

MİKOTOKSİNLERİN DETOKSİFİKASYONUNDA KULLANILAN FİZİKSEL, KİMYASAL ve BİYOLOJİK YÖNTEMLER

Hilal DEMİRPENÇE , Devrim BEYAZ²**

¹ Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Koçarlı Meslek Yüksekokulu, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Aydın, Türkiye,

²Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Veteriner Fakültesi, Besin/Gıda Hijyeni ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Aydın, Türkiye

Geliş /Received 11.04.2025; Kabul /Accepted: 21.01.2025; Online baskı /Published online: 04.08.2025

Demirpençe, H., Beyaz, D. (2025). Mikotoksinlerin detoksifikasyonunda kullanılan fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler. GIDA (2025) 50 (4) 629-643 doi: 10.15237/ gida.GD25052

Demirpençe, H., Beyaz, D. (2025). *Physical, chemical and biological methods used in detoxification of micotoxins. GIDA (2025) 50 (4) 629-643 doi: 10.15237/ gida.GD25052*

ÖZ

Mikotoksinler, halk sağlığı üzerinde oluşturdukları tehdit ve ekonomilere olan olumsuz etkileri nedeniyle dünya çapında önemli bir sorun olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, gıdalarda mikotoksinlerin önlenmesi, kısmen azaltılması veya tamamen ortadan kaldırılmasına yönelik çalışmalar önem taşımaktadır. Gıdalardaki mikotoksinleri engellemek için uygulanan ısı işlem, fermantasyon ve ışınlama gibi bazı endüstriyel ve evsel işlemler incelendiğinde, bu işlemlerin mikotoksinlerin tamamen uzaklaştırılmasında yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple son yıllarda mikotoksinlerin kontrol altına alınabilmesi amacıyla tamamlayıcı stratejiler ve yenilikçi yöntemlerin geliştirilmesine odaklanılmıştır. Mikotoksin detoksifikasyonu için fiziksel (ışınlama, soğuk plazma, yüksek basınç, darbeleri elektrik alanları), kimyasal (amonyak, kitosan, ozon) ve biyolojik (laktik asit bakterileri, probiyotikler) birçok yöntem kullanılmaktadır. Fiziksel ve kimyasal yöntemlerle karşılaştırıldığında, biyolojik yöntemlerle detoksifikasyon süreçleri, gıda ürünlerinin besin değerlerinde daha az kayba neden oldukları için en umut verici yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

Anahtar kelimeler: Mikotoksinler, detoksifikasyon, gıda güvenliği, halk sağlığı

PHYSICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL METHODS USED IN DETOXIFICATION OF MICOTOXINS

ABSTRACT

Mycotoxins are recognized as a major problem worldwide due to the threat they pose to public health and their negative impact on economies. Therefore, efforts to prevent, partially reduce or completely eliminate mycotoxins in foods are important. When some of the industrial and domestic processes such as heat treatment, fermentation and irradiation applied to prevent mycotoxins in foods are examined, it has been observed that these processes are insufficient to completely remove mycotoxins. Therefore, recent years have focused on the development of complementary strategies and innovative methods to control mycotoxins. Many physical (irradiation, cold plasma, high pressure, pulsed electric fields), chemical (ammonia, chitosan, ozone) and biological (lactic acid bacteria, probiotics) methods are used for mycotoxin detoxification. Compared to physical and

*Sorumlu yazar / Corresponding author

✉: hilaldemirpençe@hotmail.com

☎: (+90) 506 232 1414

Hilal Demirpençe ORCID no: 0000-0001-6121-8909

Devrim Beyaz; ORCID no: 0000-0001-8935-9850

chemical methods, detoxification processes by biological methods are considered to be the most promising approach as they cause less loss of nutritional value of food products.

Key words: Mycotoxins, detoxification, food safety, public health

GİRİŞ

Mikotoksinler, belirli küfler tarafından üretilen ve küflerin geliştiği birçok gıdada doğal olarak oluşan sekonder toksik bileşiklerdir. Mikotoksinler, özellikle güçlü kanserojen madde olmaları, karaciğere zarar vermeleri ve bağışıklık sistemini baskılamaları ile insan ve hayvan sağlığı açısından ciddi tehlike oluşturmaktadırlar. Bu nedenle etkili gıda güvenliği uygulamaları; küflerin oluşumunu ve kontaminasyonunu önlemek, gıdaların uygun şekilde depolanmasını işlenmesini ve izlenmesini sağlamak için düzenleyici faaliyetler belirlemek gibi önlemleri içermektedir (Silva ve diğerleri, 2022; Bahari ve diğerleri, 2024).

Mikotoksinler; yerfıstığı, tahıllar, mısır, buğday gibi bitkisel gıdalar ve et, süt, yumurta gibi hayvansal gıdalarda tek başına veya kombinasyon halinde bulunabilmektedir. İnsanlar ve hayvanlar, mikotoksinlerle kontamine olmuş bitkisel ve hayvansal ürünlerin tüketimi yoluyla mikotoksinlere maruz kalmaktadırlar (Xu ve diğerleri, 2022; Silva ve diğerleri, 2022). Mikotoksinin küfler tarafından üretimi belirli çevresel faktörler tarafından uyarılmaktadır. Bu nedenle kontaminasyonun derecesi coğrafi konuma, tarımsal yöntemlere, depolama ve işleme dönemlerinde ürünlerin küf penetrasyonuna duyarlılığına göre değişmektedir (Adeyeye, 2016). İnsan ve hayvanlarda gıda yoluyla mikotoksine maruz kalındığında oluşabilecek akut, kronik, mutajenik ve teratojenik toksik etki mekanizmaları, bu toksinlerin gıdalarda bulunma dozları ve süreleri ile ilişkilendirilmektedir (Nesic ve diğerleri, 2021; Petrovic ve diğerleri, 2023). Mikotoksinlerin toksisiteyi yalnızca hayvan ve insan sağlığını olumsuz olarak etkilemekle kalmaz, aynı zamanda büyük çevresel değişikliklere de neden olur. Toksikitesinin derecesi, maruz kalma süresi, mikotoksin türü, besin değeri gibi çeşitli faktörlere bağlı olsa da, zararlı etkileri göz ardı edilmemelidir (Balwan ve diğerleri, 2023).

