



Research Paper

The Impact of Absorbent Packaging Characteristics on Mycotoxin Accumulation in Stored Rice

Ehsan Karamrezaee^{1*}, Fatemeh Karamrezaee²

¹ Department of Food Science and Engineering, Payam-e Noor University, Tehran, Iran

² Nasibeh Campus, Farhangian University, Tehran, Iran

Received: 23/08/2025, Accepted: 25/09/2025

Abstract

Mycotoxin contamination in stored rice resulting from the growth of toxigenic fungi under suboptimal storage conditions, particularly elevated temperature and humidity poses a serious threat to food safety and economic sustainability in rice-dependent regions and can lead to post-harvest losses of 5% to 15%. This study investigated the role of moisture-absorbing packaging characteristics in mitigating mycotoxin accumulation. A total of 120 samples of long-grain rice (*Oryza sativa*) were stored for six months under controlled conditions (25–35°C, 60–90% relative humidity) in four packaging types: silica gel-based, clay-based, nanoparticle-enhanced, and control (non-absorbent). Mycotoxin levels were quantified biweekly using high-performance liquid chromatography (HPLC), and fungal growth was assessed via colony-forming unit (CFU) counts. Data were analyzed using two-way ANOVA and regression modeling in R software. Results demonstrated that nanoparticle-enhanced and silica gel-based packaging reduced mycotoxin levels by approximately 62%. Specifically, mean aflatoxin and fumonisin concentrations reached 1.8 µg/kg and 3.5 µg/kg, respectively, compared to 12.4 µg/kg and 9.8 µg/kg in the control group ($p < 0.001$). Furthermore, a strong and statistically significant positive correlation was observed between moisture and mycotoxin accumulation in non-absorbent packaging ($r = 0.89$, $p < 0.01$). These findings indicate that advanced absorbent packaging systems effectively enhance food safety by suppressing fungal proliferation and offer practical solutions for reducing both health hazards and economic losses. Nevertheless, further research remains essential to identify more cost-effective options for large-scale implementation.

Keywords: Mycotoxin accumulation, Absorbent packaging, Stored rice, Fungal growth, Humidity control

Citation: Karamrezaee E, Karamrezaee F, The Impact of Absorbent Packaging Characteristics on Mycotoxin Accumulation in Stored Rice. *Quality and Durability of Agricultural Products and Food Staffs*, 2025; 5(1): 1-14.



© The Author(s) **Publisher:** Islamic Azad University of Kerman, Iran

DOI: <https://doi.org/10.71516/qafj.2025.1217908>

* **Corresponding author:** Ehsan Karamrezaee, **Email:** ehsankaramrezaee@gmail.com

Extended Abstract

Introduction

Rice, as a staple food for over half of the global population, plays a pivotal role in ensuring food security. However, its susceptibility to fungal contamination during storage poses a serious threat to both human health and economic stability, particularly in tropical and subtropical regions. Mycotoxigenic fungi mainly *Aspergillus* and *Fusarium* species produce toxic secondary metabolites such as aflatoxins and fumonisins, which are potent carcinogens and immunosuppressants. Annually, 5–15% of stored rice is lost due to such contamination, with significant implications for public health and trade, especially in low-income, rice-dependent countries like those in Southeast Asia and Sub-Saharan Africa. Conventional storage methods often fail under high temperature and humidity conditions, exacerbating fungal growth and mycotoxin accumulation. In response, innovative packaging technologies particularly moisture-absorbing and toxin-binding systems have emerged as promising strategies to mitigate these risks. This study investigates the efficacy of advanced absorptive packaging materials, including silica gel, activated clay (montmorillonite), and nano-enhanced composites, in suppressing mycotoxin accumulation in stored rice under simulated tropical storage conditions.

Methods

The research was conducted in a controlled laboratory environment simulating tropical storage conditions (25–35°C and 60–90% relative humidity). A total of 120 samples of long-grain rice (*Oryza sativa*) were sourced from commercial suppliers in Southeast Asia to reflect real-world post-harvest scenarios. Samples were divided into four groups (n=30 each): (1) control (non-absorptive

woven polypropylene bags), (2) silica gel-based packaging, (3) activated clay-based packaging, and (4) nano-enhanced packaging incorporating silica nanoparticles (10 nm, surface area: 600 m²/g) and zeolite. Prior to packaging, rice was standardized to 12% moisture content and screened for pre-existing fungal or chemical contamination. Over a six-month period, samples were monitored biweekly for fungal load (via colony-forming units, CFU/g) and mycotoxin levels (aflatoxin B1 and fumonisin B1) using high-performance liquid chromatography (HPLC; Agilent 1260 Infinity II). Data were analyzed using two-way ANOVA and multiple regression models in R (v4.3.2) to assess the interaction effects between packaging type and environmental conditions. Ethical and biosafety protocols were strictly followed, including institutional biosafety committee (IBC) approval and proper hazardous waste disposal.

Results and Discussion

The findings demonstrate that absorptive packaging significantly reduced both fungal proliferation and mycotoxin accumulation compared to the control. After six months, the nano-enhanced packaging exhibited the highest efficacy, reducing total mycotoxin levels by 62% relative to the control. Specifically, aflatoxin concentrations were 1.8 ± 0.3 µg/kg in nano-packaged rice versus 12.4 ± 1.5 µg/kg in the control ($p < 0.001$). Similarly, fumonisin levels under 90% humidity were limited to 3.5 ± 0.6 µg/kg in nano-packaged samples, compared to 9.8 ± 1.4 µg/kg in controls. Silica gel-based packaging also performed well (aflatoxin: 2.3 ± 0.4 µg/kg), while clay-based packaging showed moderate effectiveness (8.7 ± 1.2 µg/kg), likely due to its lower moisture absorption capacity (~20% vs. 35% for nano-composites). Fungal CFU counts mirrored these trends, with nano-packaging yielding only 1.2×10^3 CFU/g versus 5.8×10^3 CFU/g in

controls. Regression analysis confirmed a strong positive correlation between fungal load and mycotoxin levels ($\beta = 0.76$, $p < 0.001$), underscoring the causal link between microbial growth and toxin production. Notably, humidity emerged as a stronger predictor of contamination than temperature, with Pearson correlation coefficients (r) for fumonisin and humidity reaching 0.89 in control samples but dropping to 0.38 in nano-packaged rice, indicating effective environmental buffering. These results align with recent literature highlighting the dual functionality of nanomaterials moisture control and direct toxin adsorption through high surface area and ionic interactions. However, concerns regarding nanoparticle migration into food and high production costs necessitate further safety and economic evaluations before widespread adoption, especially in resource-limited settings.

Conclusion

This study confirms that advanced absorptive packaging particularly nano-enhanced and silica gel-based systems can significantly enhance the safety and shelf-life of stored rice in humid, tropical climates by suppressing fungal growth and mycotoxin accumulation. The nano-composite packaging demonstrated superior performance, attributed to its high moisture absorption capacity and direct binding affinity for mycotoxins. These findings support the integration of smart packaging into post-harvest management strategies, offering a scalable solution to reduce food loss and mitigate health risks in vulnerable regions. Nevertheless, real-world validation through field trials, cost-benefit analyses, and rigorous toxicological assessments of nanomaterial migration are essential next steps. Future research should also explore hybrid approaches combining absorptive packaging with biological controls (e.g., *Bacillus subtilis*) or green nanocomposites to balance efficacy, affordability, and

sustainability. Ultimately, such innovations align with global sustainable development goals particularly Zero Hunger (SDG 2) and Responsible Consumption (SDG 12) by strengthening food security and safety across the rice value chain.

