مطاف
https://motaf.areeo.ac.ir

شناسایی و کنترل مسیرهای آلودگی فلزات سنگین در خوراک آبزیان: چارچوبی فرایندمحور مبتنی بر نقاط کنترل بحرانی

نیما شیری * ، مریم معزی، محمدرضا زاهدی

بخش تحقیقات آبزی پروری، پژوهشکده اکولوژی خلیج فارس و دریای عمان، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بندرعباس، ایران

کلمات کلیدی

انباشت زیستی
ایمنی غذایی
فلزات سنگین
کنترل فرایند
نقطه کنترل بحرانی

چکیده

فلزات سنگین به‌عنوان آلاینده‌های پایدار، از طریق خوراک و محیط آبزیان وارد بدن آنها شده و با قابلیت زیست‌تجمع، ریسک انتقال به زنجیره غذایی انسان را ایجاد می‌کنند. خوراک خشک آبزیان، به دلیل ماهیت چندمرحله‌ای تولید، تماس با تجهیزات فلزی و فرایندهای حرارتی و مکانیکی، به‌عنوان یک «کانون بالقوه آلودگی» مطرح است. این مطالعه‌ی تحلیلی، مسیرهای بالقوه آلودگی فلزات سنگین در طول فرایند تولید خوراک خشک را شناسایی و ارزیابی کرده و با تلفیق شواهد علمی، استانداردها و مشاهدات میدانی، چارچوبی مبتنی بر اصول مهندسی صنایع، تجزیه و تحلیل خطر و نقاط کنترل بحرانی (HACCP) و شرایط تولید خوب (GMP) ارائه می‌دهد. در این چارچوب، نقاط کنترل بحرانی (CCP)، منابع ریسک ذاتی و فرایندی و راهکارهای کنترلی در مراحل پذیرش مواد اولیه، آسیاب، اختلاط، شکل‌دهی، خشک‌کن، پوشش‌دهی، بسته‌بندی و انبارش مشخص شده‌اند. آلودگی فلزات سنگین نه یک رویداد تصادفی، بلکه نتیجه تعامل میان کیفیت مواد اولیه، طراحی تجهیزات و کارآمدی نظام‌های کنترلی است. به‌کارگیری مگنت‌ها، آشکارسازهای فلزی، پایش دوره‌ای افزودنی‌ها و آب بخار، نگهداشت پیشگیرانه تجهیزات و آموزش مستمر کارکنان، به‌عنوان راهکارهای عملی توصیه می‌شوند. این رویکرد پیشگیرانه، ایمنی زیستی خوراک، سلامت آبزیان و کاهش ریسک انتقال آلاینده‌ها به انسان را تضمین کرده و به پایداری اقتصادی و اعتبار صنایع خوراک آبزیان کمک می‌کند.

۱. بیان مسئله

ایمنی خوراک دام، طیور و آبزیان یکی از ارکان سلامت زیستی، امنیت غذایی و پایداری تولیدات پروتئینی است و آلودگی آن می‌تواند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم وارد زنجیره غذایی انسان شود. سازمان جهانی بهداشت، فلزات سنگین را آلاینده‌هایی پایدار و تجمع‌پذیر می‌داند که حتی در غلظت‌های پایین و مصرف مزمن، پیامدهای بهداشتی قابل‌توجهی ایجاد می‌کنند (WHO, 1989). از این رو، خوراک صنعتی علاوه بر نقش تغذیه‌ای، یک کانون بالقوه آلودگی محسوب می‌شود. فرایند تولید خوراک شامل مراحل

* نویسنده مسئول: nima.shiry@gmail.com

متعددی از تأمین مواد اولیه تا فرآوری، کنترل کیفیت و توزیع است که هر یک می‌تواند منبع ورود فلزات سنگینی مانند آرسنیک، کادمیوم، سرب و جیوه باشد (European Commission, 2015; AAFCO, 2024). مقررات ملی دامپزشکی ایران نیز بر پایش شیمیایی خوراک با تمرکز بر این فلزات تأکید دارند (سازمان دامپزشکی کشور، ۱۳۹۸).