Küflerin mikotoksin üretebilmesi için gerekli optimum sıcaklık $25.5 \pm 5.5^\circ\text{C}$ 'dir. Mikotoksin gelişimi daha düşük sıcaklıklarda da (10°C 'nin

altında) meydana gelebilmektedir. Ancak gelişme süresi normalden daha uzun ve toksin konsantrasyonu daha az olmaktadır. Gıdada mikotoksin gelişimi için optimum su aktivitesinin (a_w) 0.83-0.9 aralığında olması gerekmektedir. Küf gelişimi ve mikotoksin üretimi için yüksek bağıl nem (%70-90) de önemli olmaktadır (Janik ve diğerleri, 2020).

Mikotoksinler çok stabildir ve gıda işleme proseslerine dayanabilmektedir (Awuchi ve diğerleri, 2021). Mikotoksinlerin gıdalarda oluşturduğu sağlık risklerini azaltmanın ya da önlemenin olası üç yolu bulunmaktadır. Bunlar; kontaminasyonun engellenmesi, mikotoksinlerin tüketicinin sindirim sistemi tarafından emiliminin engellenmesi ve mikotoksinlerin gıdalardan arındırılmasıdır. Detoksifikasyon yani arındırma işlemi, gıdalardaki mikotoksin düzeyini azaltmada en uygun yöntem olarak görülmektedir. Dünya genelinde mikotoksinlerin genellikle sağlık ve ekonomik yönden ortaya çıkardığı problemlerden dolayı gıdalarda mikotoksinlerin engellenmesi, kısmen azaltılması veya tamamen yok edilmesine yönelik çalışmalar artmıştır (Muhialdin ve diğerleri, 2020). Bu çalışma ile mikotoksinlerin önemi, detoksifikasyon yöntemleri ve bu yöntemlerin etkinliğinin detaylı bir şekilde karşılaştırılması amaçlanmıştır.

GIDALARDA KÜF VE MİKOTOKSİNLERİN ÖNEMİ

Mikotoksinler, besin kısıtlamaları ve aşırı karbon kaynağının varlığı nedeniyle küf gelişimi durduğunda üretilen toksinlerdir. Gıdalarda mikotoksinlerin bulunması tüketiciler için büyük bir tehdit oluşturmakta ve başlıca küresel sağlık sorunlarından birisi olarak kabul edilmektedir. Bazı gıdalarda bulunan mikotoksinler Çizelge 1'de gösterilmiştir (Balwan ve diğerleri, 2023).

Günümüzde iklim değişikliği gıda güvenliğini, yüksek sıcaklık, karbondioksit artışı, yağış miktarı ve dağılımı mikotoksin kontaminasyonu ve buna sebep olan etkilerde artış gibi tüm yönleriyle olumsuz etkilemektedir. Atmosferde sera

gazlarının artıyor olması küresel ısınmaya sebep olmakta ve bunun sonucunda hava sıcaklığının yılda 0,03°C artması beklenmektedir. Sıcaklık artışına bağlı olarak gıdalarda mikotoksin üretiminin artacağı tahmin edilmektedir. Günümüzde dünya çapında tahıl ve ürünlerinin

yaklaşık %25-50'si mikotoksinlerle kontamine olup, bu oranın %5-10'u tüketilebilir durumda olmamaktadır. Bunun sonucunda önemli ekonomik kayıplar meydana gelmektedir (Morshedi ve diğerleri, 2023).

Çizelge 1. Gıdalar ve Farklı Mikotoksin Kontaminasyonları (El-Sayed ve diğerleri, 2022; Muaz ve diğerleri, 2022; Morshedi ve diğerleri, 2023)

Gıda Grubu	Mikotoksinler
Tahıllar	Trikotesenler, Aflatoksinler, Fumonisinler, Zearalenonlar, Okratoksin
Baharatlar	Okratoksin
Yağlı tohumlar	Aflatoksinler, Okratoksin
Kuruyemişler	Aflatoksinler, Okratoksinler
Meyve ve Sebzeler	Patulin, Okratoksinler
Kahve ve Kakao	Okratoksinler
Süt	Aflatoksinler, Fumonisinler, Zearalenonlar, Okratoksinler
Yumurta	Zearalenonlar, Okratoksinler
Mısır	Fumonisinler, Zearalenonlar
Peynir	Aflatoksin M1

Mikotoksinler, hem insanlar hem de hayvanlar için akuttan kroniğe varıncaya kadar çeşitli sağlık sorunlarına neden oldukları için gıda güvenliği ile ilgili en önemli endişelerden birisi olarak kabul edilmektedir. Aflatoksinler, okratoksin (OTA, OTB, OTC) fumonisinler, deoksinivalenol, zearalenon, patulin gıdalarda bulunabilen ve insanların sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olan başlıca mikotoksinlerdir (Aloui ve diğerleri, 2023). Gıdalarda mikotoksin üreten en önemli küf türleri; *Aspergillus*, *Fusarium* ve *Penicillium*'dur (Elkenany ve Awad, 2020).

Son araştırmalara göre, insan ve hayvan sağlığı için önemli bir tehdit oluşturan 500'den fazla mikotoksin tanımlanmıştır (Saghir ve Bancroft, 2024). Küresel toksisite seviyelerine göre, en yaygın mikotoksin olan aflatoksinler küresel toksik yükün %35'ini oluşturmaktadır. Aflatoksinler, özellikle sıcak ve nemli iklimlerde mısır ve fıstık gibi ürünlerde yaygın olarak bulunmakta ve kanserojen özellikleriyle bilinmektedir. Aflatoksinlerin ardından, okratoksin A ve deoksinivalenol (DON) toplam mikotoksin yükünün %20'sini oluşturmaktadır. Okratoksin A genellikle tahıllarda, kahvede ve

kurutulmuş meyvelerde bulunmakta olup nefrotoksisite oluşumu ile ilişkilidir. DON ise tahıllarda bulunmakta ve akut gastrointestinal rahatsızlığa neden olmaktadır. Küresel mikotoksin kontaminasyonunun %15'ini oluşturan fumonisinler mısırdaki yaygındır ve yemek borusu kanserinin oluşuma neden olmaktadır. Son olarak, küresel yükün %10'undan sorumlu olan zearalenon, tahıllarda bulunan ve özellikle çiftlik hayvanlarında hormonal dengeyi bozan östrojenik bir mikotoksindir (Mafe ve Busselberg 2024). Çizelge 2'de gıdalarda bulunan bazı mikotoksinlerin insanlarda neden olduğu sağlık problemleri ve mikotoksin oluşturan küflerin türleri özetlenmiştir.

