا رطوبت بالاتر از این آستانه محیطی مناسب برای رشد قارچ فراهم می‌کند (Codex Alimentarius, 2018). دمای بالا و رطوبت نسبی بیش از ۶۵ درصد در انبار، تولید سم را شتاب می‌بخشد و این امر در کشورهایی که امکانات سرمایه‌ی کافی ندارند، به‌ویژه چالش‌برانگیز است (Klich, 2007). نگهداری طولانی‌مدت حتی در شرایط نسبتاً خشک نیز ممکن است خطرناک باشد، زیرا آفلاتوکسین ترکیبی پایدار است و در صورت آلودگی اولیه، غلظت آن با گذشت زمان افزایش می‌یابد (Chulze, 2010). آلودگی متقاطع نیز مشکلی رایج در انبارها و وسایل حمل‌ونقل است، باقی‌مانده پسته‌ها یا گرد و غبار آلوده در مخازن می‌تواند منبع آلودگی محصولات سالم باشد (Magan & Aldred, 2007). برای کنترل خطر در این مرحله، استفاده از سیستم‌های تهویه کنترل‌شده، ضدعفونی‌کردن دوره‌ای انبارها و اعمال پروتکل‌های حمل‌ونقل بهداشتی ضروری است. بر اساس پژوهش‌ها (جدول ۱)، آلودگی پسته به آفلاتوکسین فرآیندی چندمرحله‌ای و تجمعی است که از مزرعه تا مرحله انبارداری تداوم می‌یابد و تحت تأثیر عوامل متعدد محیطی و مدیریتی قرار دارد. در مرحله پیش از برداشت، شرایط اقلیمی نامناسب مانند تنش خشکی، نوسان‌های دمایی، رطوبت بالا و خسارت آفات از طریق ایجاد

³ Good Manufacturing Practices

¹ Internet of Things

² Good Agricultural Practices

جدول ۱- مقایسه عوامل خطر آلودگی آفاتوکسین در مراحل پیش و پس از برداشت زنجیره تأمین پسته

مرحله	عوامل کلیدی خطر	اثرها	استراتژی کاهش	مراجع
Stage	Key risk factors	Effects	Strategy reduction	References
پیش از برداشت Pre-harvest	تنش خشکی، نوسان دما، رطوبت، حمله آفات	افزایش ۲۰-۳۰٪ آلودگی در خشکسالی‌ها، ورود اسپور از طریق زخم	آبیاری هوشمند، کنترل بیولوژیک، واریته‌های مقاوم Smart irrigation, biological control, resistant varieties	(Nagy et al., 2020)
برداشت Harvest	تأخیر زمانی، تماس با خاک	افزایش ۴۰٪ خطر از شبنم، آفات، ۱۰ برابر آلودگی از خاک	برداشت مکانیزه، شبکه‌های جمع آوری Mechanized harvesting, collection networks	(Zanon et al., 2025)
پس از برداشت Post-harvest	رطوبت بالا در خشک کردن، انباداری ضعیف	رشد قارچ در $aw > 0.7$ ، تعریق محلی Fungal growth at $aw > 0.7$, local sweating	خشک‌کن‌های کنترل شده، تهویه خنک، مرتب سازی نوری Controlled dryers, cool ventilation, optical sorting	(Agriopoulou et al., 2025)
جمع بندی Conclusion	تغییرات اقلیمی Climate change	تشدید همه عوامل Exacerbation of all factors	نظارت IOT، رویکرد یکپارچه GAP/GMP IOT monitoring, integrated GAP/GMP approach	(Delfani et al., 2024)

روش‌های تشخیصی

و پروتئین‌های موجود در پسته، می‌تواند منجر به تداخل و کاهش دقت شود که با استفاده از روش‌های تصفیه نمونه مانند ستون‌های ایمونوآفینیتی (IAC) یا فاز جامد (SPE) قابل کاهش است (Shephard, 2016). روش‌های غربالگری سریع به‌عنوان جایگزین یا مکمل روش‌های مرجع، برای استفاده در خط تولید یا مرزهای ورودی کالا توسعه یافته‌اند. آزمون الیزا (ELISA) یکی از پرکاربردترین این روش‌هاست که بر پایه برهم‌کنش آنتی‌بادی-آنتی‌ژن و آشکارسازی رنگ‌سنجی کار می‌کند و در کمتر از ۲ ساعت نتایج را ارائه می‌دهد (Chu, 2018). از نظر حساسیت می‌تواند به محدوده‌های کمتر از ۱ میکروگرم بر کیلوگرم برسد و هزینه و زمان آن نسبت به HPLC بسیار پایین‌تر است، اما محدودیت‌هایی مانند احتمال تداخل با ترکیبات مشابه ساختاری و نیاز به تجهیزات پایه آزمایشگاهی دارد. آزمون‌های فلورسانس ایمنی (FIA²) نیز با استفاده از برچسب‌های فلورسانس، حساسیت بالاتری نسبت به ELISA نشان می‌دهند و در برخی کیت‌های تجاری، امکان آشکارسازی چند مایکوتوکسین به‌طور هم‌زمان فراهم شده است (Li et al., 2021).

