



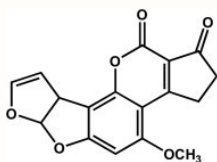
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Μείωση Αφλατοξινών σε Αμύγδαλα με τη Χρήση γ-Ακτινοβολίας

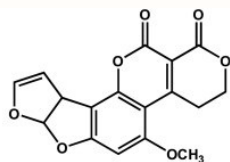
Aflatoxin Inactivation in Gamma-Ray Irradiated Almonds

Ε. Μποζίνου, Β. Αθανασιάδης και Σ. Λαλάς

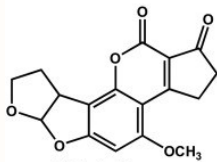
Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων & Διατροφής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας



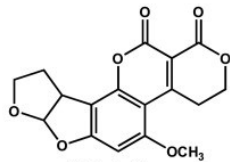
Aflatoxin B₁



Aflatoxin G₁



Aflatoxin B₂



Aflatoxin G₂





Το Πρόβλημα των Αφλατοξινών

Οι αφλατοξίνες συγκαταλέγονται στις πλέον επικίνδυνες μυκοτοξίνες παγκοσμίως. Παράγονται κυρίως από τους μύκητες *Aspergillus flavus* και *A. parasiticus*, οι οποίοι αναπτύσσονται σε ξηρούς καρπούς, δημητριακά και άλλα τρόφιμα υπό ευνοϊκές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας.

Αφλατοξίνη B1

Καρκινογόνο κατηγορίας 1

σύμφωνα με τη IARC — η πιο τοξική και εκτενώς μελετημένη αφλατοξίνη.

Αφλατοξίνες B2, G1, G2

Ομάδα τοξινών με διαφοροποιημένη χημική δομή και μεταβλητή τοξικότητα, που απαντώνται σε αμύγδαλα και άλλους ξηρούς καρπούς.

Χημικός Κίνδυνος

Σοβαρή απειλή για τη δημόσια υγεία και τη βιομηχανία τροφίμων — απαιτείται αποτελεσματική στρατηγική **αδρανοποίησης ή πρόληψης του σχηματισμού τους.**

Στόχοι της Μελέτης

Η παρούσα εργασία διερευνά τη χρήση της γ-ακτινοβολίας ως τεχνολογίας επεξεργασίας αμυγδάλων, με τετραπλή ερευνητική εστίαση και σκοπό την αξιολόγηση τόσο της αποτελεσματικότητάς της όσο και των επιδράσεών της στην ποιότητα του προϊόντος.

1

Αδρανοποίηση Αφλατοξινών

Αξιολόγηση της ικανότητας της γ-ακτινοβολίας να μειώσει τα επίπεδα των αφλατοξινών B1, B2, G1 και G2, τόσο σε διαλύματα όσο και σε αμύγδαλα.

2

Μικροβιολογική Ασφάλεια

Αξιολόγηση της επίδρασής της γ-ακτινοβολίας στην αδρανοποίηση και στην αναστολή της ανάπτυξης του *A. flavus* σε εμβολιασμένα αμύγδαλα.

3

Θρεπτική Αξία

Μελέτη της επίδρασης της γ-ακτινοβολίας στα μακροθρεπτικά και μικροθρεπτικά συστατικά, συμπεριλαμβανομένης της βιταμίνης E και των λιπαρών οξέων.

4

Βέλτιστη Δόση

Προσδιορισμός της δόσης που επιτυγχάνει την καλύτερη ισορροπία μεταξύ της αποτελεσματικότητας αδρανοποίησης και της διατήρησης της θρεπτικής ποιότητας.

Πειραματικός Σχεδιασμός

Δόσεις γ-Ακτινοβολίας

Εφαρμόστηκαν τέσσερα επίπεδα δόσης:

- **1 kGy** — χαμηλή δόση
- **2 kGy** — μέτρια δόση
- **4 kGy** — υψηλή δόση
- **8 kGy** — πολύ υψηλή δόση

Σε κάθε σκέλος έγινε σύγκριση με τον **μάρτυρα (0 kGy)**.

Τρία Πειραματικά Σκέλη

→ Διαλύματα αφλατοξινών

Τεχνητά παρασκευασμένα διαλύματα συγκέντρωσης 5 μg/kg, για τη μελέτη της άμεσης δράσης.