MİKOTOKSİNLERİN DETOKSİFİKASYONU

İlaç, mutajen veya kanserojen gibi zararlı bileşenlerin insan vücudundan ve gıdalardan uzaklaştırılması veya etkisiz hale getirilmesi işlemi detoksifikasyon olarak tanımlanmaktadır. Gıdalarda bulunan mikotoksinler hem insanlar hem de hayvanlar için potansiyel olarak kanserojen, mutajenik, teratojenik, sitotoksik, nörotoksik, nefrotoksik, östrojenik ve

immünoşüpresan etkilere sahiptir. Gıdaların mikotoksinlerle kontaminasyonu, insanlar ve hayvanlar için küresel bir sağlık riski ve büyük ekonomik sorunlar oluşturmaktadır. İyi tarım ve üretim uygulamaları mikotoksin kontaminasyonunu önlemede önemli bir etken oluşturmaktadır. Ancak bu uygulamalar

mikotoksin kontaminasyonunu önlemede tam olarak etkili olmadığı için fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler ve farklı yenilikçi yaklaşımlar da dahil olmak üzere çeşitli detoksifikasyon yöntemleri geliştirilmiştir (Piotrowska, 2021; Zhao ve diğeri, 2023).

Çizelge 2. Gıdalarda Bulunan Bazı Mikotoksinlerin İnsanlarda Oluşturduğu Sağlık Problemleri (El-Sayed ve diğeri, 2022; Balwan ve diğeri, 2023; Khan ve diğeri, 2024)

Mikotoksinler	Küf Cinsleri/Türleri	Hastalık Nedeni/Toksik Etkileri
Aflatoksin	<i>A. flavus</i> , <i>A. parasiticus</i> , <i>A. nomius</i> , <i>A. pseudotamarii</i> , <i>A. ochraceoroseus</i> , <i>A. bombycis</i>	Kanserojen, Hepatoksitite, DNA yapısının değişmesi, Bağışıklık sistemlerinin baskılanması, Bağırsak kanalında ve böbreklerde kanama, Fetal gelişimde anormallikler
Fumonisin	<i>F. oxysporum</i> , <i>F. nyagamai</i> , <i>F. proliferatum</i> , <i>F. verticillioides</i> , <i>F. culmorum</i>	Yemek borusu ve karaciğeri kanserleri, Nörotoksisite, Kalp yetmezliđi
Okratoksin	<i>A. ochraceus</i> , <i>A. niger</i> , <i>A. carbonarius</i> , <i>P. nordicum</i> , <i>P. viridicatum</i> , <i>P. verrucosum</i>	Böbrek yetmezliği ve karaciğeri hasarı, İştahsızlık, Mide bulantısı ve kusma
Zearalenon	<i>F. cerealis</i> , <i>F. graminearum</i> , <i>F. equiseti</i> , <i>F. culmorum</i> , <i>F. verticillioides</i>	Bağışıklık sistemi baskılanması, Kanserojen
Trikotesen	<i>F. cephalosporium</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>F. oxysporum</i> , <i>Stachybotrys</i> , <i>Trichothecium</i>	Kanserojen, Hormonal dengesizlik, Östrojenik etki, Üreme sorunları, Teratojenik etki, Protein sentezi inhibitörü, Anemi, Bağışıklık sistemi baskılanması
Patulin	<i>P. expansum</i> , <i>P. patulum</i> , <i>P. urticae</i> , <i>P. crustosum</i> , <i>P. griseofulvum</i>	Kanserojen, Mutajenlik, Teratojenlik, Sinirsel bozukluklar, Böbreklerde hasar, Cilt problemleri, Beyin hasarı

Fiziksel yöntemlerle detoksifikasyon

Fiziksel detoksifikasyon; başka toksik madde oluşturmayan, teknik olarak uygulanabilir olan, yüksek detoksifikasyon verimliliğine sahip, gıdaya ve içerdii besin maddelerine minimum oranda zarar veren, kimyasal kullanımını gerektirmeyen, düşük maliyetli ve çevre dostu bir yöntemdir. Fiziksel detoksifikasyon yöntemlerinden; ısl işlem (sıcaklık uygulaması), ışınlama, soğuk plazma (termal olmayan), yüksek basınç ve darbeleri elektrik alanları üzerine yapılan araştırmalar oldukça ilgi çekmektedir (Wang ve diğeri, 2023). Fiziksel detoksifikasyon yöntemleri, istenmeyen maddeyi fiziksel yollarla uzaklaştırmayı veya onu ana bileşikten daha az toksisiteye sahip veya zararsız bir bileşiğe dönüştürmeyi hedeflemektedir (Schrenk ve diğeri, 2024).

Sıcaklık uygulamasında, mikotoksinler genellikle termal olarak çok karardır ve nadiren termal işlemlerle ortamdaki uzaklaştırılabilirler. Gıdalarda kızartma, kavurma ve ekstrüzyon işlemlerinde kullanılan daha yüksek sıcaklıklar mikotoksin kontaminasyonunu azaltabilmektedir (Karlovsky ve diğeri, 2016). Gıdalarda bulunan mikotoksinlerin detoksifikasyonunda kontaminasyonun ilk seviyesi, toksinin ve gıdanın türü, ısıl işlem süresi, gıdanın nem içeriği ve pH'ı, sıcaklığın gıdaya penetrasyon derecesi önemli olan parametrelerdir (Agriopoulou ve diğeri, 2020). Bileşiminde yüksek yağ ve protein içeren gıdalar, mikotoksin detoksifikasyonunda yüksek sıcaklık uygulamaya uygun değildir (Afsah-Hejri ve diğeri, 2020). Isıl işlemlerle

mikotoksinlerin azaltılması sağlanabilmekte ancak tamamen ortadan kaldırılmasında tek başına yeterli olmamaktadır (Ryu ve diğerleri, 2008). Ayrıca, ısıl işlemlerin gıdaların besinsel ve organoleptik özelliklerini olumsuz yönde etkilemesinden dolayı gıda endüstrisi termal olmayan yöntemlere giderek daha fazla ilgi duymaktadır (Sipos ve diğerleri, 2021).

