

Original Article

Dynamic Seasonal Risk Modeling and Feed Component Interaction Analysis of Aflatoxin B1 Contamination in Aquafeeds: A Novel Approach to Smart Feed-Safety Management

Mohammad Javad Khalili¹ , Najmeh Vahed-Dehkordi^{1*} , Ebrahim Rahimi² 

1. Department of Food Hygiene, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

2. Research Center for Nutrition and Organic Products, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

***Corresponding author:** Najmeh Vahed-Dehkordi, Department of Food Hygiene, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran. Email: najmeh.vaheddehkordi@iau.ir**How to Cite this Article:**

Khalili MJ, Vahed-Dehkordi N, Rahimi E. Dynamic Seasonal Risk Modeling and Feed Component Interaction Analysis of Aflatoxin B1 Contamination in Aquafeeds: A Novel Approach to Smart Feed-Safety Management. Yafteh. 2026;28(1): 30-37

Received: February 14, 2026**Revised:** February 16, 2026**Accepted:** June 03, 2026**Keywords:**Aflatoxin B1
Animal Feed
Enzyme-Linked
Immunosorbent Assay
Food Contamination
Seasons**Abstract****Background:** Aflatoxin B1 (AFB1) contamination represents a major hazard in aquafeed and food safety, posing significant health and economic risks. Environmental conditions, particularly temperature and humidity, play a critical role in aflatoxin production by *Aspergillus* species. This study aimed to investigate seasonal variation in AFB1 and to evaluate the interaction between season and feed matrix type, including extruded complete feed, corn, soybean meal, and fish meal.**Materials and Methods:** A one-year longitudinal study using systematic sampling was conducted across four seasons. AFB1 concentrations were measured using an enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA). Data were analyzed by two-way analysis of variance (two-way ANOVA) to assess the effects of season, feed matrix, and their interaction. Tukey's post hoc test was applied for multiple comparisons.**Results:** The results demonstrated a significant interaction between season and feed component on AFB1 concentration ($P < 0.001$). The highest contamination levels were observed in summer, where AFB1 concentrations in complete feed ($6.84 \pm 0.69 \mu\text{g/kg}$) and corn ($6.35 \pm 0.28 \mu\text{g/kg}$) exceeded the European Union maximum limit of $5 \mu\text{g/kg}$. In contrast, fish meal remained below the limit of detection (LOD) across all seasons. The lowest contamination level was recorded in winter ($1.40 \pm 0.0039 \mu\text{g/kg}$).**Conclusion:** These findings indicate that AFB1 contamination is influenced by the interaction between season and feed matrix, with higher levels observed during warm seasons, particularly in corn and complete feed. Therefore, AFB1 monitoring programs should be seasonally based and matrix-specific, with enhanced screening during warmer periods.

مدل سازی دینامیک ریسک فصلی و تحلیل اثر متقابل اجزای جیره بر آلودگی آفلاتوکسین B1 در خوراک آبزیان: رویکردی نوین در مدیریت هوشمند ایمنی خوراک

محمد جواد خلیلی^۱، نجمه واحد دهکردی^{*۱}، ابراهیم رحیمی^۲

۱. گروه بهداشت مواد غذایی، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

۲. مرکز تحقیقات تغذیه و محصولات ارگانیک، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

*نویسنده مسئول: نجمه واحد دهکردی، گروه بهداشت مواد غذایی، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران ایمیل: najmeh.vaheddehkordi@iau.ir

استناد: خلیلی، محمدجواد؛ واحد دهکردی، نجمه؛ رحیمی، ابراهیم. مدل سازی دینامیک ریسک فصلی و تحلیل اثر متقابل اجزای جیره بر آلودگی آفلاتوکسین B1 در خوراک آبزیان: رویکردی نوین در مدیریت هوشمند ایمنی خوراک. یافته. دوره ۲۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵.