روش‌های مرجع آزمایشگاهی برای شناسایی و اندازه‌گیری آفاتوکسین‌ها در پسته همچنان ستون فقرات برنامه‌های کنترل کیفیت و پایش ایمنی غذایی هستند. دو روش اصلی که به‌عنوان استاندارد طلایی در سطح بین‌المللی شناخته می‌شوند، HPLC و LC-MS/MS هستند. در HPLC، جداسازی بر پایه برهم‌کنش ترکیبات با ستون کروماتوگرافی و آشکارسازی به کمک آشکارساز فلورسانس یا فتودیودی^۱ صورت می‌گیرد، که در صورت استفاده از مشتق‌سازی پس از ستون، حساسیت آن به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (AOAC, 2020). علاوه بر جداسازی دقیق، امکان شناسایی ساختار مولکولی و تفکیک ایزومرها را فراهم کرده و حساسیت آن در حد نانوگرم بر کیلوگرم است (Vaclavikova et al., 2013). این روش‌ها اگرچه دقت و صحت بسیار بالایی دارند و در مقررات اتحادیه اروپا و FDA برای تأیید نتایج استفاده می‌شوند، اما نیازمند تجهیزات گران‌قیمت، نیروی انسانی متخصص، زمان تحلیل نسبتاً طولانی (چند ساعت) و آماده‌سازی پیچیده نمونه هستند. ناهمگنی آلودگی در محموله‌ها و اثرهای بافت ناشی از چربی

² Fluorescence Immunoassay

¹ photo diode array

جدول ۲- مقایسه روش‌های تحلیلی برای تشخیص آفلاتوکسین در پسته

Table 2- Comparison of analytical methods for detecting aflatoxin in pistachios

مراجع References	کاربردها Applications	محدودیت‌ها Limitations	مزایا Advantages	زمان تحلیل Analysis time	LOD (µg/kg)	روش Methods
(Khan et al., 2024)	غربالگری اولیه Primary screening	حساسیت پایین، تداخل Low sensitivity, interference	ساده، کم هزینه Simple, low cost	30-60 min	5-10	TLC
(Zhang & Banerjee, 2020)	روش مرجع Reference method	تجهیزات گران، زمان‌بر Expensive equipment, time consuming	دقیق Accurate	15-20 min	<0.1	HPLC-FLD
(Akullo et al., 2025)	آزمایشگاهی پیشرفته Advanced laboratory	اثرات ماتریسی، هزینه بالا Matrix effects, high cost	انتخاب پذیری بالا، تحلیل چندگانه High selectivity, multiple analysis	10-15 min	<0.01	LC-MS/MS
(Tanveer et al., 2025)	غربالگری روزمره Routine screening	نیاز به روش‌های تکمیلی دیگر Need other complementary methods	حساسیت بالا High sensitivity	1-2 h	~0.5	ELISA
(Thenuwara et al., 2025)	در محل (مزرعه/انبار) On-site (farm/store)	حساسیت متوسط Moderate sensitivity	قابل حمل، بدون تجهیزات Portable, no equipment required	5-15 min	2-5	LFA

در سال‌های اخیر، بیوسنسورهای نوظهور به‌عنوان رویکردی امیدبخش برای تشخیص سریع، حساس و در محل^۱ آفلاتوکسین‌ها مطرح شده‌اند، (جدول ۳). شناسایی به حد تشخیص فوق‌العاده پایینی دست یافته است، هر چند طراحی پیچیده‌ای دارد.

در مقابل، سامانه‌های الکتروشیمیایی مبتنی بر میکروروم کبدهی (Sun et al., 2023) با تقلید از متابولیسم طبیعی، سازگاری زیستی بالایی را ارائه می‌دهند اما حساسیت کمتری دارند. بیوسنسورهای کمی لومینسانس مبتنی بر مخمر (Yang et al., 2024) نیز حساسیت بالایی در تشخیص سایر مایکوتوکسین‌ها مانند دئوکسی‌نیوالنول^۴ (DON) در نمونه‌های پیچیده‌ای نظیر ذرت نشان داده‌اند. این مقایسه جامع نشان می‌دهد که انتخاب سامانه بیوسنسوری بهینه مستلزم در نظر گرفتن دقیق الزام‌های کاربردی از جمله حساسیت مورد نیاز، سرعت تحلیل و امکان‌سنجی پیاده‌سازی است. به‌طور کلی، انتخاب روش تشخیص بستگی دارد به هدف آزمون، امکانات موجود، سرعت موردنیاز و الزامات قانونی.