در میان انواع خوراک، خوراک خشک به‌دلیل فرآیندهای چندمرحله‌ای، تماس گسترده با تجهیزات فلزی و اعمال تنش‌های مکانیکی و حرارتی، مستعد انباشت فلزات سنگین است (Hasting & Higgs, 1980). شواهد نشان می‌دهد که حتی با مواد اولیه منطبق با حدود مجاز، فرایند تولید می‌تواند موجب افزایش غلظت فلزات در محصول نهایی شود (Du et al., 2024). با توجه به ماهیت چندمرحله‌ای تولید خوراک خشک و نقش بالقوه هر مرحله در ورود یا تشدید آلودگی‌های شیمیایی، به‌ویژه فلزات سنگین، هدف این مطالعه ارائه یک تحلیل جامع و نظام‌مند از مسیرهای بالقوه آلودگی خوراک آبزیان در طول فرایند تولید است. بدین منظور، این مطالعه تحلیلی مبتنی بر بررسی اسناد، استانداردها، دستورالعمل‌های ملی و بین‌المللی، و شواهد منتشرشده علمی انجام شده و هم‌زمان با مشاهدات پایشی از خطوط واقعی تولید خوراک آبزیان تلفیق گردیده است. هدف از به‌کارگیری این روش‌شناسی، ایجاد یک پیوند نظام‌مند میان عملکرد واقعی خطوط تولید و اسلوب‌های فرایندی رایج در مهندسی صنایع، به‌ویژه الزامات شرایط خوب تولید[۱](GMP) و مقررات بهداشتی، بوده است. در این چارچوب، تلاش شده است تا با تطبیق جریان عملی تولید با الزامات تجزیه و تحلیل خطر و نقاط کنترل بحرانی [۲](HACCP) و مقررات بهداشتی، نقاط کنترل بحرانی [۳](CCP)، منابع اصلی ریسک آلودگی فلزات سنگین، و راهکارهای کنترلی مؤثر در هر مرحله شناسایی و دسته‌بندی شوند. هدف نهایی، فراهم‌سازی یک رویکرد کاربردی برای بهبود ایمنی زیستی خوراک آبزیان، کاهش ریسک انتقال آلاینده‌ها به زنجیره غذایی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های فنی و نظارتی در صنایع خوراک آبزیان است.

۲. معرفی راهکار

۱.۲. فرایند تولید خوراک آبزیان

روند کلی تولید خوراک آبزیان به شرح ذیل است:

الف) تهیه و بررسی مواد اولیه: تأمین از منابع معتبر، آزمایش کیفیت و صدور گواهی، تجزیه شیمیایی برای بررسی ناخالصی‌ها و ترکیب.

ب) تهیه فرمول غذایی: همکاری متخصصان تغذیه و جیره‌نویسی برای ایجاد ترکیب متناسب با گونه، مرحله رشد و نژاد.

ج) فرآوری:

- برای خوراک خشک: آسیاب، مخلوط کردن و اکسترود کردن.
- برای خوراک مرطوب: بسته‌بندی در ظروف دربسته و استریلیزاسیون.
- برای خوراک خام: فرایندهای انجماد یا خشک کردن همراه با نظارت بهداشتی.

د) کنترل کیفیت شامل آزمون‌های میکروبی، غربالگری فلزات سنگین یا سایر آلاینده‌ها.

ه) بسته‌بندی و برچسب‌گذاری: با درج ترکیبات، تاریخ انقضا، دستور مصرف و اطلاعات تغذیه‌ای طبق قوانین انجمن

[۱] GMP: Good manufacturing practice
[۲] HACCP: Hazard analysis critical control points
[۳] CCP: Critical control points

نهادهای رسمی کنترل خوراک دام آمریکا (AAFCO)[۴] یا نهادهای ملی دیگر.