Keywords: Mycotoxin accumulation, Absorbent packaging, Stored rice, Fungal growth, Humidity control

Funding: There was no external funding in this study.

Authors' contribution: All authors contributed equally to the writing and preparation of this manuscript.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.



مقاله پژوهشی

تأثیر ویژگی‌های بسته‌بندی‌های جاذب بر تجمع مایکوتوکسین در برنج ذخیره شده

احسان کرم رضایی^{۱*}، فاطمه کرم رضایی^۲

^۱گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

^۲آپردیس نصیبیه، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳

چکیده

آلودگی برنج انبارشده به مایکوتوکسین‌ها که در پی رشد قارچ‌های مولد در شرایط نامطلوب نگهداری (به‌ویژه دما و رطوبت بالا) رخ می‌دهد، یک تهدید جدی برای ایمنی غذایی و پایداری اقتصادی در مناطق وابسته به کشت برنج محسوب می‌شود و می‌تواند منجر به افزایش تلفات پس از برداشت تا ۵ تا ۱۵ درصد گردد. در این پژوهش نقش ویژگی‌های بسته‌بندی جاذب در کاهش تجمع مایکوتوکسین‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. ۱۲۰ نمونه برنج دانه‌بلند (*Oryza sativa*)، در چهار نوع بسته‌بندی (مبتنی بر سیلیکاژل، خاک رس، تقویت‌شده با نانوذرات، و شاهد) تحت شرایط کنترل‌شده (دمای ۲۵-۳۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۶۰-۹۰ درصد) به مدت شش ماه ذخیره شدند. سطوح مایکوتوکسین به‌صورت دو هفته یک‌بار با استفاده از کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا اندازه‌گیری شد و میزان رشد قارچ از طریق شمارش واحدهای تشکیل‌دهنده کلنی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تحلیل داده‌ها نیز آزمون آنالیز واریانس دوطرفه و مدل‌سازی رگرسیونی با بهره‌گیری از نرم‌افزار R انجام شد. یافته‌ها نشان دادند که بسته‌بندی‌های تقویت‌شده با نانوذرات و سیلیکاژل توانستند سطوح مایکوتوکسین را تا حدود ۶۲ درصد کاهش دهند؛ به‌طوری‌که میانگین آفلاتوکسین به $1/8 \mu\text{g/kg}$ و فومونیسین به $3/5 \mu\text{g/kg}$ رسید، در حالی که در بسته‌بندی شاهد به‌ترتیب $12/4$ و $9/8 \mu\text{g/kg}$ اندازه‌گیری شد ($p < 0/001$). همچنین، در بسته‌بندی‌های غیرجاذب همبستگی معنادار و قوی میان رطوبت و تجمع مایکوتوکسین مشاهده گردید ($r = 0/91$ ، $p < 0/001$). این یافته‌ها بیانگر آن است که بسته‌بندی‌های جاذب پیشرفته از طریق مهار رشد قارچی، ایمنی غذایی را بهبود می‌بخشند و می‌توانند راهکارهای عملی برای کاهش مخاطرات بهداشتی و زیان‌های اقتصادی فراهم کنند؛ هرچند برای شناسایی گزینه‌های مقرون‌به‌صرفه‌تر، پژوهش‌های تکمیلی همچنان ضروری است.

واژه‌های کلیدی: تجمع مایکوتوکسین، بسته‌بندی جاذب، برنج ذخیره‌شده، رشد قارچی، کنترل رطوبت

استناد: احسان کرم رضایی، فاطمه کرم رضایی. تأثیر ویژگی‌های بسته‌بندی‌های جاذب بر تجمع مایکوتوکسین در برنج

ذخیره‌شده، کیفیت و ماندگاری تولیدات کشاورزی و مواد غذایی، (۱۴۰۴)، دوره ۵، شماره ۱، صفحات ۱-۱۴.

DOI: <https://doi.org/10.71516/qafj.2025.1217908>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، ایران

© نویسندگان



مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) به عنوان منبع اصلی کالری برای بیش از نیمی از جمعیت جهان، نقشی کلیدی در تأمین امنیت غذایی جهانی ایفا می کند. با این حال، آلودگی پس از برداشت این محصول به قارچ های زیست تخریب کننده، به ویژه گونه های تولیدکننده مایکوتوکسین از جنس های *آسپرژیلوس* و *پنی سیلیوم*، یکی از چالش های اساسی در زنجیره تأمین غذایی محسوب می شود. برآوردها حاکی از آن است که سالانه بین ۵ تا ۱۵ درصد از ذخایر برنج در سراسر جهان در اثر رشد قارچی و فساد میکروبی از بین می رود. این پدیده نه تنها منجر به کاهش قابل توجه منابع غذایی می شود، بلکه با تولید مایکوتوکسین های سمی —مانند آفلاتوکسین ها و اوکراتوکسین ها تهدیدی جدی برای سلامت عمومی ایجاد می کند. این ترکیبات، علاوه بر خاصیت سرطان زایی شناخته شده، قادرند سیستم ایمنی را تضعیف کرده و اختلالات عصبی، کبدی و کلیوی را تشدید نمایند (۱). از سوی دیگر، تلفات ناشی از فساد قارچی برنج پیامدهای اقتصادی گسترده ای دارد؛ به طوری که در مناطقی که برنج هم به عنوان محصول استراتژیک و هم به عنوان منبع درآمد اصلی کشاورزان محسوب می شود، این آلودگی می تواند معیشت خانوارهای روستایی و ثبات اقتصادی محلی را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. در این راستا، به کارگیری راهبردهای نوین ذخیره سازی از جمله استفاده از بسته بندی های هوشمند مجهز به جاذب های رطوبت یا فناوری های کنترل شده اتمسفر می تواند با کاهش فعالیت آبی محصول، از رشد قارچ های زیان آور جلوگیری کرده و چرخه تولید مایکوتوکسین را مختل نماید. چنین راهکارهایی نه تنها به کاهش تلفات پس از برداشت کمک می کنند، بلکه گامی مؤثر در جهت تضمین کیفیت، ایمنی و پایداری زنجیره تأمین برنج محسوب می شوند (۱). علاوه بر خطرات بهداشتی، آلودگی برنج به مایکوتوکسین ها زیان های اقتصادی چشمگیری نیز به همراه دارد. در کشورهایی مانند پاکستان که به شدت به برنج وابسته اند، سطوح بالای آفلاتوکسین در برنج قهوه ای (۸۵٪) و برنج سفید (۷۶٪/۷) منجر به کاهش ارزش بازاری محصول و افزایش هزینه های درمانی شده است. مطالعات در سایر مناطق نیز نشان می دهد که غلظت