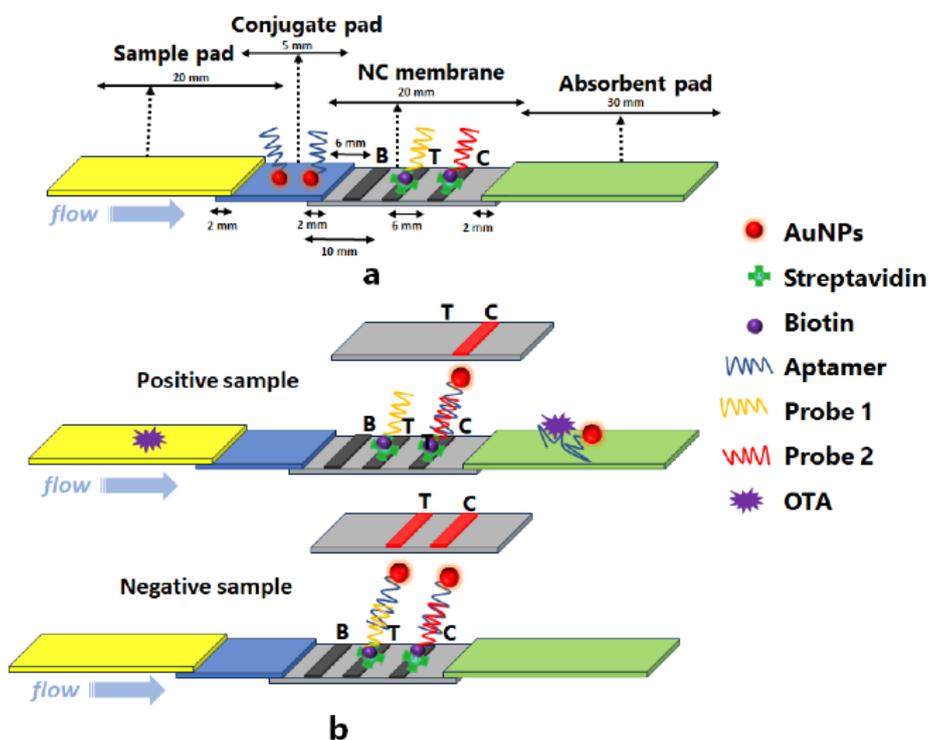
بیوسنسورهای نوظهور به‌عنوان رویکردی امیدبخش برای تشخیص سریع، حساس و در محل^۱ آفلاتوکسین‌ها مطرح شده‌اند، (جدول ۳). بیوسنسورها دستگاه‌هایی هستند که یک جزء زیستی (مانند آنتی‌بادی، آپتامر یا آنزیم) را به یک مبدل سیگنال متصل می‌کنند تا برهم‌کنش با سم را به یک سیگنال قابل‌اندازه‌گیری تبدیل کنند (Piermarini et al., 2020). بیوسنسورهای الکتروشیمیایی از رایج‌ترین انواع هستند و تغییرات در جریان، ولتاژ یا امپدانس را در اثر اتصال مولکول هدف ثبت می‌کنند. استفاده از آپتامرها به‌عنوان عناصر تشخیص، مزایایی مانند پایداری بالا، سنتز آسان و قابلیت اصلاح‌پذیری شیمیایی را به همراه دارد (Zhang et al., 2022) نانومواد مانند نانولوله‌های کربنی و نقاط کوانتومی نیز با افزایش سطح فعال و بهبود، حد تشخیص^۲ (LOD)، زمان تحلیل، مزایا و معایب هر فناوری را ارزیابی می‌کنند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میان پلتفرم‌های مختلف موازنه‌ای قابل توجه بین حساسیت و پیچیدگی طراحی وجود دارد. برای مثال، بیوسنسور مبتنی بر ترانزیستور اثر میدانی^۳

³ Voect Fet⁴ Deoxynivalenol¹ on-site² Limit of Detection

جدول ۳- مقایسه فناوری‌های بیوسنسور برای تشخیص آفاتوکسین

Table 3 - Comparison of biosensor technologies for aflatoxin detection

مراجع References	کاربردها Applications	محدودیت‌ها Limitations	مزایا Advantages	زمان تحلیل Analysis time	LOD (µg/kg)	عنصر شناسایی Identification element	نوع بیوسنسور Biosensor type
(Yang et al., 2024)	تشخیص DON در ذرت DON Detection in Corn	جزئیات محدود Limited details	فوق حساس، بازیابی عالی در نمونه ذرت Ultra-sensitive, excellent recovery in corn samples	اعلام نشده Unannounced	~0.000166	مخمر نمایش سطحی و آنتی‌بادی (Fab) Yeast surface display and antibody (Fab)	Yeast-based chemiluminescent biosensor (CLIA)
(Sun et al., 2023)	تشخیص AFB ₁ AFB ₁ Detection	پیچیده، نیاز به محیط خاص Complex, requires specific environment	متابولیسم طبیعی، سازگاری زیستی Natural metabolism, biocompatibility	اعلام نشده Unannounced	2.8	میکروزوم کبدی (CYP450) Liver microsomes (CYP450)	Electrochemical (RLM + Au@MXene)
(Teodoro et al., 2025)	تشخیص بسیار کمیاب AFB ₁ در ذرت Very Rare AFB ₁ Detection in Corn	طراحی پیچیده Complex design	فوق حساس، انتخابی، پایدار Ultra-sensitive, selective, stable	بسیار سریع Very fast	0.00000001	آنتی‌بادی AFB ₁ روی CS-VOE و GN AFB ₁ antibody on CS-GN and VOECT	VOECT FET آنتی‌بادی AFB ₁
(Namanya et al., 2025)	تشخیص AFB ₁ در غلات AFB ₁ Detection in Grains	فقط AFB ₁ ، نیاز به مواد خاص AFB ₁ only, special materials required	ساده، سریع انتخابی، مناسب برای تشخیص Simple, fast, selective, suitable for detection	سریع fast	90	نانوذرات نقره و آپتامر Silver nanoparticles and aptamer	Aptasensor رنگ‌سنجی با AgNP
(Wang et al., 2025)	تشخیص مایکوتوکسین‌ها در محل On-site Mycotoxin Detection	طراحی پیچیده، نیاز تخصصی Complex design, special requirement	مصرف کم، هزینه پایین، قابل حمل، حساس Low consumption, low cost, portable, sensitive	سریع، در محل Fast, on the site	معمولاً حساسیت پایین Usually low sensitivity	آنتی‌بادی، آپتامر، MIP Antibody, aptamer, MIP	Microfluidic biosensors (چندگانه)



شکل ۳- ساختار تست جریان جانبی (Mermiga et al., 2023)

Fig 3- Lateral flow test structure (Mermiga et al., 2023)

برای غلبه بر این مشکل، روش‌های پیش‌تصفیه مانند ستون‌های ایمونوآفینیته (IAC) یا کارتریج‌های فاز جامد (SPE) به‌کار می‌روند، ولی این ابزارها هزینه آنالیز را افزایش می‌دهند و ممکن است در شرایط آزمایشگاه‌های کوچک یا در کشورهای کم‌درآمد، قابل‌دسترس نباشند. پایداری آفلاتوکسین و شرایط نگهداری عامل دیگری است که کنترل و تشخیص را پیچیده می‌کند. آفلاتوکسین‌ها در برابر حرارت و شرایط فرآوری معمولی مقاوم‌اند و حتی پس از بو دادن یا فرآوری حرارتی، بخش عمده آن‌ها در محصول باقی می‌ماند (Veldman *et al.*, 1992). این پایداری شیمیایی به این معناست که یک خطای کوچک در کنترل رطوبت و دما در انبار می‌تواند باعث رشد قارچ و تولید سم شود که به‌سرعت کل محموله را غیرقابل مصرف می‌کند.