چکیده	تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳
مقدمه: سم توسط قارچ های آسپرژیلوس دارند. این پژوهش با هدف بررسی تغییرات فصلی AFB1 و ارزیابی اثر متقابل فصل و نوع ماتریس خوراک شامل خوراک کامل اکسترو شده، ذرت، کتجاله سویا و پودر ماهی انجام شد. مواد و روش ها: در یک مطالعه طولی یک ساله، نمونه برداری سیستماتیک در چهار فصل سال انجام شد. غلظت AFB1 در نمونه ها با استفاده از روش الایزا (ELISA) اندازه گیری گردید. داده ها با استفاده از تحلیل واریانس دوطرفه برای بررسی اثر فصل، نوع ماتریس و اثر متقابل آن ها تحلیل شدند و جهت مقایسه میانگین ها از آزمون تعقیبی توکی استفاده شد. یافته ها: نتایج نشان داد اثر متقابل فصل و جزء جیره بر غلظت AFB1 معنی دار است ($P < 0.001$). بیشترین میزان آلودگی در فصل تابستان مشاهده شد؛ به طوری که غلظت AFB1 در خوراک کامل $6/0 \pm 84/69 \mu\text{g/kg}$ و ذرت $6/0 \pm 25/28 \mu\text{g/kg}$ از حد مجاز $5 \mu\text{g/kg}$ تعیین شده توسط اتحادیه اروپا فراتر رفت. در مقابل، پودر ماهی در تمامی فصول پایین تر از حد تشخیص (LOD) باقی ماند. کمترین میزان آلودگی در زمستان ثبت شد ($\mu\text{g/kg}$) $1/0 \pm 40/0039$. بحث و نتیجه گیری: یافته ها نشان می دهد آلودگی AFB1 تحت تأثیر تعامل فصل و نوع ماتریس خوراک قرار دارد و در فصول گرم، به ویژه در ذرت و خوراک کامل، افزایش می یابد. بنابراین، پایش AFB1 باید به صورت هدفمند و مبتنی بر فصل و نوع خوراک انجام شود و در فصول گرم سال با حساسیت بیشتری غربالگری صورت گیرد.	واژگان کلیدی: آفلاتوکسین B1 خوراک دام آلودگی مواد غذایی فصل ها آزمون ایمونوسوربنت متصل به آنزیم (الایزا)

مقدمه

مدیریت ریسک مبتنی بر فصل است (۱۳). بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف تحلیل دینامیک فصلی AFB1 در زنجیره تولید خوراک آبزیان انجام شد، زیرا تعیین نقاط بحرانی کنترل در سامانه‌های Hazard Analysis and Critical Control Points; HACCP بدون داده‌های بومی از نوسانات فصلی امکان‌پذیر نیست (۱۴). در این مطالعه فرض شد که ریسک آلودگی در تابستان، هم به دلیل شرایط محیطی و هم به واسطه تغییر کیفیت نهاده‌های ورودی، بیشتر از سایر فصول است. انتظار می‌رود یافته‌های این پژوهش به طراحی راهبردهای پیشگیرانه در صنایع خوراک و جلوگیری از ورود جیره‌های آلوده به مزارع پرورشی کمک کند.

مواد و روش‌ها

طراحی مطالعه و استراتژی نمونه‌برداری

این پژوهش به صورت یک مطالعه طولی در بازه زمانی یک‌ساله (۱۴۰۳-۱۴۰۴) طراحی گردید. برای ارزیابی دینامیک فصلی، کل فرآیند به چهار دوره سه ماهه تقسیم شد. جیره مورد مطالعه شامل چهار ماتریس مختلف: خوراک کامل اکستروژ شده آبزیان، ذرت، کنجاله سویا و پودر ماهی بود. نمونه‌برداری به روش سیستماتیک طبق پروتکل استاندارد شماره ۲۸۳۶ سازمان ملی استاندارد ایران انجام شد. در هر فصل، تعداد ۷ تکرار از خوراک کامل و ۶ تکرار از هر یک از مواد اولیه (جمعاً ۲۵ نمونه در هر فصل و ۱۰۰ نمونه در کل سال) مستقیماً از خط تولید و انبار نهاده‌های شهرکرد جمع‌آوری گردید.

آماده‌سازی نمونه‌ها

جهت دستیابی به همگنی در آنالیز، تمامی نمونه‌های جمع‌آوری شده (۱ کیلوگرم از هر تکرار) با استفاده از آسیاب آزمایشگاهی مدل (Co. KG, & Drive, IKA-Werke GmbH Germany) تا رسیدن به اندازه ذرات کمتر از ۵۰۰ میکرومتر (مش ۴۰) پودر شدند. نمونه‌های پودر شده تا زمان استخراج سم در دمای منفی ۲۰ درجه سلسیوس در فریزر مدل (GFL 6485, GFL GmbH, Germany) نگهداری گردیدند.

استخراج AFB1

فرآیند استخراج بر اساس متدولوژی استاندارد کیت الایزا انجام یافت. مقدار ۵ گرم از هر نمونه با ۲۵ میلی‌لیتر از محلول استخراج‌کننده (متانول ۷۰ درصد، Merck KGaA, Germany) مخلوط گردید. سوسپانسیون حاصل به مدت ۱۰ دقیقه توسط شیکر اوربیتالی (Co. KG, & Vortex 3, IKA-Werke GmbH Germany) با سرعت بالا هم زده شد. سپس نمونه‌ها جهت جداسازی فاز مایع، به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سلسیوس با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه توسط دستگاه