Işınlama, gıda kontaminasyonunu gidermek için uygulanan termal olmayan fiziksel bir muhafaza yöntemidir. İyonlaştırıcı radyasyon (gama ışınları) ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon (ultraviyole ışık, güneş ışığı, mikrodalgalar) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu radyasyon türlerinin her ikisinin de patojen mikroorganizmalar üzerinde öldürücü ya da sayılarını belli oranda azaltıcı, mikotoksinlerin üretimini durdurdurucu ve gıdada hali hazırda bulunan mikotoksinleri etkili bir şekilde parçalayıcı etkileri bulunmaktadır (Wang ve diğerleri, 2023). Gama ışınlamanın detoksifikasyon etkisi gıdaların nem içeriği, mikotoksin türleri, mikotoksin başlangıç kontaminasyon oranı, gama ışınlamanın dozu gibi faktörlere bağlıdır (Calado ve diğerleri, 2018; Peng ve diğerleri, 2023). Su ve diğer bileşenlerin radyolizi nedeniyle oluşan serbest radikallerin (hidrojen, süperoksit ve hidroksil iyonu) reaksiyonu sonucu oluşan dolaylı etkiler ışınlama ile detoksifikasyona neden olmaktadır (Guo ve diğerleri, 2021; Mir ve diğerleri, 2021).

Ultraviyole radyasyon (UV), gıda endüstrisinde dekontaminasyon için yaygın olarak kullanılan termal olmayan bir teknolojidir (Babaeie ve diğerleri, 2021). Ultraviyole radyasyon, dalga boyu aralığı 100 ile 400 nm arasında olan bir ışıktır. Elektromanyetik spektrumdaki dalga boyuna göre UVA (315–400 nm), UVB (280–315 nm) ve UVC (200–280 nm) olarak alt bölümlere ayrılmaktadır (Peng ve diğerleri, 2023). Ultraviyole ışınlama, fotoliz yoluyla kimyasal kontaminasyon kaynaklarını parçalamak için kullanılan etkili bir fiziksel teknolojidir. Yapılan araştırmalar, mikotoksinlerin detoksifikasyonunda UV ışınlamanın etkinliğinin özellikle UVC formunda olduğunu açıkça göstermiştir (Alnaemi ve diğerleri, 2025). UV, mikroorganizmaların hücre zarına nüfuz ederek DNA zincirlerindeki bitişik

timin ve sitozin bazları arasında çapraz bağlanmaya neden olabilmektedir. Böylece DNA replikasyonunu ve transkripsiyonunu inhibe ederek, hücre fonksiyonunu bozmakta ve apoptotik hücre ölümünü başlatmaktadır. Mikotoksinlerin çoğu UV ışığını absorbe ettiği ve fotokatalitik bozunma reaksiyonlarına girdiği için UV ile detoksifiye edilebilmektedir. UV, gıdalardan mikrobiyal ve mikotoksin kontaminasyonunu gidermek için en yaygın kullanılan yöntemlerden birisidir (Wang ve diğerleri, 2024). Ultraviyole radyasyon zayıf bir penetrasyona sahip olduğu için sıklıkla katı yüzeylere veya şeffaf sıvılara uygulanmaktadır (Peng ve diğerleri, 2023).

Maddenin dördüncü hali olarak kabul edilen plazma, birçok yüklü parçacık (OH^- , H_2O^+ , elektronlar), reaktif bileşikler (reaktif oksijen türleri, hidroksil radikal, süperoksit anyon hidrojen peroksit ve reaktif nitrojen türleri, peroksinitrit), uyarılmış ve bazik hallerdeki moleküller ve UV fotonları içeren bir tür iyonize gazdır. Soğuk plazma sürecinde yer alan mikroorganizmaların yıkılma mekanizması henüz açıklığa kavuşturulmamıştır. Yapılan çalışmalarla mikrobiyal hücrelerin inaktivasyonu doğrulanmış, aralarındaki ilişkiler ise ayrıntılı olarak araştırılmamıştır. Biyolojik materyalle temas ettiğinde, oksijenden veya nitrojenden türetilen bileşikler, yani O , O_2 , O_3 , OH , NO ve NO_2 , yüksek reaktivite ile karakterize edilmektedir (Niedzwiedz ve diğerleri, 2019). Soğuk plazma yöntemiyle mikotoksinlerin detoksifiye edilmesinde spesifik mekanizmalar mikroorganizmalarda olduğu gibi açıklığa kavuşturulamamıştır. Mikotoksin bozunmasını açıklamak için yalnızca AFB1, ZEN ve patulinin mekanizmaları bildirilmiştir. AFB1'in bozunması, terminal furan halkasının C(8) ve C(9) bağından başlamakta ve nihai bozunma ürünü elde etmek için çeşitli bozunma yollarından geçmektedir. Soğuk plazma uygulaması ile AFB1'in terminal furan halkasındaki bu çift bağın olmadığı ortaya konmuş, lakton ve terminal furan halka modifikasyonu toksisite ile ilişkilendirilmiştir. Soğuk plazma ile patulin molekülündeki lakton ve hemiasetal yapıların bozulması ile patulin

toksitesinin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir (Rao ve diğerleri, 2023).

Yüksek basınç uygulama teknolojisi, gıdayı bozulma etkenlerine karşı korumak için kullanılan, termal olmayan muhafaza ve sterilizasyon teknolojisidir. Bu teknolojiye, katı veya sıvı gıdalar yüksek basınca (genellikle 100 ila 1000 MPa aralığında) maruz bırakılmaktadır. Yüksek basınç, mikroorganizmaların, sporların, enzimlerin inaktivasyonuna neden olarak gıda ürünlerinin raf ömrünü, kalitesini, güvenliğini artırmaktadır. Ayrıca, yüksek basınç uygulanması ile mikotoksinlerin yapıları değiştirilmekte olup, toksisiteyi azaltılabilmektedir (Alizadeh ve diğerleri, 2021). Yüksek basınç işlemi; basınç seviyesi, basınçta geçen süre, işlem basıncına ulaşma süresi, adiabatik ısıtma, dekompresyon süresi, işlem sıcaklığı ve ürünün başlangıç sıcaklığı, gıdanın pH'ı bileşimi ve su aktivitesi, paketlenme malzemeleri ve işleme öncesi, depolama ve dağıtım sırasındaki dış faktörlerden etkilenmektedir (Woldemariam ve Emire, 2019).