محدودیت‌های پشتیبانی و اقتصادی نیز باید مدنظر قرار گیرند. استفاده از روش‌های مرجع مانند LC-MS/MS در کشورهای صادرکننده پسته مستلزم سرمایه‌گذاری قابل توجه در زیرساخت‌های آزمایشگاهی، آموزش نیروی متخصص، و نگهداری تجهیزات است (Shephard, 2016). حتی در کشورهای پیشرفته، هزینه هر آزمون می‌تواند بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ دلار متغیر باشد، که برای غربالگری روزانه حجم بالای محصول مقرون‌به‌صرفه نیست. اینجاست که آزمون‌های سریع و بیوسنسورهای ارزان‌تر اهمیت پیدا می‌کنند، هرچند این روش‌ها اغلب نیاز به تأیید نتایج توسط تکنیک‌های مرجع دارند. چالش‌های قانونی و تفاوت استانداردها بین کشورها نیز مسئله‌ای اساسی است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، اتحادیه اروپا محدودیت بسیار سخت‌گیرانه‌ای برای AFB₁ و مجموع آفلاتوکسین‌ها در پسته اعمال می‌کند، در حالی که استانداردهای ایالات متحده یا برخی کشورهای آسیایی مناسب‌تر هستند (EC Regulation 2023/915; FDA, 2023). این تفاوت‌ها موجب می‌شود محموله پسته‌ای که در یک کشور قابل مصرف است، در کشور دیگر برگشت داده شود

در زنجیره تأمین پسته، یک استراتژی بهینه معمولاً شامل استفاده از LFA یا ELISA به‌عنوان غربالگری اولیه در مزرعه یا مراکز خرید، و به‌کارگیری (HPLC یا LC-MS-M) برای تأیید و پایش رسمی محموله‌های صادراتی است. توسعه بیوسنسورهای قابل حمل و اتصال آن‌ها به اینترنت اشیا (IOT) نیز آینده‌ای را نوید می‌دهد که در آن پایش آفلاتوکسین به‌صورت بلادرنگ و با پوشش وسیع امکان‌پذیر خواهد بود (Zhao *et al.*, 2023).

چالش‌های فنی و محدودیت‌های عملی در تشخیص آفلاتوکسین پسته

چالش‌های فنی در نمونه‌برداری و ناهمگنی آلودگی یکی از بزرگ‌ترین موانع در پایش دقیق آفلاتوکسین پسته است. برخلاف بسیاری از آلاینده‌های شیمیایی که به‌طور یکنواخت در محصول پخش می‌شوند، آفلاتوکسین‌ها معمولاً به‌شدت ناهمگن هستند، به این معنا که درصد بسیار کمی از دانه‌ها ممکن است حاوی مقادیر بسیار بالا باشند، در حالی که باقی محصول فاقد آلودگی قابل تشخیص باشد (Whitaker *et al.*, 2010). این ناهمگنی به‌ویژه در پسته به دلیل وجود پدیده‌هایی مانند شکاف زودرس پوسته و آلودگی‌های موضعی در خوشه‌ها بیشتر است (Schatzki, 1995). همین امر باعث می‌شود حتی نمونه‌برداری دقیق طبق پروتکل‌های بین‌المللی مانند دستورالعمل کمیسیون کدکس (Codex Alimentarius, 2014) باز هم با خطای نسبی همراه باشد. برای کاهش این خطا، محموله‌ها معمولاً به بخش‌های بزرگ ۱۰ تا ۳۰ کیلوگرمی تقسیم و مخلوط می‌شوند، اما این فرآیند هزینه‌بر و زمان‌بر است. اثر بافت و مداخله ترکیبات زمینه‌ای نیز در مراحل آنالیز چالش‌آفرین است. پسته دارای مقادیر بالای چربی، پروتئین و پلی‌فنول است که می‌تواند در فرآیند استخراج و آشکارسازی، با مولکول‌های هدف یا معرف‌ها برهم‌کنش کرکنند و موجب کاهش حساسیت یا بروز نتایج مثبت یا منفی کاذب شوند (Spanjer *et al.*, 2008).

¹ Liquid Chromatography Tandem Mass Spectrometry

کوانتومی، تشخیص سریع و بصری را ظرف چند دقیقه ممکن می‌کند. پیشرفت‌های اخیر باعث شده‌اند که LFA ها از نظر حساسیت به سطح ۲-۵ میکروگرم بر کیلوگرم برسند که با بسیاری از استانداردهای بین‌المللی تطابق دارد (Kovács *et al.*, 2021). نسل آینده LFA ها به صورت دیجیتال با قابلیت اتصال به گوشی‌های هوشمند عرضه خواهند شد، به طوری که کاربر می‌تواند با یک عکس از نوار آزمون، داده را به یک پایگاه ابری بفرستد و در همان لحظه تحلیل و هشدار دریافت کند. در بُعد اینترنت اشیا، سنسورهای محیطی و نمونه‌بردارهای خودکار می‌توانند به صورت پیوسته دما، رطوبت نسبی و حضور اسپورهای قارچی در هوای انبار یا محیط مزرعه را پایش کنند (Verdouw *et al.*, 2016). داده‌های جمع‌آوری شده با بی‌سیم به یک پلتفرم مرکزی منتقل می‌شود، جایی که مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی، ریسک آلودگی را بر اساس الگوهای آب‌وهوایی و پارامترهای نگهداری برآورد می‌کنند (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018). این مدل‌ها می‌توانند هشدارهای زودهنگام صادر کنند، به طوری که کشاورز یا صادرکننده پیش از رسیدن به نقطه بحرانی می‌تواند به کار اصلاحی دست زند. کشاورزی دقیق نیز نقش کلیدی خواهد داشت، به ویژه از طریق استفاده از پهپادها و سنسورهای طیفی که می‌توانند استرس گیاهی، آسیب حشرات یا نقاط پرخطر را شناسایی کنند. به کمک این داده‌ها، مداخلات مانند بیوکنترل یا برداشت زودهنگام فقط در مناطق پرریسک عملی می‌شود که هم هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و هم احتمال آلودگی را کم می‌کند (Shamshiri *et al.*, 2018). چالش اصلی این رویکرد آینده‌نگر، استاندارد سازی و پذیرش مقررات است. برای آنکه این فناوری‌ها به صورت گسترده در تجارت بین‌المللی به رسمیت شناخته شوند، لازم است سازمان‌هایی مانند WHO, FAO و Codex Alimentarius دستورالعمل‌های فنی و چارچوب‌های اعتبارسنجی یکپارچه تدوین کنند. آموزش بهره‌برداران و ایجاد زیرساخت‌های