تأمین امنیت غذایی پایدار در مواجهه با رشد فزاینده جمعیت جهان، صنعت آبزی‌پروری را به عنوان یکی از منابع اصلی تولید پروتئین حیوانی با کیفیت مطرح کرده است. با این حال، پایداری این صنعت به طور مستقیم تحت تأثیر کیفیت و ایمنی جیره‌های مصرفی قرار دارد (۱). گذار از پودر ماهی به منابع پروتئین گیاهی در فرمولاسیون خوراک آبزیان، اگرچه از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است، زنجیره تولید را با چالش آلودگی به مایکوتوکسین‌ها مواجه کرده است (۲). در این میان، آفلاتوکسین (AFB1; Aflatoxin B1; B1)، متابولیت ثانویه قارچ‌های رشته‌ای نظیر *Aspergillus flavus*، به دلیل ویژگی‌های سرطان‌زایی، جهش‌زایی و تضعیف سیستم ایمنی، توسط آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان در گروه اول عوامل سرطان‌زا طبقه‌بندی شده است (۳).

مکانیسم سمیت AFB1 در آبزیان پیچیده است؛ این سم پس از ورود به بدن، توسط آنزیم‌های سیتوکروم P450 در کبد به اپوکسیدهای فعال تبدیل می‌شود و با اتصال به DNA و پروتئین‌های سلولی، استرس اکسیداتیو و آپوپتوز را القا می‌کند (۴). مطالعات نشان داده‌اند گونه‌های حساسی مانند قزل‌آلا و میگو، حتی در مواجهه با دوزهای پایین AFB1 (کمتر از ۱۰ میکروگرم بر کیلوگرم)، دچار افت رشد، اختلال در عملکرد آنزیم‌های گوارشی و افزایش تلفات ناشی از عوامل بیماری‌زا می‌شوند (۵). این موضوع ضرورت بازنگری در حدود مجاز استاندارد‌های ملی و انطباق آن‌ها با معیارهای سخت‌گیرانه‌تری مانند حد مجاز ۵ میکروگرم بر کیلوگرم در اتحادیه اروپا را نشان می‌دهد (۶).

آلودگی مایکوتوکسینی در نهاده‌هایی مانند ذرت و کنجاله سویا، پدیده‌ای پویا است که به طور مستقیم از تغییرات اقلیمی و نوسانات فصلی تأثیر می‌پذیرد (۷). دمای محیط، رطوبت نسبی و فعالیت آبی، از عوامل اصلی تعیین‌کننده رشد قارچ و بیوسنتز سموم هستند (۸). در مناطق نیمه‌گرمسیری، تابستان به دلیل دمای ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت بالا، فصل بحرانی تولید AFB1 محسوب می‌شود (۹). با این حال، بسیاری از واحدهای تولیدی همچنان از الگوهای مدیریت کیفیت ایستا استفاده می‌کنند که تنها بر نمونه‌برداری‌های تصادفی متکی‌اند و ریسک فصلی را در نظر نمی‌گیرند (۱۰).

با وجود این، هنوز درک دقیقی از اثر متقابل زمان و نوع ماتریس خوراک بر پایداری AFB1 وجود ندارد. شواهد نشان می‌دهند که اگرچه فرآیندهای صنعتی مانند اکستروژن ممکن است بخشی از بار قارچی را کاهش دهند، اثر آن‌ها بر پایداری AFB1 محدود است و انتقال سم از مواد اولیه به محصول نهایی می‌تواند موجب تجمع آن در جیره کامل شود (۱۱، ۱۲). از این رو، پیش‌بینی نوسانات آلودگی و تنظیم تواتر آزمون‌های کنترلی، مستلزم پایش‌های طولی و رویکردهای

واریانس‌ها توسط آزمون لون (Levene's test) بررسی گردید. در مواردی که توزیع داده‌ها نرمال نبود، از تبدیل‌های لگاریتمی جهت نرمال‌سازی استفاده شد. برای تعیین اثرات اصلی فصل، نوع جزء جیره و اثر متقابل آن‌ها، از تحلیل واریانس دوطرفه (Two-way ANOVA) استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها در موارد معنی‌دار با آزمون تعقیبی توکی (Tukey's Post-hoc Test) در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P < 0.05$) انجام گرفت. تمامی محاسبات آماری با نرم‌افزار (Prism v10.0, GraphPad Software Inc., USA) انجام پذیرفت.

یافته‌ها

تحلیل داده‌های حاصل از سنجش AFB1 در ماتریس‌های چهارگانه خوراک آبزیان، بیانگر وجود یک الگوی نوسانی سیستماتیک است. مدل تحلیل واریانس دوطرفه (Two-way ANOVA) با ضریب تبیین بالا ($R^2 = 0.79$) نشان داد که ۷۹ درصد از نوسانات مشاهده شده در غلظت سم، مستقیماً توسط اثر متقابل فصل $\times$ جزء جیره قابل تفسیر است. نتایج مدل خطی نشان داد که اثر متقابل «فصل $\times$ جزء جیره» بر غلظت سم در سطح $P < 0.001$ معنی‌دار است؛ این امر مؤید آن است که نرخ تغییرات آلودگی در طول فصول، وابسته به نوع ماتریس جیره می‌باشد.