آفلاتوکسین در برنج با کیفیت دانه و شرایط ذخیره سازی ارتباط مستقیم دارد. در پاسخ به این چالش، راهکارهای نوینی از قبیل: استفاده از عوامل بیولوژیکی برای کنترل زیستی (بیوکنترل) قارچ های تولیدکننده مایکوتوکسین، به کارگیری فناوری های سبز مانند تیمار با مایکروویو یا اشعه فرابنفش برای کاهش سطح سموم و استفاده از بسته بندی های جاذب رطوبت برای کنترل رطوبت محیط و مهار رشد قارچی پیشنهاد شده اند. این روش ها می توانند به طور مؤثری از فساد برنج جلوگیری کرده و ایمنی غذایی را بهبود بخشند (۲). مواد جاذب مورد استفاده در بسته بندی مانند سیلیکاژل، ترکیبات مبتنی بر خاک رس و سیستم های نوین حاوی نانوذرات با کنترل رطوبت و جذب ترکیبات فرار یا مضر، از رشد کپک های زیان آور جلوگیری می کنند. این راهکارها به ویژه در اقلیم های گرم و مرطوب حائز اهمیت اند، جایی که روش های سنتی ذخیره سازی ممکن است شرایط را برای رشد قارچ و تولید مایکوتوکسین مساعدتر کنند. به عنوان مثال، استفاده از کیسه های نفوذپذیر به هوا و رطوبت در سیستم های ذخیره سازی آفریقای زیر صحرای شش ماه منجر به افزایش قابل توجه سطوح فومونیسین و زئارالتون شده است. این یافته ها اهمیت به کارگیری بسته بندی های هوشمند و کنترل شده را در زنجیره پس از برداشت برجسته می سازد (۳). از سوی دیگر، بسته بندی های پیشرفته مانند کیسه های مهر و موم شده با کاهش غلظت اکسیژن درون بسته، از رشد کپک های هوازی جلوگیری می کنند. آزمایش ها نشان داده اند که این روش می تواند سطوح آفلاتوکسین را به طور چشمگیری کاهش دهد (۴). مطالعات اخیر نشان داده اند که کنترل زیستی با استفاده از باکتری هایی مانند *باسیلوس سوبتیلیس*، می تواند سطح آفلاتوکسین B₁ را تا ۲۶ درصد و اوکراتوکسین A را تا ۲۵ درصد در برنج ذخیره شده حتی تحت شرایط متغیر دما و رطوبت، کاهش دهد. ترکیب این روش با بسته بندی های جاذب رطوبت می تواند اثربخشی آن را به طور هم افزایی افزایش دهد (۵). پژوهش های اخیر پتانسیل بالای نانوذرات را در حذف مؤثر مایکوتوکسین ها نشان داده اند. این کارایی عمدتاً ناشی از سطح ویژه بسیار زیاد آن هاست. با این حال، کاربرد گسترده این فناوری به ویژه در مناطق با منابع محدود با چالش هایی از جمله هزینه های بالای تولید و مسائل مربوط به مقیاس پذیری

روش‌های ذخیره‌سازی پایدار و مقرون‌به‌صرفه به‌ویژه برای کشاورزان کوچک‌مقیاس در مناطق توسعه‌نیافته طراحی شده است. این جوامع اغلب با تلفات گسترده ناشی از آلودگی کپکی و مایکوتوکسین‌ها مواجه‌اند. تلفیق فناوری‌های نوین مانند پلاسمای سرد اتمسفری و اوزون در بسته‌بندی‌های پیشرفته، افق‌های جدیدی برای کنترل مؤثر این آلودگی‌ها گشوده است. به‌عنوان مثال، درمان با پلاسمای سرد می‌تواند غلظت اوکراتوکسین A در برنج را تا ۵۳ درصد در تنها ۱۵ دقیقه کاهش دهد. همچنین، استفاده از اوزون گازی در ذرت تا ۸۰ درصد کاهش مایکوتوکسین بدون تأثیر منفی بر طعم، بو، بافت یا ارزش غذایی محصول ایجاد کرده است. این فناوری‌ها با تولید گونه‌های فعال اکسیژن، ساختار مولکولی مایکوتوکسین‌ها را تخریب کرده و رشد قارچ‌ها را سرکوب می‌کنند. بنابراین، می‌توانند به‌عنوان مکملی کارآمد برای بسته‌بندی‌های متداول در اقلیم‌های گرمسیری به‌کار روند (۹). بسته‌بندی‌های جاذب ارتقا یافته، با بهبود استحکام و قابلیت اطمینان در شرایط ذخیره‌سازی، می‌توانند نقش کلیدی در کاهش هدررفت مواد غذایی و تقویت ایمنی زنجیره تأمین ایفا کنند (۱۰). این پژوهش با هدف بررسی تأثیر انواع بسته‌بندی بر تجمع مایکوتوکسین‌ها در برنج ذخیره‌شده تحت شرایط محیطی متنوع انجام شده تا راهکارهایی کارآمد برای بهبود کیفیت ذخیره‌سازی و کاهش خطرات بهداشتی ارائه دهد. یافته‌های آن، با ارائه شواهد تجربی در زمینه طراحی بسته‌بندی هوشمند، بر اهمیت این فناوری‌ها تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که چنین سیستم‌هایی هم برای کشاورزان کوچک‌مقیاس و هم برای سامانه‌های ذخیره‌سازی صنعتی قابل اجرا و مؤثر هستند.

روش کار

این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقات بیوشیمی و فناوری غذایی شرکت پردیس و تحت شرایط محیطی کنترل‌شده (دمای ۲۵-۳۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۰-۹۰ درصد) انجام شد. ۱۲۰ نمونه برنج دانه‌بلند (*Oryza sativa*) از تأمین‌کنندگان تجاری جنوب شرقی آسیا تهیه شدند تا نمایانگر شرایط واقعی پس از برداشت در مناطق گرم و مرطوب باشند. نمونه‌ها به چهار گروه ۳۰ تایی تقسیم و در بسته‌بندی‌های مختلف جاذب

مواجه است. مطالعات پیشین همچنین تأکید کرده‌اند که برنج ذخیره‌شده در شرایط گرم و مرطوب به‌طور خاص در معرض آلودگی با مایکوتوکسین‌هایی مانند آفلاتوکسین، فومونیسین، اوکراتوکسین و زئارالنون قرار دارد (۶). این یافته‌ها بر ضرورت توسعه سیستم‌های بسته‌بندی پیشرفته تأکید دارند که بتوانند همزمان رطوبت را مدیریت کرده و مایکوتوکسین‌ها را جذب نمایند. چنین سیستم‌هایی با کاهش مؤثر این آلاینده‌ها، هم کیفیت برنج را حفظ می‌کنند و هم خطرات بهداشتی را کاهش می‌دهند. این پژوهش به‌طور ویژه بر دو مایکوتوکسین آفلاتوکسین و فومونیسین متمرکز است، زیرا این ترکیبات شایع‌ترین آلاینده‌های برنج در اقلیم‌های گرمسیری هستند و بیشترین تهدید را برای سلامت انسان دارند. توسعه چنین فناوری‌هایی نه تنها ایمنی محصولات ذخیره‌شده را ارتقا می‌دهد، بلکه با کاهش تلفات پس از برداشت، از منافع اقتصادی کشاورزان و سایر ذینفعان در زنجیره تأمین برنج نیز محافظت می‌کند (۷). مطالعه حاضر عملکرد انواع بسته‌بندی‌های جاذب رطوبت را در کاهش سطوح مایکوتوکسین‌ها در برنج ذخیره‌شده بررسی می‌کند. این دسته شامل سیلیکاژل، خاک‌های رس فعال‌شده (مانند مونتوریلونیت) و بسته‌بندی‌های پیشرفته مبتنی بر نانوذرات می‌شود. پژوهشگران با شبیه‌سازی شرایط ذخیره‌سازی گرمسیری دمای ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۰ تا ۹۰ درصد نشان داده‌اند که این مواد می‌توانند رشد قارچ‌های توکسین‌زا مانند *آسپرژیلوس* و *پنی‌سلیم* را سرکوب کرده و از تولید آفلاتوکسین و اوکراتوکسین A جلوگیری نمایند. به‌عنوان مثال، نانوذرات سیلیکا و خاک‌های رس با جذب رطوبت و ایجاد اختلال در ساختار سلولی قارچ‌ها، زیست‌دسترسی^۱