و زیان اقتصادی جدی ایجاد کند (van Egmond *et al.*, 2007). مشکلات پذیرش فناوری‌های نوین مانند بیوسنسورها نیز باید بررسی شود. با وجود پتانسیل بالای این فناوری‌ها برای پایش در محل، موانعی مانند نبود استانداردهای اعتبارسنجی جهانی، نگرانی از قابلیت اطمینان در شرایط محیطی متنوع، و نبود چارچوب‌های قانونی برای پذیرش نتایج این دستگاه‌ها در تجارت بین‌المللی، مانع از گسترش سریع آن‌ها شده است (Piermarini *et al.*, 2020).

آینده فناوری‌های تشخیص و یکپارچه‌سازی با اینترنت اشیا (IOT) و کشاورزی دقیق

همگرایی بیوسنسورها، IOT و کشاورزی دقیق چشم‌انداز آینده تشخیص آفاتوکسین در پسته با یک تحول فناورانه اساسی در حال شکل‌گیری است؛ تحولی که در آن حسگرهای میدانی هوشمند، شبکه‌های ارتباطی بی‌سیم، و الگوریتم‌های یادگیری ماشین در یک اکوسیستم یکپارچه، پایش پیوسته آلودگی را از مزرعه تا مرحله صادرات ممکن می‌سازند. محور اصلی این تحول، گذار از رویکردهای آزمایشگاهی متمرکز به سیستم‌های تشخیص در محل است که می‌توانند بدون نیاز به نیروی انسانی متخصص و با حداقل زمان پاسخ، داده‌های دقیق فراهم کنند (Alahi & Mukhopadhyay, 2022).

بیوسنسورهای نسل جدید با استفاده از آپتامرها، نانوذرات فلزی و مواد دوبعدی مانند گرافن، حساسیت تشخیص را به محدوده فمتومولار رسانده‌اند و حتی قابلیت چند آنالیتی پیدا کرده‌اند، به این معنا که می‌توانند چندین میکوتوکسین را به طور هم‌زمان در یک نمونه شناسایی کنند (Zhang *et al.*, 2023). این امر برای زنجیره تأمین پسته حیاتی است، زیرا آلودگی به آفاتوکسین اغلب با حضور سموم دیگری مانند اوکراتوکسین A همراه است که می‌تواند ریسک بهداشتی را تشدید کند. سنسورهای جریان جانبی نیز در آینده جایگاه مهمی خواهند داشت، زیرا این فناوری با استفاده از خطوط کاپیلاری و نانوذرات طلا یا نانوذرات

مخابراتی در مناطق تولید پسته، پیش‌نیاز موفقیت این سیستم‌ها خواهد بود. با وجود این چالش‌ها، روند پیشرفت فناوری و کاهش هزینه تولید حسگرها نشان می‌دهد که در ۵ تا ۱۰ سال آینده ترکیب بیوسنسورهای پیشرفته، IOT و کشاورزی دقیق می‌تواند مدل مدیریت آفاتوکسین در پسته را به‌طور کامل متحول کند، از یک سیستم واکنشی و پس از وقوع، به یک سیستم پیشگیرانه و مبتنی بر پیش‌بینی تغییر دهد (Yoon et al., 2024).

نتیجه‌گیری

آفاتوکسین‌ها، به‌ویژه AFB₁، همچنان یکی از چالش‌های عمده در زنجیره تأمین پسته هستند و پیامدهای گسترده‌ای بر سلامت عمومی، اقتصاد کشاورزی و تجارت بین‌المللی دارند. شواهد اپیدمیولوژیک نشان می‌دهد که اثرهای بهداشتی این سموم نه‌تنها به شکل مسمومیت‌های حاد با مرگ‌ومیر بالا، بلکه در قالب مواجهه‌های مزمن و طولانی‌مدت با بروز سرطان کبد، تضعیف سیستم ایمنی و اختلال رشد کودکان بروز می‌کنند. از نظر اقتصادی، برگشت محموله‌ها، محدودیت‌های صادراتی و کاهش اعتماد بازارهای جهانی، میلیاردها دلار خسارت سالانه به تولیدکنندگان و صادرکنندگان وارد می‌کند. تحلیل عوامل خطر در تمام مراحل زنجیره تأمین از پیش‌برداشت تا انبارداری و فرآوری، نشان می‌دهد که ترکیب تنش‌های اقلیمی، آفات ناقل قارچ، و مدیریت نامناسب پس از برداشت مهم‌ترین محرک‌های آلودگی هستند. این امر ضرورت اجرای شیوه‌های کشاورزی خوب، مدیریت یکپارچه آفات (IPM) و سیستم‌های