واکاوای غلظت AFB1 بر اساس اثر متقابل فصل و نوع ماتریس خوراک

برای بررسی تغییرات فصلی AFB1 در اجزای مختلف خوراک آبزیان، میانگین غلظت AFB1 در چهار فصل برای خوراک کامل، ذرت، کنجاله سویا و پودر ماهی مقایسه شد (جدول ۱). در هر ردیف جدول، حروف کوچک متفاوت نشان می‌دهند که غلظت AFB1 بین فصل‌ها برای همان جزء خوراک اختلاف معنی‌دار دارد (آزمون توکی، $P < 0.05$). حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بین آن فصل‌ها هستند. به‌طور کلی، بیشترین غلظت AFB1 در تابستان مشاهده شد؛ به‌ویژه در خوراک کامل و ذرت که میانگین‌ها از حد مجاز اتحادیه اروپا $5 \mu\text{g/kg}$ فراتر رفتند. در مقابل، پودر ماهی در تمام فصول در سطح زیر حد تشخیص باقی ماند و تغییر فصلی معنی‌داری نشان نداد.

(۵۴۳۰ R, Eppendorf SE, Germany) سانتریفیوژ شدند. عصاره رویی پس از عبور از کاغذ صافی واتمن شماره ۱ (Whatman, Maidstone, UK) برای مرحله بعد آماده گشت.

آنالیز کمی به روش الایزا (ELISA)

سنجش غلظت AFB1 با استفاده از کیت اختصاصی با حساسیت بالا (Europroxima Aflatoxin B1, Eurofins Technologies, Hungary) بر پایه روش ایمنوسوربنت متصل به آنزیم رقابتی انجام شد. مطابق دستورالعمل سازنده، ۵۰ میکرولیتر از استانداردها و نمونه‌های استخراج شده به میکروپلیت‌های پوشش داده شده با آنتی‌بادی منتقل گردید. پس از طی مراحل انکوباسیون در دمای اتاق و شستشو با دستگاه میکروپلیت واشر (HydroFlex, Tecan Group Ltd., Switzerland)، محلول سوپرسترا اضافه شد. واکنش رنگی با افزودن محلول متوقف‌کننده پایان یافت. شدت جذب نوری در طول موج ۴۵۰ نانومتر توسط دستگاه میکروپلیت ریدر (iMark, Bio-Rad Laboratories Inc., USA) قرائت گردید. حد تشخیص این روش ۰/۵ میکروگرم بر کیلوگرم تعیین شد. جهت ترسیم منحنی کالیبراسیون، از استانداردهای داخل کیت در غلظت‌های ۰، ۰/۲، ۰/۵، ۱ و ۲۰ نانوگرم بر میلی‌لیتر استفاده شد. غلظت نمونه‌های مجهول با استفاده از مدل ریاضی رگرسیون غیرخطی محاسبه گردید. به منظور تأیید صحت و دقت آزمون، درصد بازیابی با استفاده از نمونه‌های اسپایک شده ارزیابی شد که مقدار آن در محدوده ۸۵ تا ۱۱۰ درصد قرار داشت که در محدوده قابل قبول برای روش‌های آنالیتیکی قرار می‌گیرد. مقادیر اندکی بالاتر از ۱۰۰ درصد می‌تواند ناشی از اثرات ماتریکس نمونه یا تغییرات جزئی در پاسخ دستگاه باشد. همچنین تمامی نمونه‌ها و استانداردها به صورت دوتایی آنالیز شدند تا ضریب تغییرات درون‌آزمایشی زیر ۱۰ درصد تضمین گردد.

تحلیل آماری داده‌ها

داده‌های حاصل از آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل (4×4) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. پیش از انجام تحلیل‌های آماری، فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک (Shapiro-Wilk test) و همگنی

جدول ۱. مقایسه غلظت AFB1 ($\mu\text{g/kg}$) اجزای جیره در فصول مختلف

جزء جیره / فصل	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	P-Value
خوراک کامل	3.92 ± 0.25^b	6.84 ± 0.69^a	2.15 ± 0.18^c	1.40 ± 0.03^c	< 0.001
ذرت	3.10 ± 0.21^b	6.35 ± 0.02^a	1.90 ± 0.11^c	1.20 ± 0.01^c	< 0.001
کنجاله سویا	0.85 ± 0.04^b	1.28 ± 0.01^a	0.40 ± 0.02^c	0.05 ± 0.00^c	< 0.001
پودر ماهی	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	> 0.05

معنی‌دار بین فصل‌ها برای همان جزء جیره هستند ($P < 0.05$). حروف یکسان نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

مقادیر به‌صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار ارائه شده‌اند. حروف کوچک متفاوت در هر ردیف نشان‌دهنده اختلاف