Darbeleri elektrik alanı, gıdayı işlemek için yüksek voltajlı ve kısa süreli darbeleri elektrik alanı kullanan yeni bir gıda işleme teknolojisidir. Bu teknoloji ile mikroorganizmaların inaktivasyonu, mikotoksinlerin detoksifikasyonu, gıda kalitesinin iyileştirilmesi ve gıdanın raf ömrünün uzatılması işlemleri hedeflenmektedir. Darbeleri elektrik alanı teknolojisinde, iki elektrot arasına yerleştirilen bir

ürüne kısa süreler boyunca farklı elektrik alanı gücünde (1–40 kV/cm) elektriksel işlemler uygulanmaktadır. Darbeleri elektrik alanının düşük sıcaklıklarda mikroorganizmaları etkisiz hale getirmek için etkili bir yöntem olduğu bildirilmektedir. Sebzeler, meyve suları, süt ve sıvı yumurtalar gibi gıdaları sterilize etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Darbeleri elektrik alanının mikotoksinleri parçalamada iki şekilde etki mekanizması vardır. Birincisi, elektrik alanı tarafından üretilen yüksek voltaj ve kısa elektrik darbelerinin mikotoksin molekülleri üzerindeki doğrudan etkisidir. Bunun sonucunda kimyasal bağ kırılması veya redoks reaksiyonu meydana gelmektedir. İkincisi ise elektrik alanının, mikotoksinlerin bulunduğu hücre veya matris üzerindeki dolaylı etkisidir. Bu etki mikotoksinlerin fiziksel özelliklerini veya biyolojik aktivitesini değiştirmekte olup detoksifikasyona teşvik etmektedir. Darbeleri elektrik alanı teknolojisi ile gıdaların oda sıcaklığında veya düşük sıcaklıklarda işlenebilmesi, böylece ısıl işlemde kaybolan besin ve lezzet kaybının önlenmesi sağlanmaktadır. Avantajlı yönleri olsa da darbeleri elektrik alanı hala laboratuvarlarda gelişim aşamasındadır. Yatırım ve işletme maliyetleri diğer yöntemlere kıyaslandığında daha yüksektir. Aşırı elektrik alan yoğunluğu yüksek voltajlı darbe kaynaklarının ömrünü azaltabilmektedir (Pallares ve diğerleri, 2020; Wang ve diğerleri, 2024). Fiziksel yöntemlerle ilgili bazı çalışmalar Çizelge 3'de gösterilmiştir.

Çizelge 3. Fiziksel Detoksifikasyon Yöntemlerinin Kullanıldığı Bazı Çalışmalar

Fiziksel Yöntem	Gıda Ürünü/ Mikotoksin	Özet	Referans
Darbeleri Işık	Elma suyu/Patulin	Glutasyon (125 mg/ L) ve Fe ⁺² (10 mg/L) ilave edilmiş elma suyuna 64 J/cm ² enerji dozu uygulanmış ve patulinde %74 oranında azalma görülmüştür.	Rodriguez-Bencomo ve diğerleri, 2020
Darbeleri Elektrik Alanı	Üzüm suyu ve Smoothie/ enniatinler ve beaverisi	Meyve sularında ve smoothielerde mikotoksin azalması %43 ila %70 arasında değişmiştir. 30 kV voltaj ve 3 kV/cm'lik bir alan gücü elde edilmiş, 500 kJ/kg enerji uygulanmıştır. İşlem süresince sıcaklık 75 °C'yi aşmamıştır.	Pallares ve diğerleri, 2020

Soğuk Plazma	İncir/AFB1, AFB2, AFG1, AFG2	Soğuk plazma işlemi 35 kV 30 kHz'de 15 dakika uygulanmıştır. Öneklerde AFB1, AFB2, AFG1, AFG2 miktarlarında sırasıyla %59.64, %92.24, %35.98 %48.02 azalmayla toplam aflatoksin miktarında azalma %62.91 olarak saptanmıştır.	Benzer Gürel, 2023
Soğuk Plazma	Kuru Üzüm/OTA	Farklı frekans (1250 ve 2000 Hz) ve süreler (2 ve 4 dakika) uygulanmıştır. OTA miktarında 2000 Hz 2 dakikada %69, 1250 Hz 4 dakikada %36.87 azalma saptanmıştır.	Akbulut, 2023
Yüksek Voltajlı Soğuk Plazma Gama Işınlama	Yağsız Süt/AFM1 Süt/AFM1	Sütteki AFM1, süt renginde herhangi bir değişiklik olmaksızın 20 dakikada sırasıyla hava ve %65 oksijen içeren gaz kullanılması ile %65 ve %78.9 oranında parçalanmıştır. Pastörize süte her gün 0.39 mGy doz ışınlama uygulanmış ve 4. günün sonunda %51.5, 8. günün sonunda ise %99 azalmıştır.	Nguyen ve diğerleri, 2022
UV Işınlama	Yağsız Süt/AFM1	254 nm'de çalışan bir LED sistemi kullanılarak ışınlama gerçekleştirilmiştir. 20 dakikalık işlemin sonunda AFM1 %50 oranında azalmıştır.	Hassanpour ve diğerleri, 2019
UV Işınlama	Süt/AFM1, AFB1	365 nm'de çalışan bir LED sistemi kullanılarak ışınlama gerçekleştirilmiştir. AFB1 ve AFM1 konsantrasyonlarını sırasıyla %78.2 (836 mJ/cm ² de) ve %65.7 (857 mJ/cm ² de) oranında azaltmıştır.	Nguyen ve diğerleri, 2022
Yüksek Basınç Uygulama	Elma suyu/Patulin	Elma suyu, farklı patulin konsantrasyonlarıyla (5, 50 ve 100 ppb) yapay olarak kontamine edilmiştir. Sonuçlar, patulin seviyelerini %62.11'e kadar azalttığını göstermiştir.	Kurup ve diğerleri, 2022
s1			Avsaroglu ve diğerleri, 2015

Kimyasal yöntemlerle detoksifikasyon

Kimyasal detoksifikasyon yöntemleri, istenmeyen bir maddenin toksik grubunu yok etmeyi veya toksin çözünürlüğünü değiştirmeyi, kimyasal bir reaksiyon yoluyla yapısını değiştirerek azaltmayı hedeflemektedir. Örneğin bu yöntemler OTA mikotoksininde lakton halkasını veya amid bağına hidrolize etmektedir. Kimyasal detoksifikasyonda genellikle amonyak, kitosan, ozon gibi uygulamalar kullanılmaktadır (Viviane ve diğerleri, 2021; Ding ve diğerleri, 2023; Schrenk ve diğerleri, 2024).