تعارض منافع

نویسندگان در خصوص انتشار مقاله ارائه شده به‌طور کامل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافعی تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

- Abbas, H. K., Wilkinson, J. R., Zablutowicz, R. M., Accinelli, C., Abel, C. A., Bruns, H. A., & Weaver, M. A. 2020. Ecology of *Aspergillus flavus*, regulation of aflatoxin production, and management strategies to reduce aflatoxin contamination of corn. *Toxin Reviews*, 39(2), 142–154.
- Agriopoulou, S., Smaoui, S., & Varzakas, T. 2025. Postharvest management of mycotoxins in supply chains of agricultural produces. *CABI Reviews*. <https://doi:10.1079/cabireviews.2025.0011>

- Akullo, J. O., Okello, D. K., Mohammed, A., Muyinda, R., Amayo, R., Magumba, D., Mweetwa, A. 2025. A Comprehensive Review of Aflatoxin in Groundnut and Maize Products in Africa: Prevalence, Detection and Mitigation Strategies. *Journal of Food Quality*, 2025(1), <https://doi.org/10.1155/jfq/2810946>
- Alahi, M. E. E., & Mukhopadhyay, S. C. 2022. Detection methods of aflatoxin M1 in milk and dairy products: A review. *Biosensors*, 12(1), 28. <https://doi.org/10.3390/bios12010028>
- AOAC International. 2020. Official methods of analysis of AOAC International (21st ed.). AOAC International.
- Atehnkeng, J., Ojiambo, P. S., Cotty, P. J., & Bandyopadhyay, R. 2016. Field efficacy of a mixture of atoxigenic *Aspergillus flavus* link: Fr vegetative compatibility groups in preventing aflatoxin contamination in maize (*Zea mays* L.). *Biological Control*, 96, 72–79.
- Bandyopadhyay, R., Ortega-Beltran, A., Akande, A., Mutegi, C., Atehnkeng, J., Kaptoge, L., Senghor, A. L., Adhikari, B. N., & Cotty, P. J. 2016. Biological control of aflatoxins in Africa: Current status and potential challenges in the face of climate change. *World Mycotoxin Journal*, 9(5), 771–789.
- Battilani, P., Toscano, P., Van der Fels-Klerx, H. J., Moretti, A., Leggieri, M. C., Brera, C., Rortais, A., Goumperis, T., & Robinson, T. 2016. Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Scientific Reports*, 6, 24328. <https://doi.org/10.1038/srep24328>
- Bennett, J. W., & Klich, M. 2003. Mycotoxins. *Clinical Microbiology Reviews*, 16 (3), 497–516.
- Calderari, T. O., Iamanaka, B. T., Frisvad, J. C., Pitt, J. I., & Taniwaki, M. H. 2017. The biodiversity of *Aspergillus* section *Flavi* in Brazil: From isolation to molecular characterization. *International Journal of Food Microbiology*, 261, 57–66.
- Chulze, S. N. 2010. Strategies to reduce mycotoxin levels in maize during storage: A review. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 27(5), 651–657.
- Chu, F. S. 2018. Immunoassays for mycotoxins. In J. F. Leslie & A. F. Logrieco (Eds.), *Mycotoxin reduction in grain chains* (pp. 289–300). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118896209.ch18>
- Codex Alimentarius Commission. 2014. Code of practice for the prevention and reduction of aflatoxin contamination in tree nuts. CAC/RCP 59-2005. FAO/WHO.
- Codex Alimentarius Commission. 2018. General standard for contaminants and toxins in food and feed. CODEX STAN 193-1995. FAO/WHO.
- Cotty, P. J., & Jaime-Garcia, R. 2007. Influences of climate on aflatoxin producing fungi and aflatoxin contamination. *International Journal of Food Microbiology*, 119 (1–2), 109–115.
- Delfani, P., Thuraga, V., Banerjee, B., & Chawade, A. 2024. Integrative approaches in modern agriculture: IoT, ML and AI for disease forecasting amidst climate change. *Precision Agriculture*, 25(5), 2589–2613.
- Dövényi-Nagy, T., Rácz, C., Molnár, K., Bakó, K., Szláma, Z., Józwiak, Á., Farkas, Z., Pócsi, I., & Dobos, A. C. 2020. Pre-Harvest Modelling and Mitigation of Aflatoxins in Maize in a Changing Climatic Environment-A Review. *Toxins*, 12 (12), 768. <https://doi.org/10.3390/toxins12120768>
- European Commission. 2023. Commission Regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food. *Official Journal of the European Union*, L 119, 103–173.
- FAO. 2020. Mycotoxin prevention and control in food grains. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. 2022. FAOSTAT: Crops and livestock products. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. 2023. FAOSTAT statistical database. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FDA. 2022. Guidance for industry: Action levels for poisonous or deleterious substances in human food and animal feed. U.S. Food and Drug Administration.
- Gong, Y. Y., Cardwell, K., Hounsa, A., Egal, S., Turner, P. C., Hall, A. J., & Wild, C. P. 2004. Dietary aflatoxin exposure and impaired growth in young children from Benin and Togo: Cross sectional study. *BMJ*, 325 (7354), 20–21.
- Homola, J. 2008. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species. *Chemical Reviews*, 108(2), 462–493.
- IARC. 2012. Aflatoxins. In IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans (Vol. 100F, pp. 225–248). International Agency for Research on Cancer.