تحلیل واریانس و سهم منابع تغییر

به منظور بررسی اثر فصل و نوع جزء خوراک بر میزان آلودگی به AFB1، مقادیر میانگین این سم در نمونه‌های مورد بررسی به صورت مقایسه‌ای تحلیل شد. نتایج این تحلیل نشان داد که تغییرات غلظت AFB1 نه تنها بین فصول مختلف، بلکه

میان اجزای مختلف جیره نیز متفاوت است. در جدول ۲، میانگین‌ها همراه با شاخص‌های آماری مربوطه و مقادیر P برای ارزیابی معنی‌داری این تفاوت‌ها ارائه شده است. این جدول امکان مقایسه هم‌زمان اثرات فصلی و ترکیب خوراک را بر الگوی آلودگی فراهم می‌کند.

جدول ۲. مقایسه اثر فصل، جزء جیره و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت AFB1

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	P-Value
فصل	۱۸۴/۴	۳	۶۱/۴۶	۴۱۲/۶	<۰/۰۰۱
جزء جیره	۳۱۲/۸	۳	۱۰۴/۲۶	۶۵۸/۲	۰/۰۰۴
اثر متقابل	۵۴/۱۲	۹	۶/۰۱	۷۶/۴	<۰/۰۰۱
خطا	۶/۷۸	۸۴	۰/۰۸	—	—

با توجه به بالا بودن مقدار F برای جزء جیره، مشخص شد که نوع ماده اولیه قدرتمندترین فاکتور در تعیین میزان ریسک آفاتوکسین است.

مقایسه میانگین اجزا در فصول بحرانی (تابستان و بهار)

به منظور بررسی اینکه در دوره‌های با خطر بالاتر، کدام اجزای جیره سهم بیشتری در تغییرات غلظت AFB1 دارند،

مقایسه میانگین غلظت AFB1 بین خوراک کامل، ذرت، کنجاله سویا و پودر ماهی در فصول بهار و تابستان انجام شد و نتایج مقایسه‌های پس‌آزمون توکی ارائه گردید (جدول ۳).

جدول ۳. مقایسه میانگین غلظت سم بین اجزای جیره در فصول گرم (میکروگرم بر کیلوگرم)

نوع ماتریس	میانگین غلظت (تابستان)	میانگین غلظت (بهار)	گروه‌بندی آماری بر اساس آزمون (Tukey)	سطح آلودگی
خوراک کامل	۶/۸۴	۳/۹۲	A	بالا
ذرت	۶/۳۵	۳/۱۰	A	بالا
کنجاله سویا	۱/۲۸	۰/۸۵	B	متوسط
پودر ماهی	۰/۰	۰/۰	C	ناچیز

حروف متفاوت در ستون گروه‌بندی آماری بر اساس آزمون (Tukey) نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون تعقیبی توکی در سطح ($P < 0.05$) است. میانگین‌هایی که دارای حرف مشترک هستند، اختلاف آماری معنی‌داری ندارند.

نتایج آزمون توکی نشان داد که در فصول بهار و تابستان، میانگین غلظت AFB1 در خوراک کامل و ذرت در یک گروه آماری قرار دارد و اختلاف معنی‌داری بین آن‌ها وجود ندارد؛ در حالی که این دو ماتریس در مقایسه با کنجاله سویا و پودر ماهی تفاوت معنی‌دار داشتند ($P < 0.05$).

انطباق‌سنجی با حدود مجاز استاندارد

برای ارزیابی انطباق نمونه‌ها با حد مجاز اتحادیه اروپا برای

AFB1 ($5 \mu\text{g/kg}$) هر نمونه به صورت دودویی طبقه‌بندی شد: منطبق (≤ 5) و غیر منطبق (> 5). سپس برای هر گروه (ماتریس-فصل)، تعداد کل نمونه‌ها، تعداد نمونه‌های غیرمنطبق و درصد عدم انطباق محاسبه گردید. برای ارزیابی معنی‌داری مشاهده عدم انطباق در هر گروه، از آزمون دقیق دوجمله‌ای (دوطرفه) استفاده شد (فرض صفر برای عدم انطباق $P = 0.05$) و مقادیر P در جدول ۴ گزارش شد.