→ Εμπλουτισμένα αμύγδαλα

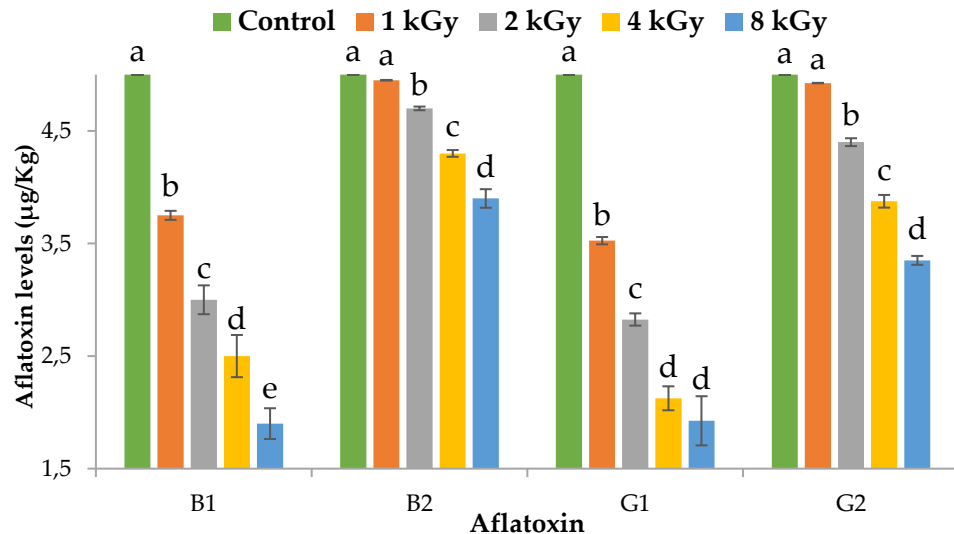
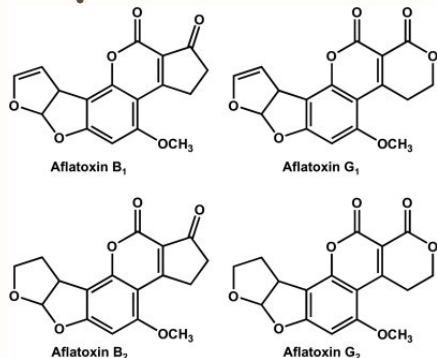
Αμύγδαλα εμπλουτισμένα με αφλατοξίνες (υγρασία 4,5%), για τη μελέτη της μείωσης σε πραγματικό τρόφιμο.

→ Εμβολιασμένα αμύγδαλα

Αμύγδαλα εμβολιασμένα με *A. flavus*, για την αξιολόγηση της μικροβιακής αδρανοποίησης.

Οι αναλύσεις περιλάμβαναν **HPLC-FLD** για τις αφλατοξίνες, **AFPA** για τους μύκητες και προσδιορισμό των θρεπτικών συστατικών.

Διαλύματα Αφλατοξινών: Αποτελέσματα



Η ακτινοβόληση των διαλυμάτων αφλατοξινών ανέδειξε σαφή δόσοεξαρτώμενη μείωση, με την B1 να εμφανίζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία.

Αφλατοξίνη B1

Μείωση **έως 62%** στα 8 kGy — η πιο ακτινοευαίσθητη τοξίνη.

Αφλατοξίνη G1

Σημαντική μείωση παρόμοιας τάξης με την B1, λόγω της συγγενούς χημικής δομής της.