مایکوتوکسین‌ها را کاهش می‌دهند. این اثر در مطالعات اخیر روی غلات ذخیره‌شده از جمله برنج و گندم، تأیید شده است. همچنین، بسته‌بندی‌های نانوکامپوزیتی مبتنی بر گرافن اکسید مغناطیسی توانسته‌اند تا ۷۰ درصد از مایکوتوکسین‌های تولیدشده توسط گونه‌های *فوزاریوم* را در محصولات ذخیره‌شده حذف کنند. چنین ویژگی‌هایی به شناسایی بهینه‌ترین ترکیبات برای حفظ کیفیت و ایمنی برنج کمک می‌کند (۸). این پژوهش با هدف توسعه

¹ Bioavailability

ASTM D570 تعیین گردید. بسته‌بندی مبتنی بر خاک‌رس، از خاک‌رس بنتونیت فعال‌شده (شامل مونتموریلونیت با اندازه ذرات ۱ تا ۳ میلی‌متر) تهیه شد و در شرایط مشابه، ظرفیت جذب رطوبتی آن ۲۰ درصد از وزن خشک گزارش شد. بسته‌بندی تقویت‌شده با نانوذرات، ترکیبی از نانوذرات سیلیکا (با میانگین اندازه ذرات ۱۰ نانومتر و سطح ویژه ۶۰۰ مترمربع بر گرم) و یک جاذب مبتنی بر زئولیت بود. این ترکیب، ظرفیت جذب رطوبتی ۳۵ درصد را نشان داد و همچنین میل ترکیبی قابل توجهی نسبت به مایکوتوکسین‌ها از خود بروز داد؛ به‌طوری‌که کارایی جذب آن برای آفلاتوکسین‌ها ۸۵ درصد و برای فومونیسین‌ها ۷۸ درصد بود. این مقادیر از طریق ایزوترم‌های جذب و مطابق با پروتکل‌های استاندارد IUPAC⁴ اعتبارسنجی شدند. در نهایت، بسته‌بندی شاهد شامل کیسه‌های بافته‌شده پلی‌پروپیلن استاندارد با تخلخل ۰/۱ میلی‌متر بود که جذب رطوبت ناچیزی (کمتر از ۱ درصد) از خود نشان داد. انتخاب این مواد بر اساس نمایندگی‌شان از طیف گسترده‌ای از جاذب‌های تجاری پایدار صورت گرفت و همزمان، سازگاری آن‌ها با شرایط ذخیره‌سازی برنج در محیط‌های مرطوب مورد تأیید قرار گرفت (۱۵).

طرح آزمایش و ملاحظات مربوط به تعمیم‌پذیری یافته‌ها

این مطالعه به‌صورت آزمایشی در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی طراحی و اجرا گردید تا دقت و قابلیت تکرارپذیری در اندازه‌گیری تجمع مایکوتوکسین‌ها و رشد قارچی تضمین شود. با این حال، با توجه به ماهیت کنترل‌شده محیط آزمایشگاهی، تعمیم‌پذیری یافته‌ها به شرایط واقعی ذخیره‌سازیمانند انبارهای روستایی یا صنعتی ممکن است با محدودیت‌هایی همراه باشد. بنابراین، طراحی پژوهش حاضر به‌صورت آگاهانه بر ضرورت انجام مطالعات میدانی آینده تأکید دارد. شرایط آزمایشگاهی به‌کار رفته (دمای ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۰ تا ۹۰ درصد) به‌گونه‌ای انتخاب شد که طیفی از

(سیلیکاژل، خاک رس، تقویت‌شده با نانوذرات) و شاهد غیرجاذب قرار گرفتند. پیش از آزمایش، دانه‌ها با تمیزکاری و خشک‌سازی استاندارد به رطوبت ۱۲ درصد رسیدند و نمونه‌های دارای آلودگی قارچی، باقی‌مانده آفت‌کش، آسیب فیزیکی یا رطوبت غیرمعمول حذف شدند (۱۱). جمع‌آوری داده‌ها طی شش ماه و هر دو هفته یکبار انجام شد؛ سطح مایکوتوکسین‌ها با کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC¹) مدل (Agilent 1260 Infinity II) و رشد قارچ‌ها با شمارش واحدهای تشکیل‌دهنده کلنی (CFU²) اندازه‌گیری شد. داده‌ها با آزمون آنالیز واریانس دوطرفه و مدل‌سازی رگرسیون در نرم‌افزار R تحلیل گردید تا اثر نوع بسته‌بندی و شرایط محیطی بررسی شود. طراحی مطالعه بر اساس اصول نظریه جذب و زیست‌شناسی پس از برداشت و با تلفیق مهندسی مواد بسته‌بندی، رویکردی یکپارچه برای مدیریت چالش‌های زیستی در ذخیره‌سازی مواد غذایی ارائه داد (۱۲، ۱۳). تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار R (نسخه ۴.۳.۲) و بسته‌های تخصصی آن برای انجام آنالیز واریانس (ANOVA) و رگرسیون انجام شد. ملاحظات اخلاقی نیز مورد توجه قرار گرفت که شامل رعایت دقیق پروتکل‌های ایمنی آزمایشگاهی و مقررات مربوط به دفع پسماندها بود. همچنین، تأییدیه لازم از کمیته ایمنی زیستی مؤسسه (IBC³) اخذ گردید تا اطمینان حاصل شود که کشت‌های قارچی و معرف‌های شیمیایی به‌صورت ایمن و مطابق با استانداردهای جاری مدیریت می‌شوند. این رویه‌های روش‌شناختی و اخلاقی، یافته‌هایی قوی، قابل تکرار و همسو با اصول اخلاقی تحقیق را تضمین می‌کنند (۱۴).

ویژگی‌ها و تهیه مواد بسته‌بندی جاذب

در این پژوهش، بسته‌بندی مبتنی بر سیلیکاژل شامل سیلیکاژل با خلوص بالا (SiO₂) و اندازه ذرات ۲ تا ۵ میلی‌متر بود که در یک ماتریس پلی‌اتیلنی نفوذپذیر جاسازی شده بود. ظرفیت جذب رطوبت این ماده برابر با ۳۰ درصد از وزن خشک آن در رطوبت نسبی ۹۰ درصد (RH) اندازه‌گیری شد که مطابق با استاندارد

⁴ International Union of Pure and Applied Chemistry

¹ High-performance liquid chromatography

² Colony forming unit

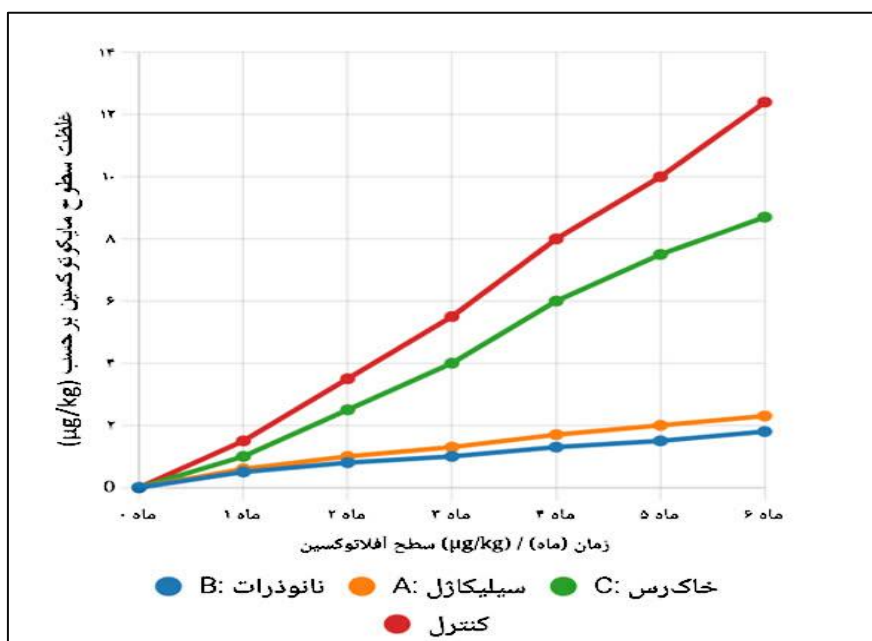
³ International Building Code

شرایط محیطی شایع در مناطق گرمسیری را شبیه‌سازی کند.