و) توزیع و نگهداری: در این مرحله شرایط مناسب دما و رطوبت برای حفظ کیفیت و بهداشت باید مورد توجه قرار گیرد.

با توجه به احتمال انباشت و تغلیظ فلزات سنگین در خوراک خشک، این نوشتار بر فرایند تولید این نوع خوراک باریک شده و این جریان کلی در فلوچارت ذیل (شکل ۱) نشان داده شده است.

۲.۲. نقاط کنترل بحرانی در فرایند تولید خوراک آبزیان

جدول ۱ مراحل کلیدی تولید خوراک آبزیان را از دریافت مواد اولیه تا انبارش و توزیع، بر اساس رویکرد نقاط کنترل بحرانی (CCP) سازماندهی می‌کند. با توجه به اینکه آلودگی فلزات سنگین می‌تواند به طور عمده از دو مسیر اصلی یعنی مواد اولیه آلوده (نظیر غلات، روغن ماهی و پری‌میکس‌های معدنی) و سایش/ خوردگی تجهیزات (مانند آسیاب، اکسترودر و خطوط بخار) وارد زنجیره تولید شود، شناسایی سیستماتیک ریسک در هر گام و تعیین کنترل‌های متناسب (از آزمون‌های تأییدی ICP تا نگهداری پیشگیرانه و آشکارسازهای فلزی) ضروری است. در این چارچوب، سه نقطه به عنوان CCP اصلی تعریف شده‌اند: پذیرش مواد اولیه (CCP-1)، اختلاط (CCP-2) و الک نهایی/آشکارساز فلزی (CCP-3). خروجی‌های قابل ثبت هر مرحله، مستندسازی برای ممیزی و بهبود مستمر نظام ایمنی خوراک را فراهم می‌آورد.

۳.۲. اقدامات مورد نیاز در نقاط کنترل بحرانی جهت کاهش فلزات سنگین

آلودگی فلزات سنگین در خوراک آبزیان نه یک رویداد تصادفی، بلکه برآیندی قابل‌پیش‌بینی از تعامل میان سه عامل است: کیفیت مواد اولیه، طراحی و نگهداشت خط تولید و کارآمدی نظام‌های کنترلی. این آلودگی به دلیل زیست‌تجمعی فلزات در اندام‌های آبزیان و انتقال به زنجیره انسانی، پیامدهای بهداشتی جدی به دنبال دارد.

در پاسخ به این چالش، چارچوب فرایندمحور مبتنی بر اصول HACCP (FDA, 1997) شامل سه سطح اقدام ارائه می‌شود:

شکل ۱. فلوچارت جریان کلی تولید خوراک خشک آبزیان (برگرفته از Hasting & Higgs, 1980)

[۴] AAFCO: Association of American Feed Control Officials

جدول ۱. ریسک‌ها و کنترل‌ها در مراحل تولید خوراک آبزیان (رویکرد CCP)