- Kamala, A., Kimanya, M., Haesaert, G., Tiisekwa, B., Madege, R., Degraeve, S., & Ortiz, J. 2018. Local post-harvest practices associated with aflatoxin and fumonisin contamination of maize in three agro-ecological zones of Tanzania. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 358, 1630–1644.
- Karami, C., Ranjbar, M., & Rahimi, F. 2021. Recent advances in electrochemical biosensors for detection of mycotoxins. *Microchimica Acta*, 188, 289. <https://doi.org/10.1007/s00604-021-04925-2>
- Khan, R. 2024. Mycotoxins in food: Occurrence, health implications, and control strategies-A comprehensive review. *Toxicon*, 248, <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2024.108038>
- Klich, M. A. 2007. Environmental and developmental factors influencing aflatoxin production by *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus*. *Mycoscience*, 482, 71–80.
- Lewis, L., Onsongo, M., Njapau, H., Schurz-Rogers, H., Lubber, G., Kieszak, S., Nyamongo, J., Backer, L., Dahiye, A. M., Misore, A., DeCock, K., Rubin, C., & the Kenya Aflatoxicosis Investigation Group. 2005. Aflatoxin contamination of commercial maize products during an outbreak of acute aflatoxicosis in eastern and central Kenya. *Environmental Health Perspectives*, 113 (12), 1763–1767.
- Li, C., Wen, K., Mi, T., Zhang, X., & Zhang, H. 2021. Advances in fluorescent immunoassays for mycotoxin detection: Principle, application and challenges. *Trends in Analytical Chemistry*, 136, 116193. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.116193>
- Liu, Y., & Wu, F. 2010. Global burden of aflatoxin-induced hepatocellular carcinoma: A risk assessment. *Environmental Health Perspectives*, 118 (8), 818–824.
- Magan, N., & Aldred, D. 2007. Post-harvest control strategies: Minimizing mycotoxins in the food chain. *International Journal of Food Microbiology*, 119 (1–2), 131–139.
- Medina, A., Rodríguez, A., & Magan, N. 2017. Climate change and mycotoxigenic fungi: Impacts on mycotoxin production. *Current Opinion in Food Science*, 18, 76–81.
- Mermiga, E., Pagkali, V., Kokkinos, C., & Economou, A. 2023. An aptamer-based lateral flow biosensor for low-cost, rapid and instrument-free detection of ochratoxin in food samples. *Molecules*, 2824, 8135. <https://doi.org/10.3390/molecules28248135>
- Michailides, T. J., & Morgan, D. P. 2004. *Aspergillus* molds and aflatoxins in pistachio nuts in California. *Phytopathology*, 946, 573–582.
- Namanya, L., Mukhokosi, E.P. & Mugampoza, E. 2025. Nanomaterials based biosensors applied for detection of aflatoxin B1 in cereals: a review. *Discov Mater* 5, 20. <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00199-6>
- Nguyen, T., Vu, D., Tran, M., & Nguyen, V. 2020. Nanomaterials-based lateral flow biosensors for detection of mycotoxins. *Biosensors*, 105, 67. <https://doi.org/10.3390/bios10050067>
- Palumbo, J. D., Mahoney, N. E., & Michailides, T. J. 2014. Controlling aflatoxin contamination in pistachios. *Plant Disease*, 986, 828–836.
- Piermarini, S., Volpe, G., Micheli, L., & Palleschi, G. 2020. Electrochemical biosensors for detection of aflatoxins: Principles and applications. *Electroanalysis*, 324, 791–812.
- Pitt, J. I., & Hocking, A. D. 2009. *Fungi and food spoilage* 3rd ed.). Springer.
- Probst, C., Njapau, H., & Cotty, P. J. 2007. Outbreak of an acute aflatoxicosis in Kenya in 2004: Identification of the causal agent. *Applied and Environmental Microbiology*, 738, 2762–2764.
- Ranjbar, A., Mohammadi, A. H., & Moradinezhad, F. 2025. Aflatoxins control during pre and postharvest stages in commercial pistachio production. *Journal of Stored Products Research*, 111, 102563. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2025.102563>
- Rhouati, A., Yang, C., Hayat, A., & Marty, J. L. 2016. A ptamer-based biosensors for the detection of mycotoxins. *Sensors*, 165, 593. <https://doi.org/10.3390/s16050593>
- Rodríguez, M., Pérez Vázquez, A., Barciela, P., Noras, K., Trafiałek, J., Trzaskowska, M., & Prieto, M. 2024. Insights into Toxicity: Molecular Mechanisms of Aflatoxin B1 and Ochratoxin A in Spices.
- Silvina Alaniz-Zanon, M., Bossa, M., Laura Chiotta, M., & Noemí Chulze, S. 2025. Biological strategies for aflatoxin mitigation in food and feed chains in a changing world. *Intech Open*. <https://doi:10.5772/intechopen.1009018>
- Sharma, D., Singh, R., Singh, K., & Mishra, M. 2023. Outbreaks of aflatoxicosis: A global public health perspective. *Toxin Reviews*, 421, 1–12.
- Sharma, S., Tuteja, S. K., Bhalla, V., & Suri, C. R. 2020. Optical biosensors for detection of mycotoxins: A review. *Biosensors and Bioelectronics*, 163, 112291. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112291>