نتایج

تأثیر ویژگی‌های بسته‌بندی جاذب بر حضور مایکوتوکسین‌ها در برنج ذخیره‌شده طی یک دوره شش‌ماهه تحت شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی (دمای ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۶۰ تا ۹۰ درصد) بررسی شد. شکل (۱)، همبستگی بین رشد قارچ و سطح مایکوتوکسین در برنج ذخیره‌شده بر اساس نوع بسته‌بندی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که مواد بسته‌بندی جاذب به‌طور قابل‌توجهی بر سطوح مایکوتوکسین‌ها تأثیر می‌گذارند، به‌طوری‌که کیسه‌های

مبتنی بر سیلیکاژل و تقویت‌شده با نانوذرات به‌طور مداوم غلظت آفلاتوکسین و فومونیسین را در مقایسه با بسته‌بندی‌های مبتنی بر خاک رس و گروه کنترل (غیرجاذب) کاهش دادند. تحلیل واریانس دوطرفه نشان‌دهنده تعامل معنی‌دار بین نوع بسته‌بندی و شرایط محیطی بود ($F(6/108) = (12/45, p < 0.01)$) به‌طوری‌که رطوبت تأثیر قوی‌تری نسبت به دما داشت. به‌طور کلی، بسته‌بندی تقویت‌شده با نانوذرات بالاترین کارایی را در کاهش تجمع مایکوتوکسین‌ها نشان داد و سطوح کل مایکوتوکسین‌ها را در مقایسه با گروه کنترل به میزان ۶۲ درصد کاهش داد. این یافته‌ها، پتانسیل بسته‌بندی جاذب طراحی‌شده را برای افزایش ایمنی ذخیره‌سازی برنج برجسته می‌کنند.



شکل ۱- همبستگی بین رشد قارچ و سطح مایکوتوکسین در برنج ذخیره‌شده بر اساس نوع بسته‌بندی

مبتنی بر خاک رس و گروه کنترل از خود نشان دادند. پس از شش ماه، میانگین سطوح آفلاتوکسین در برنج ذخیره‌شده در کیسه‌های مبتنی بر سیلیکاژل $2/3 \mu\text{g/kg}$ (انحراف معیار $0/4$) و در کیسه‌های تقویت‌شده با نانوذرات $1/8 \mu\text{g/kg}$ (انحراف معیار $0/3$) بود، در حالی که این مقدار در بسته‌بندی‌های مبتنی بر خاک رس $8/7 \mu\text{g/kg}$ (انحراف معیار $1/2$) و در بسته‌بندی‌های کنترل

تأثیر انواع بسته‌بندی جاذب بر تجمع آفلاتوکسین

بررسی تأثیر انواع بسته‌بندی‌های جاذب بر تجمع آفلاتوکسین، نشان داد که کیسه‌های مبتنی بر سیلیکاژل و بسته‌بندی‌های تقویت‌شده با نانوذرات عملکرد بهتری در کاهش سطوح آفلاتوکسین نسبت به بسته‌بندی‌های

بسته‌بندی‌های حاوی مواد جاذب به‌ویژه سیلیکاژل و نانوذرات سطوح پایین و نسبتاً ثابتی از آفلاتوکسین را در طول زمان حفظ کردند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که ظرفیت بالای جذب رطوبت و توانایی اتصال شیمیایی با میکوتوکسین‌ها در این مواد، به‌طور مؤثری فعالیت قارچ‌های مولد آفلاتوکسین را مهار کرده و از تولید و تجمع سموم جلوگیری می‌کند (جدول ۱).

۱۲/۴ $\mu\text{g/kg}$ (انحراف معیار ۱/۵) ($p < 0.001$)، آزمون‌های پسین توکی $F(3/36) = (15/67)$ است. تفاوت‌های معنی‌داری را بین گروه تقویت‌شده با نانوذرات و گروه کنترل تأیید کرد ($p < 0.001$). شکل (۱)، روند زمانی تجمع آفلاتوکسین را در طول دوره ذخیره‌سازی نشان می‌دهد؛ که بر اساس آن، در بسته‌بندی‌های شاهد (کنترل) و مبتنی بر خاک رس، پس از سه ماه، افزایش قابل توجهی در سطح سموم مشاهده می‌شود. در مقابل،

جدول ۱- تأثیر انواع بسته‌بندی جاذب بر سطوح میکوتوکسین و رشد قارچی در برنج ذخیره‌شده

نوع بسته‌بندی	آفلاتوکسین ($\mu\text{g/kg}$)	فومونیسین ($\mu\text{g/kg}$)	واحدهای تشکیل‌دهنده کلنی ($\times 10^3$ بر گرم)
نانوذره‌ای پیشرفته	0.3 ± 1.8	3.5 ± 0.6	0.2 ± 1.2
مبتنی بر سیلیکاژل	0.4 ± 2.3	$4.2^* \pm 0.7$	0.3 ± 2.1
مبتنی بر خاک رس	1.2 ± 8.7	$7.5^* \pm 1.1$	0.5 ± 3.9
کنترل (غیر جاذب)	1.5 ± 12.4	9.8 ± 1.4	0.9 ± 0.8

*: نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار نسبت به گروه کنترل ($p < 0.05$)

سطوح فومونیسین را در بسته‌بندی‌های کنترل ($r = 0.89$ ، $p < 0.001$) و مبتنی بر خاک رس ($r = 0.82$ ، $p < 0.001$) نشان داد، اما این همبستگی در کیسه‌های مبتنی بر سیلیکاژل ($r = 0.45$ ، $p = 0.03$) و تقویت‌شده با نانوذرات ($r = 0.38$ ، $p = 0.04$) ضعیف‌تر بود. با توجه به نتایج جدول (۲)، بسته‌بندی جاذب با کاهش رطوبت در دسترس، به‌ویژه در شرایط رطوبت بالا، تولید فومونیسین را کاهش می‌دهد. این یافته نشان‌دهنده اهمیت انتخاب مواد بسته‌بندی در محیط‌های ذخیره‌سازی مرطوب، به‌ویژه در مناطق گرمسیری، است.