گام	مرحله فرایند	ریسک اصلی	کنترل‌ها	خروجی قابل ثبت
۱	دریافت و پذیرش مواد اولیه (CCP-1)	فلزات در غلات، آرد و سبوس، پروتئین‌های حیوانی، روغن‌ها، نمک، آب فرایندی	- نمونه‌برداری استاندارد و آزمون ICP-MS/ICP-OES (مطابق استاندارد ملی ۱۲۹۶۸)؛ - بررسی گواهی آزمون (CoA) و ممیزی تأمین‌کننده؛ - پایش آب فرایندی(حدود آب آشامیدنی؛ As, Pb, Cd, Hg)؛ - تفکیک سیلوها و جلوگیری از برگشت گردوغبار.	- فرم پذیرش؛ - نتایج آزمون؛ - برچسب وضعیت «آزاد/قرنطینه».
۲	پاک‌سازی اولیه و جداسازی فلزی	ورود ذرات فلزی Fe/Cr/Ni	- مگنت نئودیمیومی پیش از آسیاب و پیش از میکس؛ - سپراتور سنگ و تراشه و الک درشت؛ - ثبت دوره‌ای قدرت جذب مگنت و وزن ناخالصی‌های جداشده	ناخالصی‌های جداسازی شده
۳	آسیاب	انتقال براده‌های ریز فلزی (نقطه حساس سایش)	- استفاده از چکش و سرند با فولاد مقاوم به سایش؛ - اجرای برنامه نگهداشت پیشگیرانه (PM)؛ - نصب مگنت قبل و بعد از آسیاب + الک مجدد؛ - نقشه نقاط سایش و برنامه تعویض	- ثبت بازرسی سایش؛ - کارایی مگنت.
٤	غربال‌گری	باقیماندن ناخالصی‌های فلزی	- بازرسی مش‌ها؛ - نظافت خشک؛ - ثبت Reject.	- یکنواختی ذرات؛ - گزارش ضایعات.
٥	وزن‌کشی و بچینگ	آلودگی متقاطع و سایش تجهیزات	- توالی تولید از کم‌ریسک به پرریسک؛ - ساخت تجهیزات از استیل ۳۱۶/۳۰٤ و پاسیو کردن؛ - کالیبراسیون منظم ترازوها.	- گزارش کالیبراسیون؛ - گزارش اورهاول.
٦	اختلاط (CCP-2)	پری‌میکس‌های معدنی	- آزمون دوره‌ای پری‌میکس‌ها از نظر Pb/Cd (استاندارد ملی شماره ۱۳۵۷۸)؛ - آزمون یکنواختی میکس (CV%)؛ - بازبینی مکانیکی پره‌ها.	نمونه ترکیبی قابل ردیابی

۷	کاندیشنینگ (کنترل بخار)	بخار غیربهداشتی و کندانس آلوده	- تولید بخار خوراکی[۵]؛ - خطوط استنلس و بلودان[۶] منظم بویلر؛ - پایش فلزات در آب تغذیه و کندانس.	گزارش آنالیز آب تغذیه
۸	شکل‌دهی (پلت / اکسترودر)	سایش شدید قطعات	- انتخاب آلیاژ مقاوم، کنترل فشار و لرزش؛ - نمونه‌برداری دوره‌ای محصول خروجی؛ - مگنت و الک پس از پلت.	- ثبت نمونه‌برداری؛ - عملکرد مگنت.
۹	خشک‌کن و کولر	خوردگی و گردوغبار محیط	- فیلتر هوای ورودی؛ - سطوح استنلس؛ - بازرسی مبدل‌ها و کانال‌ها.	گزارش بازرسی
۱۰	پوشش‌دهی[۷]	روغن ماهی آلوده و سایش نازل‌ها	- آزمون تأییدی روغن‌ها؛ - فیلتر ریزدانه روغن و تجهیزات استیل.	گواهی آنالیز روغن
۱۱	الک نهایی و آشکارساز فلزی (CCP-3)	قطعات فلزی Fe/Non-Fe/SS	- آشکارساز فلزی (با حساسیت متناسب)؛ - X-ray (اختیاری)؛ - ثبت سوابق عملکرد.	لاگ عملکرد آشکارساز
۱۲	بسته‌بندی	مواد چاپی و اجزای فلزی	- استفاده از بسته‌بندی Food-grade با DoC؛ - حذف منگنه فلزی؛ - آشکارساز فلزی پس از بسته‌بندی.	تأیید نهایی پیش از خروج
۱۳	انبارش و توزیع	آلودگی ثانویه محیطی	- انبار تمیز و خشک (RH<60%) - پالت سالم، تهویه و بازرسی دوره‌ای کیسه‌ها	گزارش بازرسی انبار

[۵] Food-grade steam
[۶] Blowdown
[۷] Coating

۲.۳.۱. *طراحی خط تولید*

نصب مگنت در نقاط حساس پیش از آسیاب، پیش و پس از شکل‌دهی و پیش از بسته‌بندی (شکل۲)، به‌کارگیری آشکارسازهای X-ray برای محصولات صادراتی (شکل ۳)، به‌سازی خطوط بخار با استنلس استیل و تصفیه آب بویلر برای تولید بخار خوراکی، و تعبیه خطوط اختصاصی برای فرمول‌های پرریسک.