Αφλατοξίνες B2 & G2

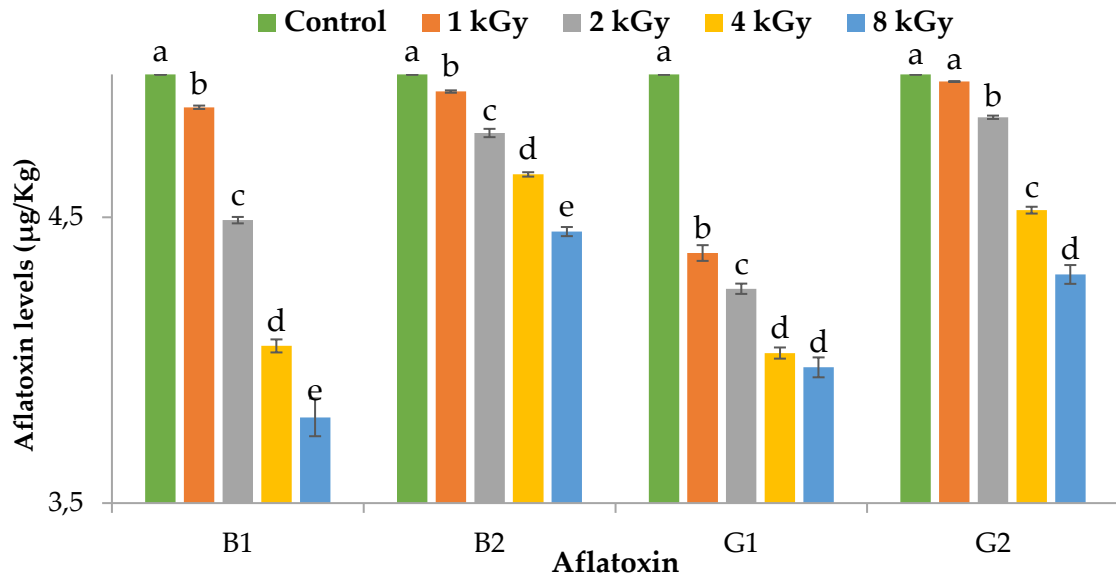
Μικρότερη ευαισθησία — η κεκορεσμένη δακτυλιακή δομή τους προσδίδει σχετική ανθεκτικότητα στη ριζική οξείδωση.

Μηχανισμός

Η ακτινόλυση του νερού παράγει ρίζες $\cdot\text{OH}$ και $\cdot\text{H}$ οι οποίες, στις περιπτώσεις των B1 και G1 προσβάλλουν τους διπλούς δεσμούς που απαντώνται σε αρωματικούς ή ετεροκυκλικούς δακτυλίους.

Αμύγδαλα Εμπλουτισμένα με Αφλατοξίνες

Η ακτινοβόληση αμυγδάλων με χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία (4,5%) επέφερε σαφώς μικρότερη μείωση των αφλατοξινών σε σύγκριση με τα υδατικά διαλύματα. Η **χαμηλή υγρασία** περιορίζει σημαντικά τον σχηματισμό ελευθέρων ριζών, μειώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα της ακτινοβολίας.



Αφλατοξίνη B1

Μείωση **24%** στα 8 kGy — αισθητά χαμηλότερη από την αντίστοιχη σε υδατικό διάλυμα (-62%).

Κρίσιμος Παράγοντας

Η **υγρασία 4,5%** περιορίζει ουσιαστικά την παραγωγή $\cdot\text{OH}$. Η αύξηση της υγρασίας θα μπορούσε να ενισχύσει την αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας.

Αφλατοξίνη G1

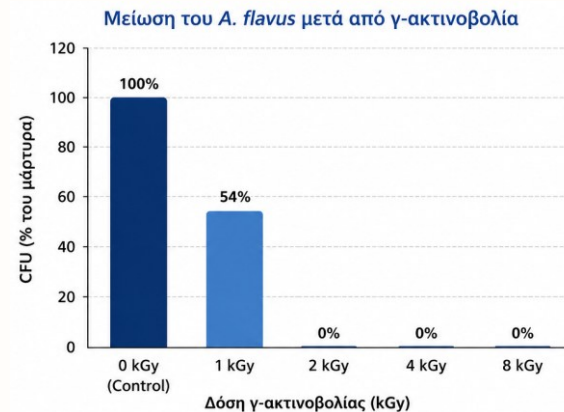
Μείωση **20,5%** στα 8 kGy — ακολουθεί παρόμοια τάση με την B1 στο τρόφιμο.

Συμπέρασμα

Δεν επιτυγχάνεται πλήρης αποτοξίνωση — η γ-ακτινοβολία από μόνη της δεν επαρκεί για την αδρανοποίηση των αφλατοξινών σε ξηρά αμύγδαλα.

Αμύγδαλα με *A. flavus*

Η γ-ακτινοβολία επέδειξε **εξαιρετική αποτελεσματικότητα** στην αδρανοποίηση του *A. flavus*, επιτυγχάνοντας πλήρη εξάλειψη του μύκητα σε δόσεις ≥ 2 kGy. Η αναστολή της μυκητιακής ανάπτυξης συνεπάγεται και την αποτροπή νέας βιοσύνθεσης αφλατοξινών κατά την αποθήκευση.