تأثیر بسته‌بندی بر تجمع فومونیسین

بررسی تأثیر بسته‌بندی بر تجمع فومونیسین تحت سطوح مختلف رطوبت (۶۰٪، ۷۵٪، ۹۰٪ رطوبت نسبی) نشان داد که در رطوبت نسبی ۹۰٪، سطوح فومونیسین در همه انواع بسته‌بندی به‌طور قابل توجهی بالاتر بود، اما کیسه‌های تقویت‌شده با نانوذرات تجمع فومونیسین را به $3.5 \mu\text{g/kg}$ (انحراف معیار = ۰/۶) محدود کردند، در مقایسه با $9.8 \mu\text{g/kg}$ (انحراف معیار = ۱/۴) در کیسه‌های کنترل ($F(3/36) = (15/67)$ ، $p < 0.001$). تحلیل رگرسیون همبستگی مثبت قوی بین رطوبت و

جدول ۲- سطوح فومونیسین در انواع بسته‌بندی تحت سطوح مختلف رطوبت نسبی

نوع بسته‌بندی	فومونیسین در ۹۰٪ رطوبت نسبی (μg/kg)	فومونیسین در ۷۵٪ رطوبت نسبی (μg/kg)	فومونیسین در ۹۰٪ رطوبت نسبی (μg/kg)	همبستگی با رطوبت (r)
نانوذره‌ای پیشرفته	$3/1 \pm 0/5^*$	$3/1 \pm 0/5^*$	$3/5 \pm 0/6$	$0/38 (p < 0/04)$
مبتنی بر سیلیکاژل	$3/9 \pm 0/5^*$	$3/9 \pm 0/5^*$	$4/2 \pm 0/7$	$0/45 (p < 0/03)$
مبتنی بر خاک رس	$6/5 \pm 1/0^*$	$6/5 \pm 1/0^*$	$7/5 \pm 1/1$	$0/82 (p < 0/01)$
کنترل (غیرجاذب)	$1/3^* \pm 8/5$	$8/5 \pm 1/3^*$	$9/8 \pm 1/4$	$0/89 (p < 0/01)$

*: نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار نسبت به گروه کنترل ($p < 0/05$)

ارزیابی دینامیک‌های رشد قارچی

نتایج بررسی دینامیک‌های رشد قارچی، که از طریق شمارش واحدهای تشکیل‌دهنده کلنی (CFU) نشان داد که بسته‌بندی تقویت‌شده با نانوذرات به‌طور قابل‌توجهی شمارش CFU قارچی را به $1/2 \times 10^3$ CFU/g (انحراف معیار: $0/2$) کاهش داد. در مقایسه با (انحراف معیار $0/9$) $5/8 \times 10^3$ CFU/g در کیسه‌های کنترل پس از شش ماه ($p < 0/001$)، $F(3/36) = (22/14)$ ، کاهش‌یافته‌ای را نشان دادند ($2/1 \times 10^3$ CFU/g) (انحراف معیار $0/3$)، در حالی که کیسه‌های مبتنی بر خاک رس سرکوب متوسطی را از خود نشان دادند ($3/9 \times 10^3$ CFU/g) (انحراف معیار $0/5$)، مدل رگرسیون چندگانه تأیید کرد که شمارش CFU به‌طور قابل‌توجهی سطوح مایکوتوکسین را پیش‌بینی می‌کند ($p < 0/001$)، $\beta = 0/76$) و نوع بسته‌بندی این رابطه را تعدیل می‌کند ($R^2 = 0/68$). همبستگی مثبت بین رشد قارچی و تجمع مایکوتوکسین در انواع مختلف بسته‌بندی در شکل (۲) نمایش داده شده است. این یافته‌ها نقش مؤثر مواد جاذب به‌ویژه ترکیبات نانو ساختار در اختلال در تکثیر قارچی و در نتیجه کاهش تولید سموم ثانویه را برجسته می‌سازد.

بحث

در دهه‌های اخیر، آلودگی غلات به‌ویژه برنج به مایکوتوکسین‌ها به‌عنوان یکی از چالش‌های جدی ایمنی غذایی در سطح جهانی شناخته شده است. این ترکیبات

سمی، که عمدتاً توسط قارچ‌های جنس *آسپرژیلوس* و *فوزاریوم* در شرایط نامناسب ذخیره‌سازی تولید می‌شوند، نه تنها سلامت انسان و دام را تهدید می‌کنند، بلکه خسارات اقتصادی گسترده‌ای را در زنجیره تأمین غذا، به‌ویژه در مناطق گرمسیری و کم‌درآمد، به دنبال دارند. با توجه به پیش‌بینی‌های مربوط به تشدید این خطر در پی تغییرات آب‌وهوایی و افزایش رطوبت محیطی، توسعه راهکارهای مؤثر، مقرون به‌صرفه و پایدار برای کنترل مایکوتوکسین‌ها ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. این مطالعه با بررسی کارایی بسته‌بندی‌های جاذب پیشرفته به‌ویژه مبتنی بر نانوذرات و سیلیکاژل گامی کلیدی در جهت ارتقای ایمنی غذایی و کاهش تلفات پس از برداشت در محیط‌های پررطوبت برداشته است (۱۶). یافته‌های این مطالعه نشان‌دهنده کاهش قابل‌توجه سطوح مایکوتوکسین‌ها از طریق بسته‌بندی‌های جاذب پیشرفته، به‌ویژه با نانوذرات و سیلیکاژل، با کاهش ۶۲ درصدی آفلاتوکسین و فومونیسین در برنج ذخیره‌شده است. این نتایج با بررسی‌های اخیر همخوانی دارد که بر کارایی نانومواد در جذب مایکوتوکسین‌ها تأکید کرده‌اند، مانند استفاده از نانوذرات برای کاهش دسترسی زیستی سموم از طریق تشکیل کمپلکس‌های پایدار با مایکوتوکسین‌ها، که می‌تواند تا ۱۰۰۰ میکروگرم بر میلی‌گرم نانوماده جذب کند. علاوه بر این، همبستگی قوی بین رطوبت و تجمع مایکوتوکسین ($r = 0/89, p < 0/01$) اهمیت کنترل محیطی را در اقلیم‌های گرمسیری برجسته می‌کند، که با گزارش‌های جهانی در مورد تأثیر تغییرات آب و هوایی بر تولید مایکوتوکسین هم‌راستا است (۱۷). مطالعات اخیر

مناطق برنج‌کار آسیب‌پذیر مانند جنوب شرق آسیا و آفریقای زیر صحرای به‌طور چشمگیری کاهش دهد؛ جایی که آلودگی به مایکوتوکسین‌ها سالانه بین ۵ تا ۱۵ درصد از محصولات ذخیره‌شده را از بین می‌برد. در این راستا، بکارگیری بسته‌بندی‌های جاذب پیشرفته می‌تواند به‌عنوان یک مؤلفه کلیدی در استراتژی‌های پایدار مدیریت زنجیره تأمین غذا مورد استفاده قرار گیرد و هم‌راستا با اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد، به‌ویژه هدف ۲ (صفر گرسنگی) و هدف ۱۲ (مصرف و تولید مسئولانه)، گامی مؤثر در جهت امنیت غذایی جهانی باشد (۲۰). یافته‌های این پژوهش بر ظرفیت بالقوه‌ی بسته‌بندی‌های جاذب در ارتقای امنیت غذایی در مناطق وابسته به برنج تأکید می‌کند، به‌ویژه در اقلیم‌های گرمسیری که رطوبت بالا خطر آلودگی به مایکوتوکسین را تشدید کرده و سالانه حدود ۵ تا ۱۵ درصد از تلفات جهانی غلات را رقم می‌زند. به‌کارگیری بسته‌بندی‌های تقویت‌شده با نانوذرات یا مبتنی بر سیلیکا ژل می‌تواند به‌طور چشمگیری زیان‌های پس از برداشت و مخاطرات سلامت ناشی از مایکوتوکسین‌ها از جمله سرطان‌زایی را کاهش دهد و کاربردهای عملی برای کشاورزان خردمالک و نیز مراکز ذخیره‌سازی تجاری فراهم آورد. با این حال، هزینه بالای مواد مبتنی بر نانوذرات مانعی در مسیر پذیرش گسترده آن‌ها به شمار می‌رود و لزوم انجام پژوهش‌های آینده در زمینه‌ی جایگزین‌های مقرون‌به‌صرفه‌تر و آزمایش‌های میدانی برای اعتبارسنجی کارایی آن‌ها در شرایط واقعی را برجسته می‌سازد. همچنین، مطالعات بعدی باید ادغام بسته‌بندی‌های جاذب با سایر شیوه‌های پس از برداشت، نظیر بهینه‌سازی روش‌های خشک‌کردن را بررسی نمایند تا راهبردهای جامع و پایداری برای ذخیره‌سازی برنج و ارتقای پیامدهای بهداشتی عمومی توسعه یابد. با وجود کارایی بالای بسته‌بندی‌های تقویت‌شده با نانوذرات در کاهش مایکوتوکسین‌ها، باید ریسک‌های ایمنی مرتبط با مهاجرت نانوذرات به غذا برای مصرف‌کنندگان در نظر گرفته شود. مطالعات نشان می‌دهند که نانوذرات سیلیکا یا زئولیت ممکن است در سطوح پایین به غذا مهاجرت کنند و منجر به سمیت سلولی یا التهاب شوند، هرچند شواهد انسانی گسترده‌ای برای آسیب جدی وجود ندارد بنابراین، ارزیابی‌های ایمنی بیشتر، مانند آزمون‌های مهاجرت مطابق با استانداردهای EFSA، ضروری است تا