۲.۳.۲. *پایش نقاط کنترل بحرانی در فرآیند تولید*

پایش مواد پرریسک (مانند سبوس برنج که حاوی آرسنیک و روغن ماهی و مکمل‌های معدنی که ممکن است حاوی جیوه و سرب باشند)، کیفیت آب و بخار، عملکرد مگنت و آشکارساز فلزی و آزمون محصول نهایی. پایش دوره‌ای شامل سنجش As, Hg, Cd, Pb با روش‌های ICP-MS و-ICP OES(ورودی و فصلی)، پایش Fe و Cu در آب، بخار و کندانس (فصلی)، و آزمون محصول نهایی (ماهانه/فصلی بر اساس ریسک فرمول).

۲.۳.۳. *نگهداری پیشگیرانه و بهداشت تجهیزات*

ثبت سایش و تعویض به‌موقع قطعات آسیاب، پلت‌میل، اکسترودر و خشک‌کن ـ نظیر چکش‌ها، سرندها و مارپیچ‌ها (شکل ٤) تا منجر به آزادسازی ریزبراده‌های آهن، کروم و نیکل نشوند؛ استفاده از سطوح استنلس استیل ۳۱۶/۳۰٤ [۸] با پرداخت پاسیو و پولیش مناسب؛ اجتناب از رنگ‌های پوشرونده[۹] در تماس مستقیم با محصول.

گذار از رویکرد واکنشی (تشخیص آلودگی در محصول نهایی) به رویکرد پیشگیرانه و فرایندمحور (کنترل در مبدأ و طی تولید) پیش‌شرط اساسی برای تضمین سلامت آبزیان، حفاظت از مصرف‌کننده انسانی و پایداری اقتصادی صنعت خوراک آبزیان است. راهنمای امنیت زیستی سازمان دامپزشکی ایران نیز همین محورها را تأیید می‌کند (سازمان دامپزشکی کشور، ۱۳۹۸). اجرای نظام HACCP همراه با پایش مستمر و نگهداشت تجهیزات، مؤثرترین راهکار کاهش ریسک فلزات سنگین در خوراک آبزیان به شمار می‌رود.

۳. توصیه ترویجی و جمع بندی

۱. بکارگیری مواد اولیه با کیفیت (همراه با آزمون-ICP MS/ICP-OESبرای فلزات سنگین در پذیرش)؛

۲. نصب مگنت و آشکارساز فلزی در ٤ نقطه: پیش از آسیاب، پیش از میکسر، پس از اکسترودر و پیش از بسته‌بندی؛

۳. نصب آشکارساز X-ray برای محصولات حساس و صادراتی توصیه می‌شود.

٤. پایش دوره‌ای (فصلی) سنجش فلزات سنگین در آب فرایندی، بخار، کندانس و محصول نهایی و ثبت نتایج در فرم‌های مخصوص؛

۵. تعویض به‌موقع قطعات و چکش‌های آسیاب، پلت‌میل، سرندها، مارپیچ‌ها، پره‌های اکسترودر و خشک‌کن (چکش‌ها، سرندها، مارپیچ‌ها)؛

٦. استانداردسازی سطوح تماس الزامی است. در این رابطه توصیه می‌شود تمام تجهیزات در تماس با خوراک از استنلس استیل ۳۱٦/۳۰٤ با پرداخت پاسیو باشند.