Amonyak gibi alkali kimyasalların gıdalarda kullanımına ülkemizde ve Avrupa Birliği ülkelerinde izin verilmemektedir (Akbulut, 2023). Kitosan, selülozdan sonra doğada en bol bulunan ikinci karbonhidrattır. Kitosanın tarımda gıda

koruyucu veya yardımcı madde olarak kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Kitosan, kitinin deasetillenmiş bir formu olup, mantarlar, bakteriler ve virüsler gibi çok çeşitli mikroorganizmaları engelleme yeteneğine sahiptir. Ayrıca yapılan çalışmalarla limon esansiyel yağı ile kombine olarak kullanımının, fumonisin ve DON üzerinde etkili olduğu bildirilmiştir (Viviane ve diğerleri, 2021). Bilinen mikotoksinlerin çoğu asitlere dirençlidir. Güçlü asitlerle yapılan işlemler çeşitli olumsuz etkilere yol açmakta, çeşitli yeni bileşiklerin, asitlerin, alkalilerin, oksitleyici maddelerin, disülfürlerin ve gazların oluşumuna sebep olmaktadır (Pleadin ve diğerleri, 2019). Ozon kullanımı son zamanlarda mikotoksinlerin parçalanması için uygulanabilir bir kimyasal yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Ozon güçlü oksidasyon potansiyeline sahip olup, daha

fazla serbest radikal oluşturabilmektedir. Serbest radikaller mikotoksinlerde bulunan fonksiyonel grupların yapılarını değiştirmekte ve bunları düşük moleküler ağırlıklı ürünlere dönüştürmektedir. Böylece mikotoksinlerin toksisitesi azalmaktadır (Nagda ve Meena, 2024).

Ozon, doymamış çift bağlar ve karbon ile yüksek reaktiviteye sahip güçlü bir oksidan maddedir. Ozon FDA tarafından gıda endüstrileri için güvenli bir antimikrobiyal madde olarak 2001 yılında onay almış olan bir kimyasaldır. Ozon diğer kimyasal oksidanlara göre bol miktarda bulunması, hem gaz halinde hem de sıvı formda uygulanabilmesi, gıda ile temastan sonra herhangi bir kalıntı bırakmaması, yerinde üretilebilir olması ve tehlikeli bir atık madde oluşturmaması yönleriyle oldukça avantajlıdır. Ozon kullanımının verimliliği, gıdanın türüne, ortam sıcaklığına, pH'a

ve temas süresine bağlıdır. Oksijenin üç atomlu bir allotropu olan ozon, gıda endüstrisinde kullanılan oksidanlardan daha yüksek oksidasyon/redüksiyon potansiyeline sahip olan oldukça reaktif bir gazdır. Ozon gazı oluşumu, atmosferik hava, UV, korona deşarjı veya elektroliz gibi yüksek enerjili bir kaynağa maruz kaldığında meydana gelmektedir. Ozon gazının konsantrasyonu bir UV ölçer ile ölçülmektedir (Afsah-Hejri ve diğerleri, 2020; Conte ve diğerleri, 2020; Babaeie ve diğerleri, 2021; Alnaemi ve diğerleri, 2025). Yapılan çalışmalar süt, kuru üzüm, buğday unu gibi ürünlerde ozonun mikotoksin detoksifikasyonunda önemli bir etken olduğunu göstermektedir (Mohammadi ve diğerleri, 2017; Torlak, 2019; Zhuang ve diğerleri, 2020). Kimyasal yöntemlerle ilgili bazı çalışmalar Çizelge 4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4. Kimyasal Detoksifikasyon Yöntemlerinin Kullanıldığı Bazı Çalışmalar

Kimyasal Yöntem	Gıda Ürünü/ Mikotoksin	Özet	Referans
Ozon	Süt/AFM1	Süte 0.56 µg/kg konsantrasyonda AFM1 eklenmiştir. Süt 5 dakika ozonlandığında (gaz halindeki ozon 80 mg/dak) AFM1'in %50 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Sütün pH ve oksidasyon değeri, uygulamalar sonucunda önemli ölçüde değişmemiştir. β-karoten içeriği ise önemli ölçüde azalmıştır.	Mohammadi ve diğerleri, 2017
Ozon	Kuru Üzüm/OTA	Kuru üzümler, 12.8 mg/L'de sürekli bir gaz halindeki ozon akışına maruz bırakılmıştır. Kuru Üzümlerdeki başlangıç OTA seviyesi, 16.7 µg/kg olarak belirlenmiştir. 120 ve 240 dakikalık ozon maruziyetinden sonra sırasıyla %60.2 ve %82.5 oranında azalmıştır.	Torlak, 2019
Ozon	Buğday unu/DON	Konsantrasyonu 60 mg/L olan ozon gazıyla 2 saat işlenmiş buğday ununda DON bozulması oranı %33.33 olarak tespit edilmiştir. Kalite özellikleri işlem sonunda korunmuştur.	Zhuang ve diğerleri, 2020
Kitosan (Manyetik parça üzerine kaplı)	Meyve suyu/Patulin	200 µg/L patulin içeren meyve suyuna 300 µg adsorban eklenmiş, 5 saat içinde maksimum 6,67 mg/g adsorpsiyon kapasitesiyle patulin adsorpsiyonu için kitosanın etkili olduğu gösterilmiştir.	Luo ve diğerleri, 2017

Biyolojik yöntemlerle detoksifikasyon

Mikroorganizmaların mikotoksinleri gidermek için kullanılması fikri 1960'lı yılların başlarında ortaya çıkmıştır. Mikroorganizmalar aflatoksinleri parçalama yetenekleri açısından incelenmişlerdir (Piotrowska, 2021). Biyolojik detoksifikasyonlar, genellikle istenmeyen maddenin metabolizma yoluyla kimyasal yapısını değiştirmek veya bakterilerin hücre duvarı polisakaritlerine bağlanıp onları uzaklaştırmak için mikroorganizma veya enzimlerin kullanıldığı yöntemlerdir. Genel olarak, mikroorganizmalar detoksifikasyonda kullanılacaksa cins, tür ve suş adı veya kodu gibi taksonomik bilgilerin sağlanması gerekmektedir (Schrenk ve diğerleri, 2024). Mikrobiyal detoksifikasyonda, mikroorganizmaların üreme süreci sırasında ürettikleri metabolitler ve/veya salgıladıkları enzimler, mikotoksin üretimini engelleyerek veya parçalayarak mikotoksin kirliliğini azaltmaktadır. Mikroorganizmaların mikotoksinleri parçalayabilen enzimleri ve suşları belirlenmekte, daha sonra bu enzimlerin ve suşların yüksek verimli ekspresyonu için genetik teknoloji uygulanmakta ve bu enzimler ile suşlar izole edilmektedir. İzole suşlar ve enzimler gıdalardaki mikotoksinlerin parçalanmasında kullanılmak üzere saflaştırılmaktadır. Maya, bakteri ve mantarlar dahil olmak üzere birçok mikroorganizma gıda veya yemdeki mikotoksinleri parçalayabilmektedir (Xu ve diğerleri, 2022). Detoksifikasyon için kullanılacak mikroorganizmaların; kullanımının güvenli olması, patojenik ve toksik olmayan, stabil metabolitler üretmesi, mikotoksinleri parçalaması, tekrarlanamayan kompleksler oluşturması, depolama sırasında aktif olması, kabul edilemeyen düzeylerde bir koku veya tat üretmemesi, besin değerini koruması ve üretimi için minimum gereksinimlere sahip olması gibi belirli kriterleri karşılaması gerekmektedir (Muhialdin ve diğerleri, 2020).