جدول ۴. وضعیت انطباق نمونه‌ها با حد مجاز ۵ میکروگرم بر کیلوگرم AFB1 در فصل تابستان

متغیر مورد بررسی	تعداد کل نمونه	تعداد نمونه غیرمنطبق	درصد عدم انطباق	مقدار P
خوراک کامل (تابستان)	۷	۷	۱۰۰٪	۰/۰۰۸
ذرت (تابستان)	۶	۶	۱۰۰٪	۰/۰۳۱
کنجاله سویا (تابستان)	۶	۰	۰٪	۰/۰۳۱

با توجه به استفاده از آزمون دقیق دوجمله‌ای دوطرفه با فرض صفر $P = 0.05$ ، دو حالت عدم انطباق کامل (۶ از ۶) و انطباق کامل (۰ از ۶) از نظر آماری به یک اندازه از حالت تعادل ۵۰-۵۰ فاصله دارند. از این رو، با وجود تفاوت در جهت اثر، برای ذرت و کنجاله سویا مقدار P یکسان به دست آمده است.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این مطالعه نشان داد آلودگی به آفاتوکسین B1

در خوراک آبزیان یک پدیده ایستا نیست، بلکه تابعی از برهم‌کنش زمان (فصل) و نوع ماتریس خوراک است؛ به گونه‌ای که آزمون ANOVA دوطرفه، اثر متقابل فصل $\times$ جزء جیره را معنی‌دار نشان داد ($P < 0.001$) و بخش قابل توجهی از واریانس غلظت AFB1 را توضیح داد ($R^2 = 0.79$). این الگو به طور مستقیم بیانگر آن است که شدت تغییرات فصلی در همه اجزای خوراک یکسان نیست و ماتریس‌های گیاهی (به ویژه ذرت و خوراک کامل مبتنی بر آن) در برابر شرایط فصلی حساس‌تر عمل

سم در شرایط سردتر سازگار است. با این حال، وجود مقدار قابل اندازه‌گیری در زمستان نشان می‌دهد که حتی در فصل کم‌خطر نیز ریسک صفر وجود ندارد. از این رو، پیشنهاد می‌شود راهبرد کنترل، به شکل پایش حداقلی ثابت در تمام سال به‌علاوه افزایش تواتر و شدت کنترل در تابستان و اوایل پاییز طراحی شود؛ رویکردی که هم کارایی اقتصادی دارد و هم حساسیت لازم را در دوره‌های پرخطر تأمین می‌کند (۱۵).

نتایج انطباق‌سنجی با حد EU تصویر کاربردی‌تری از اهمیت یافته‌ها ارائه می‌دهد. عدم انطباق ۱۰۰ درصدی در تابستان برای خوراک کامل و ذرت نشان می‌دهد که مسئله صرفاً تفاوت آماری نیست، بلکه از منظر مقرراتی نیز می‌تواند به رد محموله، محدودیت در صادرات/تأمین، یا افزایش احتمال انتقال سم در زنجیره غذایی منجر شود. بنابراین ارزش افزوده اصلی بیشتر در نمایش ابعاد عدم انطباق (به‌ویژه ۱۰۰٪) است. در آینده، استفاده از مدل‌های رگرسیون لجستیک (با پیامد انطباق/عدم انطباق) یا آزمون‌های مقایسه نسبت‌ها بین ماتریس‌ها می‌تواند چهارچوب استنباطی دقیق‌تری برای تحلیل انطباق فراهم کند (۱۶).

از منظر پیامدهای مدیریتی، مجموعه نتایج یک توصیه روشن ارائه می‌دهد: در فصول گرم، به‌ویژه در مورد ذرت و محصول نهایی مبتنی بر آن (خوراک کامل)، باید غربالگری با حساسیت بالاتر و تواتر بیشتر انجام شود. این غربالگری صرفاً محدود به آزمون نهایی نیست و لازم است به کنترل‌های پیشگیرانه در زنجیره تأمین نیز تسری یابد؛ از جمله پذیرش نهاده بر اساس معیار رطوبت/کیفیت، انبارداری کنترل‌شده، و جداسازی محموله‌های مشکوک در تابستان. همچنین با توجه به آنکه خوراک کامل می‌تواند بازتابی از کیفیت نهاده‌های ورودی باشد، مدیریت ریسک باید از کنترل محصول نهایی به سمت کنترل نقاط بحرانی در ورودی و نگهداری نهاده‌ها منتقل شود (۱۷).

این مطالعه با طراحی طولی یک‌ساله و پوشش هم‌زمان چهار ماتریس کلیدی، تصویری مبتنی بر داده از دینامیک فصلی AFB1 در خوراک آبزیان ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که سیاست‌های کنترل کیفیت ایستا نمی‌توانند نوسانات واقعی ریسک را پوشش دهند. نتایج به‌روشنی تأیید می‌کند که مدیریت مؤثر AFB1 در صنعت خوراک آبزیان باید فصل‌محور و ماده‌محور باشد و تمرکز ویژه‌ای بر ذرت و تابستان داشته باشد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله نویسندگان این مقاله از معاونت آموزشی، معاونت تحقیقات و فناوری و همچنین دانشجویان دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد که در این پژوهش مشارکت کردند، تشکر و قدردانی به عمل می‌آورند.