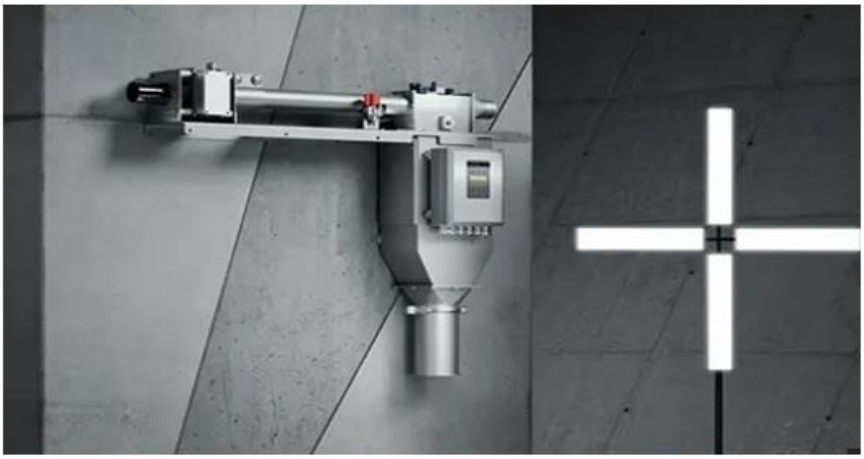
۷. استفاده از رنگ‌های معمولی یا پوشرونده ممنوع در سطوحی که در تماس مستقیم با محصول است می‌بایست پرهیز شود.

---

[۸] استنلس ۳۰٤ (مقاوم به خوردگی عمومی) و ۳۱٦ (مقاوم‌تر در برابر نمک و رطوبت، مناسب خوراک آبزیان).

[۹] پوشش‌هایی که به‌دلیل چسبندگی ضعیف یا خوردگی، ورقه‌های ریز حاوی پیگمنت‌های فلزی (مانند سرب یا کروم) از آن جدا شده و وارد خوراک می‌شوند. این ذرات از آشکارسازهای فلزی معمولی عبور کرده و خطر آلودگی پایدار ایجاد می‌کنند.

شکل ۲. نمونه‌هایی از مگنت نئودیمیومی مورد استفاده در خط تولید



شکل ۳. یک نمونه آشکارساز فلزی X-ray

شکل ٤. نمایی از قرارگیری چکش‌ها در آسیاب (نقطه حساس سایش)

۸. تخلیه‌ی برنامه‌ریزی شده و کنترل‌شده‌ی بخشی از آب درون دیگ بخار به بیرون از سیستم خطوط (بلودان)
۹. نگهداری محصول در انبار خشک (با رطوبت نسبی زیر ۶۰ درصد) و بدون گردوغبار بر روی پالت‌های سالم.

تقدیر و تشکر

با سپاس و قدردانی ویژه از جناب آقای بهنام مرضی، مدیر تولید گروه تولیدی پروتئین‌سازان قومس (سمنان)، و جناب آقای دکتر رضا سلیقه زاده، مسئول فنی بهداشتی کارخانه خوراک آبزیان بارانی شوشتر (خوزستان)، که با همکاری ارزشمند خود و با در اختیار گذاشتن دیدگاه‌های تخصصی و جزئیات فنی فرآیندهای تولید، نقش مؤثری در پیشبرد این فعالیت علمی ایفا نمودند.

منابع:

سازمان دامپزشکی کشور، ۱۳۹۸. دستورالعمل اجرایی ویژگی¬های ظاهری، میکروبی و شیمیایی مواد اولیه و خوراک آماده دام، طیور و آبزیان؛ به انضمام حد مجاز فلزات سنگین ابلاغیه به شرکت¬های تولیدکننده (شماره ۹۳/۳۱/۹۱۳۱۷ مورخ ۱۳۹۳/۱۲/۱۰). مقررات ملی دامپزشکی 4 .(NVR) صفحه.

سازمان دامپزشکی کشور، ۱۴۰۳. راهنمای امنیت زیستی کارخانجات خوراک دام. برگرفته از فدراسیون بین¬المللی صنعت خوراک دام و انجمن صنایع خوراک دام، طیور و آبزیان ایران. ۳۷ صفحه.