Laktik asit bakterileri ve mayalar, mikotoksinleri hücre yüzeylerine bağlayarak veya daha az toksik ürünlere dönüştürerek azaltabildikleri için detoksifikasyonda en çok tercih edilen mikroorganizmalardır. Biyolojik yöntemlerde kullanılan mikroorganizmalar, mikotoksinlerin

mikrobiyal bozunumu için olası bazı yollar içermektedir. Fenolik hidroksil gruplarının modifikasyonu, lakton halkalarının hidrolizi ve asetilasyonu, keton karbonil gruplarının indirgenmesi, glukozilasyon, deaminasyon, dekarboksilasyon yollarıyla belirli gıdalardaki mikotoksinler bağlanabilmekte, parçalanabilmekte veya daha az toksik maddelere dönüştürülebilmektedir (Daou ve diğerleri, 2021; Xu ve diğerleri, 2022).

Laktik asit bakterileri, uygun hücre duvarı yapıları nedeniyle mikotoksinleri fiziksel olarak bağlayabildikleri için detoksifikasyonda önemli bir rol oynamaktadır (Lach ve Kotarska, 2024). Canlı mikroorganizmalar mikotoksini ya hücre duvarı bileşenlerine bağlamakta ya da aktif özümleme ve akümülyasyon ile absorbe etmektedir. Probiyotik bakterilerin mikotoksinlerin detoksifikasyonundaki etkisi, hücre duvarındaki peptidoglukan ve polisakarit gibi hidrofobik kısımlara, aflatoksin benzeri mutajenik ve kanserojenik maddelerin kovalent olmayan bağlarla bağlanmasıdır. Daha sonra detoksifikasyon etkisi ile bu maddelerin ince bağırsakta birikmesinin engellenmesi ve bakteri-mikotoksin şeklinde vücut dışına atılmasıdır. Hücrelerden sulu ortama özgül enzimlerin salınmasıyla toksinlerin metabolik dönüşümler sonucu parçalanması da diğer detoksifikasyon etkisidir (Omak ve diğerleri, 2016).

Mikotoksinlerin mikrobiyal dönüşümü, fiziksel/kimyasal yöntemlere kıyasla daha spesifik ve çevre dostu olduğu için iyi bir alternatiftir. Ancak, bazı durumlarda kullanımları zaman alıcıdır ve pratik değildir. Birçok biyolojik yöntem yalnızca laboratuvar ortamlarında etkili olmuştur. Bu nedenle gıdadaki etkinliklerini test etmek için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır (Daou ve diğerleri, 2021; Abraham ve diğerleri, 2022). Biyolojik yöntemlerle ilgili bazı çalışmalar Çizelge 5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5. Biyolojik Detoksifikasyonun Kullanıldığı Bazı Çalışmalar

Biyolojik Yöntem	Gıda Ürünü/ Mikotoksin	Özet	Referans
Laktik bakterileri	asit Sirke/Patulin	Patulinin analize tabi tutulan aerobik ortamdaki küf enjekte edilen sirkelerde ham değerleri sırası ile 7.gün ve 15.gün için 2567.55 µg/L ve 4493.13 µg/L olarak bulunmuştur. Laktik asit bakterisi takviyesi yapılan aerobik sirkelerde ise patulin tespit edilememiştir. Anaerobik ortamda muhafaza edilen sirkelerde patulin gelişmesine rastlanmamıştır. Laktik asit bakterisi <i>Leuconostoc mesenteroides</i> bakterisinin antifungal etkisi kanıtlanmış olup mikotoksinlerin detoksifikasyonun biyolojik detoksifikasyon yöntemlerinin kullanılabilceği kanıtlanmıştır.	Çetin, 2024
Laktik bakterileri maya	asit ve Frescal peyniri/AFM1	Minas Frescal peynirinde AFM1'i azaltmak için katkı maddesi olarak <i>Lactobacillus rhamnosus</i> , <i>Lactobacillus lactis</i> ve <i>Saccharomyces cerevisiae</i> 'nin kullanılması, genellikle 28 gün olan peynir raf ömrü üzerinde herhangi bir olumsuz etkiye sahip olmamıştır. AFM1'de 10. günün sonunda HPLC ile yapılan analizlerde %94 azalma görülmüştür.	Gonçalves ve diğerleri, 2020
Laktik bakterileri	asit Badem ezmesi/AFB1, AFG1	<i>Lactobacillus fermentum</i> ve <i>Lactobacillus delbrueckii subsp. lactis</i> bakterileri kullanılarak AFB1 ve AFG1 oranları tespit edilmiştir. Bakterilerin etki oranları sırasıyla %50, %58, %58, %70 oranlarında tespit edilmiştir. Sonuçlar, <i>L. delbrueckii subsp. lactis</i> 'in badem ezmesindeki AFB1 ve AFG1'in detoksifikasyonu için pratik ve etkili bir yöntem olarak kullanılabilceği sonucunu desteklemektedir.	Hashemi ve Amiri, 2020
Kefir kültüründen elde edilen suşlar	Süt/OTA, ZEA	En yüksek OTA bağlanma miktarları KFLM3 (%81), KFLY6 (%74) ve KFGY7 (%62) suşlarıyla elde edilmiştir. Ayrıca, KFLM3, KFLY1, KFLY3, KFLY5, KFGY1 ve KFLY6 olmak üzere altı suşun sütte bulunan ZEA'nın tamamını (100%) bağlayabildiği gözlemlenmiştir (<i>Lactobacillus kefir</i> KFLM3, <i>Kazachstania servazii</i> KFGY7). Çıkan sonuçlar, kefir tüketiminin bu mikotoksinlerin gastrointestinal emilimini azaltmaya ve dolayısıyla toksik etkilerini de azaltmaya yardımcı olabileceğini düşündürmektedir.	Taheur ve diğerleri, 2017

SONUÇ

Mikotoksin kontaminasyonu hem ham maddelerde hem de işlenmiş gıdalarda bir sorun olduğundan, üretim zincirinin farklı aşamalarında bunların oluşumunu en aza indirmeye yönelik

stratejiler büyük önem taşımaktadır. Hasat öncesi stratejiler, küf gelişimini engelleyerek mikotoksin oluşumunu önlemeye odaklanmakta ve iyi tarım uygulamalarını sürdürmeyi, dirençli ürün çeşitlerini seçmeyi içermektedir. Ancak,

mikotoksinler hasat sonrası kontamine olmuşsa azaltılması/uzaklaştırılması genellikle daha zor olmaktadır. Mikotoksinlerin bir kısmı endotoksin olarak misel içinde birikme özelliğine sahipken, çoğu mikotoksin miselden substrata doğru salgılanmaktadır. Bundan dolayı küf içeren besinlerden miseller uzaklaştırıldığında besinde mikotoksin tehlikesi ortadan kalkmamaktadır.