- Shephard, G. S. 2016. Current status of mycotoxin analysis: A critical review. *Journal of AOAC International*, 994, 842–848.
- Spanjer, M. C., Rensen, P. M., & Scholten, J. M. 2008. LC-MS/MS multi-method for mycotoxins after single extraction, with validation data for peanut, pistachio, wheat, maize, cornflakes, raisins and figs. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 254, 472–489.
- Sun, X., Sun, J., Ye, Y., Ji, J., Sheng, L., Yang, D., & Sun, X. 2023. Metabolic pathway-based self-assembled Au@MXene liver microsomes electrochemical biosensor for rapid screening of aflatoxin B1. *Bioelectrochemistry*, 151, 108378.
- Tanveer, H., Glesener, H., Su, B., Bolsinger, B., Krajmalnik-Brown, R., & Voth-Gaeddert, L. E. 2025. Evaluating Methods for aflatoxin b1 monitoring in selected food crops within decentralized agricultural systems. *Toxins*, 171, 37. <https://doi.org/10.3390/toxins17010037>
- Teodoro, L. M. P., Lacerda, L. R. G., Santos, P. C. e., Ferreira, L. F., & Franco, D. L. 2025. Sensors and Biosensors as Viable Alternatives in the Determination of Contaminants in Corn: A Review 2021–2025). *Chemosensors* .299, 13,
- Thenuwara, G., Akhtar, P., Javed, B., Singh, B., Byrne, H. J., & Tian, F. 2025. Recent Advancements in Lateral Flow Assays for Food Mycotoxin Detection: A Review of Nanoparticle-Based Methods and Innovations. *Toxins*, 177, 348. <https://doi.org/10.3390/toxins17070348>
- Turner, N. W., Subrahmanyam, S., & Piletsky, S. A. 2009. Analytical methods for determination of mycotoxins: A review. *Analytica Chimica Acta*, 6322, 168–180.
- Vaclavikova, M., MacMahon, S., Zhang, K., & Begley, T. H. 2013. Application of solid-phase extraction and liquid chromatography–tandem mass spectrometry to determine mycotoxins in foods and beverages. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 304, 651–665.
- van Egmond, H. P., Schothorst, R. C., & Jonker, M. A. 2007. Regulations relating to mycotoxins in food. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 3891, 147–157.
- Veldman, A., Meijs, J. A., Borggreve, G. J., & Heeres-van der Tol, J. J. 1992. Carry-over of aflatoxin from cows' food to milk. *Animal Production*, 552, 163–168.
- Verdouw, C. N., Wolfert, J., Beulens, A. J. M., & Rialland, A. 2016. Virtualization of food supply chains with the internet of things. *Journal of Food Engineering*, 176, 128–136.
- Wang, S, Guan, X, & Sun, S. 2025. Microfluidic Biosensors: Enabling advanced disease detection. *sensors basel*. 1936. <https://doi.org/10.3390/s25061936>.
- Whitaker, T. B., Slate, A. B., Johansson, A. S., & Giesbrecht, F. G. 2010. Sampling and sample preparation of peanuts and pistachios for detection of aflatoxin. *Journal of AOAC International*, 932, 482–489.
- WHO. 2018. Aflatoxins. World Health Organization. www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/aflatoxins
- Wild, C. P., & Gong, Y. Y. 2010. Mycotoxins and human disease: A largely ignored global health issue. *Carcinogenesis*, 311, 71–82.
- Williams, J. H., Phillips, T. D., Jolly, P. E., Stiles, J. K., Jolly, C. M., & Aggarwal, D. 2004. Human aflatoxicosis in developing countries: A review of toxicology, exposure, potential health consequences, and interventions. *American Journal of Clinical Nutrition*, 805, 1106–1122.
- Wu, F. 2015. Global impacts of aflatoxin in maize: Trade and human health. *World Mycotoxin Journal*, 82, 137–142.
- Zhang, K., & Banerjee, K. 2020. A Review: Sample Preparation and Chromatographic Technologies for Detection of Aflatoxins in Foods. *Toxins*, 129, 539.
- Zhang, Y., Guo, Y., & Wu, A. 2017. The reduction of aflatoxin exposure in China leads to a decrease in hepatocellular carcinoma mortality. *Food Control*, 73, 267–272.
- Zhang, X., Li, P., Zhang, Q., Li, R., Zhang, W., Hu, X., & Ding, X. 2022. Advances in aptamer-based biosensors for detection of mycotoxins: Recent progress and future perspectives. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 154, 116683. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116683>
- Zhao, X., Li, H., & Zhang, Y. 2023. Integration of IoT and biosensor technologies for on-site detection of food contaminants: A review. *Sensors*, 233), 1295. <https://doi.org/10.3390/s23031295>

Original Research

Comprehensive analysis of risk factors and next generation detection technologies for aflatoxin control in the pistachio supply chain

N. Tabrizi¹, Sh Zomorodi

*Corresponding Author: ¹Agricultural Engineering Research Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran

Email: nadereh_tabrizi84@yahoo.com

Received: 28 June 2025 Accepted: 21 October 2025

<http://doi:10.22092/fooder.2025.370426.1429>

Abstract

Pistachios, valued for both their nutritional and economic importance, hold a prominent position in global food security and international trade. Rich in protein, unsaturated fats, fiber, and antioxidants, this oilseed crop plays a pivotal role in strengthening Iran's economy. However, contamination with aflatoxins potent toxic and carcinogenic metabolites produced by *Aspergillus* species, particularly *A. flavus* and *A. parasiticus* remains a persistent global challenge, creating serious barriers to the trade of this commodity. Aflatoxin B1 is recognized as the most powerful naturally occurring carcinogen, prompting stringent regulations and widespread public health concerns. In this systematic review, the risk of contamination is examined across all stages of the pistachio supply chain from pre-harvest climatic stresses and pest attacks to post harvest drying and storage practices. Conventional detection methods such as HPLC and LC-MS/MS are evaluated in terms of accuracy, cost, and speed, while rapid screening tools like ELISA and LFA are discussed for their practical applications. Furthermore, advanced biosensors including electrochemical and optical platforms enhanced with tamers and nanomaterials are introduced as promising solutions for on-site detection. The findings indicate that despite technological advances, challenges such as matrix effects, the need for precise calibration, and maintaining stability under harsh environmental conditions persist. Ultimately, by integrating pest management (IPM), biocontrol using non-toxigenic strains, and combining rapid diagnostic systems with digital monitoring, it is possible to effectively reduce contamination risks in the pistachio supply chain and meet international food safety standards.

Keywords: Aflatoxin, Biosensor, Epidemiology, IOT, Lateral flow assay, Pistachio