سازمان ملی استاندارد، ۱۳۹۶. استاندارد ملی شماره ۱۲۹۶۸: خوراک انسان و دام ـ بیشینه رواداری فلزات سنگین و روش‌های آزمون. ۸۷ صفحه

سازمان ملی استاندارد، ۱۴۰۲. استاندارد ملی شماره ۱۳۵۷۸: خوراک دام- مکمل ویتامینی و معدنی – ویژگی‌ها و روش¬های آزمون. ۵۵ صفحه

Association of American Feed Control Officials, 2024. AAFCO Official Publication. AAFCO, Champaign, IL, USA. 144p.

Du, J., Zhou, K., Jiang, H., Hu, Sh., Zhang, W., Zheng, Q., Zhou, G., Zhang, N., 2024. Individual and Combined Contamination of the Heavy Metals in Commercial Cat and Dog Food. *Research Square*. 17p. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4838876/v1

European Commission, 2015. Commission Regulation (EU) 2015/186 of 6 February 2015 amending Annex I to Directive 2002/32/EC of the European Parliament and of the Council as regards maximum levels of undesirable substances in feed. *Official Journal of the European Union L* 31: 11–17.

Food and Drug Administration of United States (US.FDA), 1997. HACCP Principles & Application Guidelines. Online published by FDA, Accessible at: https://www.fda.gov/food/hazard-analysis-critical-control-point-haccp/haccp-principles-application-guidelines

Hasting, WH., & Higgs, D., 1980. Feed milling processes, In: Fish Feed Technology, Pillay (Ed). Food and Agriculture Organization of the United Nations. ADCP/REP/80/11 published by FAO. ISBN 92-5-100901-5. 293-313p.

World Health Organization (WHO), 1989. Heavy metals-environmental aspects, Environment Health Criteria. Geneva, Switzerland. 85p.

Identification and Control of Heavy Metal Contamination Pathways in Aquafeeds: A Process-Oriented Framework Based on Critical Control Points

Nima Shiry, Maryam Moezzi, Mohammadreza Zahedi*

Department of Aquaculture, Persian Gulf and Oman Sea Ecological Research Center, Iranian Fisheries Science Research Institute (IFSRI), Bandar Abbas, Iran

Key words

Bioaccumulation
Feed Hygiene
Heavy metal
Process control
Critical control point (CCP)

Abstract

Heavy metals enter aquatic organisms through direct uptake and contaminated feed, persist via bioaccumulation, and transfer along food chains, posing ecological and human health risks. Metabolically active tissues (liver, kidney, gills, muscle) preferentially accumulate metals, with toxicity influenced by exposure route, dose, and species sensitivity. Field evidence, including studies from Iranian coastal systems, shows that metals such as mercury and nickel may present significant carcinogenic risks even when conventional risk indices are low. Feed safety is therefore a cornerstone of biosecurity and sustainable aquaculture. Industrial aquafeeds serve both as essential nutritional inputs and potential contamination hotspots, as heavy metals may be introduced during raw material sourcing, processing, and handling. Dry aquafeeds are particularly vulnerable due to multi-stage processing, extensive metal–equipment contact, and mechanical and thermal stresses. This study applied a systematic, process-oriented framework to identify heavy metal contamination pathways throughout dry aquafeed production. Scientific literature and regulatory standards were integrated with on-site observations. Production stages were evaluated under Good Manufacturing Practice (GMP) using Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP) principles. Contamination was cumulative, arising from intrinsic raw material properties and secondary processing inputs. Raw material reception—especially mineral premixes, fish oil, rice bran, and process water—was the dominant primary risk source. Mechanical operations were the most critical secondary pathway due to equipment wear. Key CCPs included ingredient acceptance, utility quality, equipment management, and final product verification. Overall, heavy metal contamination is process-driven, supporting preventive HACCP-based control over end-product testing.