-46%

CFU

στη δόση 1 kGy — σημαντική, αλλά ατελής αδρανοποίηση.

100%

Εξάλειψη

πλήρης αδρανοποίηση *A. flavus* σε δόσεις ≥ 2 kGy.



Η γ-ακτινοβολία ≥ 2 kGy αποτρέπει πλήρως την παραγωγή αφλατοξινών κατά την αποθήκευση αμυγδάλων, εξαλείφοντας το μύκητα.

Επίδραση στη Θρεπτική Αξία

Η γ-ακτινοβολία **δεν** επηρεάζει ουσιωδώς την πρωτεΐνη ή το ολικό λίπος των αμυγδάλων. Αντίθετα, η **βιταμίνη Ε** παρουσιάζει στατιστικά σημαντική μείωση σε υψηλές δόσεις, γεγονός που υποδηλώνει οξειδωτική υποβάθμιση.

Πρωτεΐνη & Λίπος

Δεν παρατηρείται στατιστικά σημαντική μεταβολή σε καμία από τις δοκιμαζόμενες δόσεις ($p > 0,05$). Τα μακροθρεπτικά συστατικά παραμένουν σταθερά.

Βιταμίνη Ε

Σημαντική μείωση στα 8 kGy: από **25,97 → 17,16 mg/100g** (−34%).

Συστατικό	Control	1 kGy	2 kGy	4 kGy	8 kGy
Πρωτεΐνη (g/100g)	21,23 ±0,91 ^a	21,11 ±0,51 ^a	20,96 ±0,99 ^a	20,88 ±1,44 ^a	19,74 ±1,40 ^a
Λίπος (g/100g)	52,17 ±1,93 ^a	52,54 ±1,79 ^a	52,91 ±2,70 ^a	53,22 ±3,25 ^a	55,69 ±3,90 ^a
Βιτ. Ε (α-τοκοφερόλη mg/100g)	25,97 ±1,64 ^a	24,18 ±1,81 ^a	23,9 ±0,65 ^a	20,57 ±0,91 ^b	17,16 ±0,36 ^c

Διαφορετικά γράμματα (a, b, c) υποδηλώνουν στατιστικές σημαντικές διαφορές ($p < 0,05$).

Λιπαρά Οξέα

Η ακτινοβόληση προκάλεσε δοσοεξαρτώμενες μεταβολές στη σύσταση των λιπαρών οξέων, μέσω μηχανισμών **λιπιδικής υπεροξειδωσης**. Ιδιαίτερη σημασία έχει η μείωση των πολυακόρεστων λιπαρών οξέων (PUFA), καθώς υποβαθμίζει δυσμενώς τη διατροφική ποιότητα των αμυγδάλων.

↑ SFA & MUFA

Παρατηρείται μικρή αύξηση των κορεσμένων και μονοακόρεστων λιπαρών οξέων με την αύξηση της δόσης, με στατιστικά σημαντική μεταβολή για τα MUFA (παλμιτολεϊκό, ελαϊκό) στα 4–8 kGy.

↓ PUFA έως –17%

Καταγράφηκε σημαντική μείωση του λινολεϊκού οξέος (C18:2, ω–6) στα 4 & 8 kGy, το οποίο αποτελεί το κύριο PUFA των αμυγδάλων.

Μεταβολή Λόγων

Ο λόγος PUFA:SFA μειώθηκε από 1,99 (control) σε 1,55 (8 kGy), ενώ ο λόγος MUFA:PUFA αυξήθηκε από 4,00 σε 5,20, γεγονός που υποδηλώνει δυσμενή διατροφική μετατόπιση.