می‌کنند. از منظر کاربردی، چنین نتیجه‌ای اهمیت طراحی برنامه‌های پایش پویا را تقویت می‌کند؛ به این معنا که کنترل AFB1 باید بر مبنای فصل و نوع ماده اولیه تنظیم شود، نه صرفاً نمونه‌برداری‌های یکنواخت و تصادفی در طول سال. بالاترین غلظت‌های AFB1 در تابستان در خوراک کامل $\mu\text{g/kg}$ $6/84 \pm 0/69$ و ذرت $\mu\text{g/kg}$ $6/35 \pm 0/28$ مشاهده شد که هر دو از حد مجاز سخت‌گیرانه اتحادیه اروپا $\mu\text{g/kg}$ ۵ فراتر رفتند. این یافته با منطق زیست‌محیطی بیوسنتز آفلاتوکسین هم‌راستا است؛ زیرا افزایش دما، رطوبت و فعالیت آبی در فصول گرم می‌تواند رشد *Aspergillus* و تولید سم را در طی ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل نهاده‌های گیاهی تسهیل کند. نکته مهم آن است که افزایش تابستانی در این مطالعه صرفاً یک افزایش خطی ساده نبود، بلکه مطابق معنی‌داری اثر متقابل، شدت افزایش در ماتریس‌های مختلف متفاوت ظاهر شد؛ به بیان دیگر، فصل زمانی به یک عامل خطر واقعی تبدیل می‌شود که در کنار ماتریس مستعد قرار گیرد (مانند ذرت). این نتیجه از دیدگاه مدیریت ریسک، دقیقاً همان چیزی است که در سامانه‌های کنترل مبتنی بر HACCP به آن نیاز است: شناسایی نقاطی که در آن‌ها احتمال وقوع خطر و پیامد آن هم‌زمان افزایش می‌یابد (۱۱).

قرار گرفتن خوراک کامل و ذرت در یک گروه آماری مشترک در بهار و تابستان نیز تفسیر مهمی دارد. خوراک کامل محصولی است که آلودگی بالقوه مواد اولیه را تجمع می‌کند و حتی اگر بخشی از فرایند صنعتی (مانند اکستروژن) بار میکروبی را کاهش دهد، AFB1 به‌عنوان مولکولی نسبتاً پایدار لزوماً به‌طور مؤثر حذف نمی‌شود؛ بنابراین انتظار می‌رود همبستگی آلودگی خوراک کامل با نهاده‌های پرریسک (به‌ویژه ذرت) بالا باشد (۱۲). در چنین شرایطی، کنترل کیفیت مؤثر باید از سطح محصول نهایی فراتر رود و در سطح مواد اولیه و شرایط نگهداری آن‌ها (کنترل رطوبت، تهویه، زمان ماند، و کنترل آفات انباری) تشدید شود؛ زیرا مداخله در نقطه خوراک کامل عملاً دیرینه‌تر و پرهزینه‌تر است (۱۳).

در مقابل، پودر ماهی در تمام فصول زیر حد تشخیص باقی ماند. این نتیجه ضمن آنکه می‌تواند به تفاوت ماهیت زیستی و زنجیره تأمین پودر ماهی نسبت داده شود، یک پیام روش‌شناختی نیز دارد: وقتی بخشی از ماتریس‌ها به‌طور پایدار در سطح غیرقابل اندازه‌گیری قرار می‌گیرند، نقش آن‌ها در مدل‌های تغییرات فصلی محدود می‌شود و تمرکز مدیریتی باید بر ماتریس‌هایی قرار گیرد که هم سطح آلودگی و هم دامنه نوسان بالاتری دارند. از طرفی، این مشاهده به شکل غیرمستقیم از روایی یافته‌های مربوط به ماتریس‌های گیاهی پشتیبانی می‌کند؛ زیرا نشان می‌دهد بالا بودن نتایج در ذرت/خوراک کامل احتمالاً ناشی از خطای سیستماتیک سنجش نیست و تفاوت ماتریسی واقعی وجود دارد (۱۴).

کمترین غلظت آلودگی در زمستان گزارش شد ($\mu\text{g/kg}$ $1/40 \pm 0/039$) که با کاهش فعالیت قارچ و افت نرخ بیوسنتز

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تضادی در منافع ندارند.

حمایت مالی

نویسندگان اعلام می‌کنند که برای انجام این مطالعه، هیچگونه بودجه یا حمایت مالی دریافت نکرده‌اند.

مشارکت نویسندگان

محمدجواد خلیلی در طراحی مطالعه، جمع‌آوری داده‌ها و نگارش پیش‌نویس اولیه مقاله مشارکت داشت. ابراهیم رحیمی در تحلیل داده‌ها، تفسیر نتایج و بازبینی علمی مقاله همکاری

نمود. نجمه واحد دهکردی در ایده پردازی پژوهش، طراحی مطالعه، نظارت بر اجرای مطالعه، و ویرایش نهایی مقاله نقش اصلی را ایفا کرد. تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید کرده‌اند.