نشان می‌دهند که نانوذرات مانند اکسید گرافن مغناطیسی یا نانوسیلیکا می‌توانند با افزایش سطح ویژه و ظرفیت جذب، رشد قارچ‌های مولد مایکوتوکسین مانند *آسپرژیلوس* و *فوزاریوم* را مهار کنند، که این امر در شرایط ذخیره‌سازی گرمسیری تا ۹۰-۷۰ درصد کاهش آلودگی را به همراه دارد. همچنین، ادغام نانوذرات با پلیمرها در بسته‌بندی می‌تواند مکانیسم‌های دوگانه‌ای مانند جذب رطوبت و اختلال در غشای سلولی قارچ‌ها را فعال کند، که این رویکرد در کاهش اوکراتوکسین A و آفلاتوکسین B1 در غلات ذخیره‌شده مؤثر گزارش شده است (۱۸). مکانیسم اصلی کاهش مایکوتوکسین شامل جذب رطوبت و اتصال مستقیم به سموم قارچی است، که رشد *آسپرژیلوس* و *فوزاریوم* را مهار می‌کند و تولید سم را کاهش می‌دهد (۶). از منظر زیستی-مکانیزی، بسته‌بندی‌های مبتنی بر خاک رس اثر ضعیف‌تری نشان دادند زیرا ظرفیت جذب رطوبت آن‌ها (حدود ۲۰-۲۵٪ وزن خشک، بر اساس استانداردهای ASTM) کمتر از سیلیکاژل (۳۰-۴۰ درصد) و نانوذرات (تا ۳۵ درصد با سطح ویژه 600 g/m^2) است، که منجر به کنترل ناکافی رطوبت در محیط‌های مرطوب می‌شود (۱۵). علاوه بر این، ساختار لایه‌ای خاک رس (مانند مونتموریلونیت) می‌تواند در شرایط اشباع، رطوبت را بازجذب کند و محیط مناسبی برای تکثیر قارچ‌هایی مانند *آسپرژیلوس* فراهم آورد، زیرا آب آزاد بیشتری برای متابولیسم قارچی در دسترس قرار می‌گیرد (۱۹). در مقابل، نانوذرات با سطح ویژه بالا قادرند از طریق برهمکنش‌های ایونی قوی‌تر، مایکوتوکسین‌ها را به‌طور مؤثرتری جذب کنند و هم‌زمان با کاهش آب فعال (a_w) به سطحی پایین‌تر از آستانه بحرانی ۰٫۷، رشد قارچ‌های مولد سم را سرکوب نمایند. این مکانیسم زیستی که مستقیماً بر مسیرهای بیوسنتز مایکوتوکسین تأثیر می‌گذارد منجر به کاهش چشمگیر تولید سموم می‌شود. چنین تفاوت‌های عملکردی، ضرورت بهینه‌سازی مواد جاذب را بر اساس ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی کلیدی مانند اندازه ذرات، تخلخل و ساختار سطحی برجسته می‌سازد. این رویکرد فناورانه نه تنها ایمنی غذایی را در سطح جهانی ارتقا می‌دهد، بلکه می‌تواند خسارات اقتصادی ناشی از آلودگی پس از برداشت را به‌ویژه در

¹ Water activity

قرار دارند، محدود سازد. بنابراین، انجام مطالعات میدانی در مقیاس وسیع و در شرایط عملیاتی متنوع (از سطح خانوار تا تأسیسات صنعتی) ضروری است تا کارایی، پایداری و مقرون به صرفه بودن این فناوری‌ها در دنیای واقعی ارزیابی شود. علاوه بر این، تحقیقات آینده باید به سوی تلفیق این سیستم‌های جاذب با راهبردهای نوین کنترل مایکوتوکسین از جمله روش‌های بیولوژیکی (مانند استفاده از میکروارگانیسم‌های رقابتی یا جاذب‌های زیستی) و نانوکامپوزیت‌های سبز مبتنی بر مواد طبیعی و زیست تخریب پذیر گسترش یابد. چنین رویکردهای ترکیبی نه تنها می‌تواند اثربخشی را افزایش دهند، بلکه همسویی بیشتری با اصول تولید پایدار و ایمنی محیطی دارند. در نهایت، یافته‌های حاصل از این پژوهش‌ها می‌توانند به عنوان پایه‌ای علمی برای تدوین دستورالعمل‌ها و سیاست‌های جهانی در جهت کاهش مخاطرات مایکوتوکسین و تقویت امنیت غذایی در مناطق آسیب پذیر مورد استفاده قرار گیرند.

نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی تأثیر ویژگی‌های ساختاری و عملکردی بسته‌بندی‌های جاذب بر حضور مایکوتوکسین‌ها در برنج ذخیره شده پرداخت و به پرسش اصلی تحقیق یعنی چگونگی تأثیر خصوصیات فیزیکوشیمیایی بسته‌بندی بر سطوح آفلاتوکسین و فومونیسین تحت شرایط محیطی متفاوت پاسخ روشنی ارائه داد. یافته‌ها نشان داد که بسته‌بندی‌های تقویت شده با نانوذرات و سیستم‌های مبتنی بر سیلیکاژل توانستند به طور مؤثری غلظت مایکوتوکسین‌ها را در مقایسه با بسته‌بندی شاهد کاهش دهند، به طوری که مواد حاوی نانوذرات کمترین سطوح سموم را ثبت کردند. این عملکرد برتر عمدتاً ناشی از توانایی بالاتر این مواد در کنترل رطوبت محیط و جذب مستقیم مایکوتوکسین‌ها از طریق برهمکنش‌های سطحی قوی بود. همچنین، تحلیل‌های آماری وجود یک اثر متقابل معنی دار بین نوع بسته‌بندی و شرایط رطوبتی را تأیید کرد و کاهش چشمگیر شمار واحدهای تشکیل دهنده کلنی قارچی در نمونه‌های تحت بسته‌بندی جاذب، ارتباط مستقیم بین سرکوب رشد قارچی و کاهش تجمع سموم را برجسته ساخت. در مجموع، این یافته‌ها