Fatty Acid	Control	1 kGy	2 kGy	4 kGy	8 kGy
Palmitic (C16:0)	6.28 ± 0.28 ^a	6.36 ± 0.44 ^a	6.44 ± 0.25 ^a	6.54 ± 0.27 ^a	6.59 ± 0.14 ^a
Stearic (C18:0)	2.38 ± 0.14 ^a	2.42 ± 0.1 ^a	2.45 ± 0.09 ^a	2.5 ± 0.17 ^a	2.53 ± 0.08 ^a
Σ Saturated (SFA)	8.66 ± 0.42 ^a	8.78 ± 0.54 ^a	8.89 ± 0.34 ^a	9.04 ± 0.44 ^a	9.12 ± 0.22 ^a
Palmitoleic (C16:1)	0.21 ± 0.01 ^c	0.24 ± 0.01 ^b	0.25 ± 0.01 ^b	0.33 ± 0.01 ^a	0.35 ± 0.02 ^a
Oleic (C18:1)	68.6 ± 4.73 ^a	70.27 ± 2.04 ^a	71.06 ± 3.13 ^a	72.87 ± 2.84 ^a	73.25 ± 1.68 ^a
Σ Monounsaturated (MUFA)	68.81 ± 4.74 ^a	70.51 ± 2.05 ^a	71.31 ± 3.13 ^a	73.2 ± 2.85 ^a	73.6 ± 1.71 ^a
Linoleic (C18:2, ω-6)	17.18 ± 0.46 ^a	16.52 ± 1.14 ^{a,b}	16.22 ± 0.81 ^{a,b}	15.28 ± 0.84 ^{b,c}	14.15 ± 0.4 ^c
Σ Polyunsaturated (PUFA)	17.18 ± 0.46 ^a	16.52 ± 1.14 ^{a,b}	16.22 ± 0.81 ^{a,b}	15.28 ± 0.84 ^{b,c}	14.15 ± 0.4 ^c
PUFA:SFA ratio	1.99 ± 0.04 ^a	1.88 ± 0.01 ^b	1.82 ± 0.02 ^c	1.69 ± 0.01 ^d	1.55 ± 0.01 ^e
MUFA:PUFA ratio	4 ± 0.17 ^d	4.28 ± 0.17 ^c	4.4 ± 0.03 ^c	4.79 ± 0.08 ^b	5.2 ± 0.03 ^a

Τιμές σε g/100g ολικών λιπαρών οξέων. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (p < 0,05).



Συζήτηση

Η συνολική ερμηνεία των αποτελεσμάτων αποκαλύπτει μια σύνθετη εικόνα: η γ-ακτινοβολία αποτελεί αποτελεσματικό μέσο μικροβιακής ασφάλειας, ενώ η ικανότητά της να αδρανοποιεί τις αφλατοξίνες εξαρτάται καθοριστικά από το υπόστρωμα και την περιεκτικότητα σε υγρασία.



Μικροβιακή Ασφάλεια

Η γ-ακτινοβολία είναι **ιδιαίτερα αποτελεσματική** στην αδρανοποίηση του *A. flavus* — επιτυγχάνει πλήρη εξάλειψη σε ≥ 2 kGy και προλαμβάνει άμεσα τον σχηματισμό νεοπαράγόμενων αφλατοξινών.



Ρόλος Υγρασίας

Η **υγρασία αποτελεί κρίσιμο παράγοντα**: η χαμηλή περιεκτικότητα (4,5%) των αμυγδάλων περιορίζει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της χημικής αδρανοποίησης των αφλατοξινών.



Ισορροπία Δόσης—Ποιότητας

Οι υψηλές δόσεις (>4 kGy) υποβαθμίζουν τη βιταμίνη E και τα PUFA. Επομένως, απαιτείται **βέλτιστη δόση** που να διασφαλίζει την ασφάλεια χωρίς σημαντική απώλεια της θρεπτικής αξίας.

Συμπεράσματα

Η γ-ακτινοβολία συνιστά μια **υποσχόμενη και αποτελεσματική μέθοδο** για τη μικροβιακή απολύμανση των αμυγδάλων. Για τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ ασφάλειας και ποιότητας, συνιστάται δόση **1–2 kGy**.

✓ Θετικά Αποτελέσματα

- Πλήρης εξάλειψη του *A. flavus* σε ≥ 2 kGy
- Μερική μείωση των αφλατοξινών (B1: –24% στα αμύγδαλα)
- Διατήρηση της πρωτεΐνης και του ολικού λίπους
- Αποτροπή νεοπαραγόμενων αφλατοξινών

✗ Περιορισμοί σε Υψηλές Δόσεις

- Σημαντική μείωση της βιταμίνης E στα 8 kGy (–34%)
- Μείωση των PUFA έως –17% λόγω λιπιδικής οξείδωσης
- Ατελής αδρανοποίηση των ήδη υπάρχουσών αφλατοξινών

✓ **Προτεινόμενη δόση: 2 kGy** — εξασφαλίζει πλήρη μικροβιακή ασφάλεια, ελαχιστοποιεί τις θρεπτικές απώλειες και αποτρέπει την παραγωγή αφλατοξινών κατά την αποθήκευση.