ملاحظات اخلاقی

این پژوهش پس از بررسی‌های لازم، با کد اخلاق IR.IAU.SHK.REC.1404.319 به تصویب کمیته اخلاق دانشگاه رسید. کلیه مراحل پژوهش مطابق با اصول اخلاق در پژوهش انجام شده است.

References

1. Cao W, Yu P, Yang K, Cao D. Aflatoxin B1: metabolism, toxicology, and its involvement in oxidative stress and cancer development. *Toxicol Mech Methods*. 2022;32(6):395-419. DOI:10.1080/15376516.2021.2021339
2. Escrivá L, Font G, Manyes L, Berrada H. Studies on the Presence of Mycotoxins in Biological Samples: An Overview. *Toxins (Basel)*. 2017;9(8):251. DOI:10.3390/toxins9080251
3. Degen GH. Mykotoxine in Lebensmitteln: Vorkommen, Bedeutung und gesundheitliches Risiko [Mycotoxins in food: Occurrence, importance and health risk]. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz*. 2017;60(7):745-756. DOI:10.1007/s00103-017-2560-7
4. Chhaya RS, O'Brien J, Nag R, Cummins E. Prevalence and concentration of mycotoxins in bovine feed and feed components: A global systematic review and meta-analysis. *Sci Total Environ*. 2024;929:172323. DOI:10.1016/j.scitotenv.2024.172323
5. Kumar P, Gupta A, Mahato DK, Pandhi S, Pandey AK, Kargwal R, et al. Aflatoxins: A Global Concern for Food Safety, Human Health, and Their Management. *Front Microbiol*. 2022;6;14(10):687. DOI:10.3390/toxins14100687
6. European Union. Commission Regulation (EU) No 277/2012 of 28 March 2012 amending Annexes I and II to Directive 2002/32/EC of the European Parliament and of the Council as regards maximum levels and action thresholds for dioxins and polychlorinated biphenyls. *Off J Eur Union*. 2012. Link
7. Dai C, Tian E, Hao Z, et al. Aflatoxin B1 Toxicity and Protective Effects of Curcumin: Molecular Mechanisms and Clinical Implications. *Antioxidants (Basel)*. 2022;11(10):2031. DOI:10.3390/antiox11102031
8. Kaela CR, Lilly M, Rheeder JP, Misihairabgwi JM, Alberts JF. Mycological and Multiple Mycotoxin Surveillance of Sorghum and Pearl Millet Produced by Smallholder Farmers in Namibia. *Curr Microbiol*. 2023;80(5):164. DOI:10.1007/s00284-023-03263-7
9. Chalyy ZA, Kiseleva MG, Sedova IB, Tutelyan VA. *Vopr Pitan*. 2023;92(2):26-34. DOI:10.33029/0042-8833-2023-92-2-26-34
10. Mahdjoubi CK, Arroyo-Manzanares N, Hamini-Kadar N, García-Campaña AM, Mebrouk K, Gámiz-Gracia L. Multi-Mycotoxin Occurrence and Exposure Assessment Approach in Foodstuffs from Algeria. *Toxins (Basel)*. 2020;12(3):194. DOI:10.3390/toxins12030194
11. Eskola M, Kos G, Elliott CT, Hajšlová J, Mayar S, Krska R. Worldwide Contamination of Food-Crops with Mycotoxins: Validity of the Widely Cited 'FAO Estimate' of 25%. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr*. 2020 7;60(16):2773-89. DOI:10.1080/10408398.2019.1658570
12. Kheiri, F., Faghani, M., Berenjegani, M. M., Gouran, S. T., & Domakani, M. R. Polymorphism of the Gonadotropin-Releasing Hormone Receptor Gene and Its Association With Production Traits in Isfahani Native Hens. *Vet. Med. Sci*. 2026;12(4): e70969. DOI:10.1002/vms3.70969
13. Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, World Health Organization. Evaluation of certain mycotoxins in food: fifty-sixth report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Geneva: World Health Organization; 2002. Link
14. Wood GE. Aflatoxins in domestic and imported foods and feeds. *J Assoc Off Anal Chem*. 1989;72(4):543-548. Link
15. Streit E, Schatzmayr G, Tassis P, et al. Current situation of mycotoxin contamination and co-occurrence in animal feed--focus on Europe. *Toxins (Basel)*. 2012;4(10):788-809. DOI:10.3390/toxins4100788
16. Pleadin J, Frece J, Markov K. Mycotoxins in food and feed. *Adv Food Nutr Res*. 2019;89:297-345. DOI:10.1016/bs.afnr.2019.02.007
17. Gouran, S. T., Doosti, A., Jami, M. S. Brucella Abortus Antigen omp25 Vaccines: Development and Targeting based on Lactococcus Lactis. *Vet. Med. Sci*. 2023;9(4), 1908-1922. DOI:10.1002/vms3.1173.