اطمینان حاصل شود که این مواد برای مصرف انسانی ایمن هستند. پژوهش‌های آینده باید بر توسعه نانوذرات با پوشش‌های ایمن تر تمرکز کنند تا ریسک‌های احتمالی مانند آلرژی یا انباشت در بدن کاهش یابد (۲۱). اگرچه محیط کنترل شده آزمایشگاهی امکان مدیریت دقیق متغیرهای محیطی را فراهم آورد، اما ممکن است بازتاب دهنده‌ی تمامی پیچیدگی‌های شرایط واقعی ذخیره سازی - نظیر نوسانات دمایی، ناهمگنی کیفیت دانه یا شیوه‌های جابه جایی در انبارهای روستایی و صنعتی نباشد. به منظور ارتقای قابلیت تعمیم این یافته‌ها، پژوهش‌های آینده باید بر اجرای آزمایش‌های میدانی در مناطق وابسته به برنج، همچون آسیای جنوب شرقی یا نواحی جنوب صحرای آفریقا، که زیان‌های پس از برداشت در آن‌ها چشمگیر است، تمرکز نمایند. این آزمایش‌ها می‌تواند شامل به کارگیری بسته‌بندی‌های مبتنی بر سیلیکاژل و تقویت شده با نانوذرات در نظام‌های ذخیره سازی خرده مالکان و تجاری، و پایش سطوح مایکوتوکسین و رشد قارچ در بازه‌های زمانی طولانی تر (۶ تا ۱۲ ماه) در شرایط طبیعی، از جمله تغییرات فصلی رطوبت و شیوه‌های محلی نگهداری، باشد. چنین مطالعاتی اثربخشی بسته‌بندی‌های جاذب را در بافت‌های متنوع تأیید کرده و دیدگاه‌های مهمی درباره چالش‌های اجرایی، مانند مقیاس پذیری و مقرون به صرفه بودن، فراهم می‌آورد. افزون بر این، ارائه‌ی مشخصات دقیق مواد بسته‌بندی (برای مثال: نانوذرات سیلیکاژل با سطح ویژه ۶۰۰ متر مربع بر گرم و ظرفیت جذب رطوبت ۳۵ درصد موجب ارتقای بازتولید پذیری پژوهش شده و نگرانی‌های احتمالی پیرامون ترکیب مواد را برطرف می‌سازد. با این حال، هزینه بالای مواد تقویت شده با نانوذرات همچنان مانعی برای پذیرش آن‌ها در محیط‌های کم‌منبع محسوب می‌شود و نیازمند بررسی بیشتر جایگزین‌های مقرون به صرفه تر، همچون جاذب‌های مبتنی بر خاک رس بومی یا مواد ترکیبی، به منظور ایجاد توازن میان کارایی و اقتصادی بودن است. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در توسعه بسته‌بندی‌های جاذب پیشرفته، ماهیت کنترل شده شرایط آزمایشگاهی ممکن است تعمیم پذیری یافته‌ها را به محیط‌های واقعی ذخیره سازی که تحت تأثیر نوسانات پویای دما و رطوبت، تغییرپذیری ذاتی کیفیت دانه‌ها، و عوامل خارجی مانند هوازی، آفات و شیوه‌های مدیریتی

تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تعارض منافی ندارند.

نقش کلیدی بسته‌بندی‌های هوشمند و پیشرفته را در مهار زیست‌توده قارچی و تضمین ایمنی غذایی در طول دوره ذخیره‌سازی برنج تأکید می‌کند و زمینه را برای توسعه راهکارهای نوین و پایدار در زنجیره تأمین غلات فراهم می‌آورد.

References

1. Fang G-Y, Song W-T, Qiu Z-Z, Zhong Y-L, Zhu C-J, Wang P, et al. Microbial interactions and biocontrol for reducing mycotoxin accumulation in stored Rice under temperature and humidity variations. *Food Research International*. 2025;116775.
2. Naeem I, Ismail A, Gong YY, Riaz M, Hameed A, Aziz M, et al. *Aspergillus* spp and aflatoxins in Pakistani rice: a case study on the decontamination effect of accelerated aging and improved storage practices. *Toxicon*. 2025;108515.
3. Opoku B, Osekre EA, Opit G, Bosomtwe A, Bingham GV. Evaluation of hermetic storage bags for the preservation of yellow maize in poultry farms in Dormaa Ahenkro, Ghana. *Insects*. 2023;14(2):141.
4. Mutambuki K, Likhayo P. Efficacy of different hermetic bag storage technologies against insect pests and aflatoxin incidence in stored maize grain. *Bulletin of Entomological Research*. 2021;111(4):499-510.
5. Wu J, Wang Z, An W, Gao B, Li C, Han B, Tao H, Wang J, Wang X, Li H. *Bacillus subtilis* simultaneously detoxified aflatoxin B1 and zearalenone. *Applied Sciences*. 2024;14(4):1589.
6. Chandravarman P, Agyei D, Ali A. The prevalence and concentration of mycotoxins in rice sourced from markets: A global description. *Trends in food science & technology*. 2024;146:104394.
7. Akhila PP, Sunooj KV, Navaf M, Aaliya B, Sudheesh C, Sasidharan A, et al. Application of innovative packaging technologies to manage fungi and mycotoxin contamination in agricultural products: Current status, challenges, and perspectives. *Toxicon*. 2022;214:18-29.
8. Ouma F, Luthra K, Oduola A, Atungulu GG. Investigating safe storage conditions to mitigate aflatoxin contamination in rice. *Food Control*. 2024;163:110529.
9. Guo J, He Z, Ma C, Li W, Wang J, Lin F, et al. Evaluation of cold plasma for decontamination of molds and mycotoxins in rice grain. *Food Chemistry*. 2023;402:134159.
10. Brandelli A. Nanocomposites and their application in antimicrobial packaging. *Frontiers in Chemistry*. 2024;12:1356304.
11. Operato L, Panzeri A, Masoero G, Gallo A, Gomes L, Hamd W. Food packaging use and post-consumer plastic waste management: a comprehensive review. *Frontiers in Food Science and Technology*. 2025;5:1520532.
12. Siri-Anusornsak W, Kolawole O, Mahakarnchanakul W, Greer B, Petchkongkaew A, Meneely J, et al. The occurrence and co-occurrence of regulated ,emerging, and masked mycotoxins in rice bran and maize from Southeast Asia. *Toxins*. 2022;14(8):567.
13. Li Yn, Zhou Y, Wang R, Chen Z, Luo X, Wang L, et al. Removal of aflatoxin B1 from aqueous solution using amino-grafted magnetic mesoporous silica prepared from rice husk. *Food Chemistry*. 2022;389:132987.

14. Miklós G, Angeli C, Ambrus Á, Nagy A, Kardos V, Zentai A, et al. Detection of aflatoxins in different matrices and food-chain positions. *Frontiers in Microbiology*. 2020;11:1916.
15. Properties ACD-oPSDoP, editor Standard test method for water absorption of plastics. 1995: American Society for Testing and Materials.
16. Marroquín-Cardona A, Johnson N, Phillips T, Hayes A. Mycotoxins in a changing global environment—a review. *Food and Chemical Toxicology*. 2014;69:220-30.
17. Casu A, Camardo Leggieri M, Toscano P, Battilani P. Changing climate, shifting mycotoxins: A comprehensive review of climate change impact on mycotoxin contamination. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2024;23(2):e13323.
18. Pande A, Paliwal J, Jian F, Bakker MG. Mechanisms and application of mycotoxin decontamination techniques in stored grains. *Journal of Stored Products Research*. 2025;111:102486.
19. Oladele JO, Xenophontos X, Elizondo III GM, Daasari Y, Wang M, Tamamis P, et al. Green-Engineered Montmorillonite Clays for the Adsorption, Detoxification, and Mitigation of Aflatoxin B1 Toxicity. *Toxins*. 2025;17(3):131.
20. Mohan B, Gupta RK, Pandey V, Pombeiro AJ, Ren P. Optimized cleansing techniques: engineered covalent-organic frameworks (COF) adsorbents for mycotoxin removal from food products. *Trends in Food Science & Technology*. 2025:104936.
21. Ashfaq A, Khursheed N, Fatima S, Anjum Z, Younis K. Application of nanotechnology in food packaging: Pros and Cons. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2022;7:100270.