Τα αποτελέσματα έχουν δημοσιευθεί στο περιοδικό Applied Sciences, 2024, 14, 11985.

<https://doi.org/10.3390/app142411985>

Article

Aflatoxin Inactivation in Gamma-Ray-Irradiated Almonds

Eleni Bozinou ¹, Vassilis Athanasiadis ¹, Iordanis Samanidis ¹, Maria Govari ², Alexander Govaris ³, Konstantinos Sfimos ⁴ and Stavros I. Lalas ^{1,*}

¹ Department of Food Science and Nutrition, University of Thessaly, Thessaloniki, Greece; ebozinou@uth.gr (E.B.), vaathanasiadis@uth.gr (V.A.), isaman@uth.gr (I.S.)

² Laboratory of Safety and Quality of Dairy Foods, School of Veterinary Medicine, Faculty of Health Sciences, Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki, Greece; margochem@gmail.com

³ Laboratory of Hygiene of Foods of Animal Origin, Faculty of Veterinary Medicine, University of Thessaly, 224 Trikalon Str., 43131 Karditsa, Greece; agovaris@uth.gr

⁴ Department of Food Science and Technology, School of Food Science, University of West Attica, 12243 Egaleo, Greece; ksifimos@uniwa.gr

* Correspondence: slalas@uth.gr

Abstract: Aflatoxins are foodborne toxins that occur naturally in various crops because of fungal contamination, particularly from two strains, namely *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus*. Given their adverse properties, which are teratogenic, mutagenic, and carcinogenic, aflatoxins present a significant public health concern. Consequently, efforts are underway to inactivate aflatoxins and inhibit the growth of these fungi to prevent toxin formation. Since chemical treatments for food products are undesirable or even restricted in some countries, alternative approaches are also implemented. This study investigated gamma-ray (γ -ray) irradiation as a potential method for reducing aflatoxin levels. Specifically, solutions of aflatoxins B1, B2, G1, and G2 were irradiated with doses of 1, 2, 4, and 8 kGy using a cobalt-60 irradiation source. Following γ -irradiation, a notable reduction in aflatoxin levels was observed, particularly for types B1 and G1, which process higher toxicity. This finding suggests γ -irradiation as a feasible method for aflatoxin deactivation. Additionally, as a proof of concept, almond samples spiked with aflatoxins and *A. flavus* were irradiated. The results showed a decrease in both aflatoxin levels and microbial load in these samples. Overall, these findings indicate that γ -irradiation is a promising approach to aflatoxin reduction, microbial decontamination, and the potential extension of almonds' shelf life.

Keywords: toxins; γ -irradiation; food; fungi; degradation; microbial; decontamination



Citation: Bozinou, E.; Athanasiadis, V.; Samanidis, I.; Govari, M.; Govaris, A.; Sfimos, K.; Lalas, S.I. Aflatoxin Inactivation in Gamma-Ray-Irradiated Almonds. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 11985. <https://doi.org/10.3390/app142411985>

Academic Editors: Fabio Maria Colombo and Leonardo Alberghini

Received: 10 November 2024

Revised: 15 December 2024

Accepted: 19 December 2024

Published: 21 December 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Aspergillus flavus and *Aspergillus parasiticus* are two fungus species that naturally produce aflatoxins, a class of mycotoxins [1]. Numerous crops, including peanuts, maize, cottonseed, almonds, and pistachios, are frequently contaminated by these fungi. Because of their strong carcinogenic, mutagenic, and teratogenic properties, aflatoxins have emerged as a major global food safety problem in food and feed products [2]. Based on their chemical structures, aflatoxins are categorized into four primary types: B1, B2, G1, and G2 [2]. The most common and potent kind, aflatoxin B1, has a well-established risk profile. Aflatoxin B1 is categorized as a Group 1 carcinogen by the International Agency for Research on Cancer (IARC), indicating that it has been shown to cause cancer in people [3]. It also has immunosuppressive properties and has the potential to cause liver cancer and other liver-related disorders, especially in those who are exposed to a highly aflatoxin-contaminated diet for an extended length of time [4]. Aflatoxin exposure also affects the immune system's capacity to fight infections, which increases vulnerability to infectious disorders [5,6]. Due to the abovementioned health effects, it is easily conceived that it is paramount to prevent their formation or eliminate them from contaminated food.

Ευχαριστώ για την προσοχή σας