Gıda zincirinde mikotoksinlerin oluşumu, tüm dünyanın karşı karşıya olduğu endişe verici kaçınılmaz bir sorundur. Mikotoksin oluşumunun azaltılması için en iyi yöntemlerin çevre koşullarının yönetilmesi, iyi tarım ve üretim pratiklerinin uygulanması ve uygun muhafaza koşullarının sağlanması olduğu görülmektedir. Detoksifikasyon işlemleri içinse fiziksel, kimyasal ve biyolojik detoksifikasyon yöntemleri önerilmiştir.

Gıdalarda kullanılan fiziksel ve kimyasal detoksifikasyon yöntemleri yüksek maliyetin yanı sıra gıdaların duyuşsal özellikleri ve besin değerlerinde kayıplara neden olmaktadır. Bu nedenle gıdalarda bulunan mikotoksinlerin detoksifikasyonunda biyolojik yöntemler ön plana çıkmaktadır. Son yıllarda ise probiyotik bakterilerin detoksifikasyon etkisi, kullanımının avantajlı olmasından ve diğer yöntemlere göre zararlı etkileri olmadığından, ayrıca gıdalara da uygulanabilir olduğundan daha çok çalışılmaktadır. Bununla beraber çevre dostu ve etkili yöntemlerin giderek daha fazla talep görmesi eğilimi, araştırmaların bu yöne doğru kaydığını göstermektedir.

Mikotoksin kontaminasyonunun yaygın olması nedeniyle, gelecekteki stratejiler üretimden başlayarak gıdanın tüketiciye ulaşmasına kadar tüm gıda zinciri boyunca mantar kontaminasyonunu ve mikotoksin üretimini kontrol etme ihtiyacına odaklanmalıdır. Gıdada aynı anda oluşan mikotoksinlerin sinerjik toksik etkileri ve olası maskelenmiş mikotoksinlerin varlığı dikkate alınmalıdır. Fiziksel, kimyasal ve biyolojik dekontaminasyon yöntemlerinin güvenliği hakkında daha fazla araştırma yapılması gerekmekte ve dekontaminasyonu mümkün olan en üst düzeye çıkarmak için entegre bir

dekontaminasyon yaklaşımını birleştiren stratejiler geliştirilmelidir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemektedir.

YAZARLARIN KATKISI

Tüm yazarlar makalenin hazırlanması, yazımı ve yayınlanmasına katkıda bulunmuşlardır.

KAYNAKLAR

Abraham, N., Schroeter, K. L., Zhu, Y., Chan, J., Evans, N., Kimber, M. S., Seah, S. Y. (2022). Structure–function characterization of an aldo–keto reductase involved in detoxification of the mycotoxin, deoxynivalenol. *Scientific Reports*, 12(1), 14737. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19040-8>

Adeyeye, S.A.O. (2016). Fungal mycotoxins in foods: a review. *Cogent Food & Agriculture*, 2: 1213127. <http://dx.doi.org/10.1080/23311932.2016.1213127>

Afsah-Hejri, L., Hajeb, P., Ehsani, R.J. (2020). Application of ozone for degradation of mycotoxins in food: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 1-32. <http://dx.doi.org/10.1111/1541-4337.12594>

Akbulut, İ. (2023). Sultaniye cinsi kuru üzümde bulunan Okratoksin (OTA) detoksifikasyonunda soğuk plazma teknolojisinin kullanımı ve kalite özelliklerinin incelenmesi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, İzmir Türkiye, 150 s.

Alizadeh, A. M., Hashempour-Baltork, F., Khaneghah, A. M., Hosseini, H. (2021). New perspective approaches in controlling fungi and mycotoxins in food using emerging and green technologies. *Current Opinion in Food Science*, 39, 7-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cofs.2020.12.006>

Alnaemi, H. S., Dawood, T. N., Algwari, Q. T. (2025). Ultraviolet C and Ozone Application for Detoxification of Aflatoxin B1, Ochratoxin A, and Fumonisin B1 in Poultry Feeds. *Egyptian Journal of Veterinary Sciences*, 56(4), 797-813. <https://doi.org/10.21608/ejvs.2024.277904.193>

- Aloui, A., Salah-Abbès J.B., Zinedine, A., Riba, A., Durand, N., Meile, J.C., Montet, D., Catherine Brabet, C., Abbès, S. (2023). Prevention and detoxification of mycotoxins in human food and animal feed using bio-resources from south mediterranean countries: a critical review. *Critical Reviews in Toxicology*, 53(2), 117-130. <https://doi.org/10.1080/10408444.2023.2211178>
- Avsaroglu, M. D., Bozoglu, F., Alpas, H., Largeteau, A., & Demazeau, G. (2015). Use of pulsed-high hydrostatic pressure treatment to decrease patulin in apple juice. *High Pressure Research*, 35(2), 214-222. <https://doi.org/10.1080/08957959.2015.1027700>
- Awuchi, C.G., Nyakundi Ondari, E., Ogbonna, C.U., Upadhyay, A.K., Baran, K., Okpala, C.O.R., Korzeniowska, M., Raquel P. F. Guiné, R.P.F. (2021). Mycotoxins affecting animals, foods, humans, and plants: types, occurrence, toxicities, action mechanisms, prevention, and detoxification strategies a revisit. *Foods*, 10, 1279. <https://doi.org/10.3390/foods10061279>
- Babae, R., Karami-Osboo, R., Mirabolfathy, M. (2021). An overview of effective detoxification methods for aflatoxin-contaminated pistachio. *Pistachio and Health Journal*, 4(2), 75-93. <https://doi.org/10.22123/PHJ.2021.283744.1096>
- Bahari, HR., Khaneghah, AM., Ismail Eş, I. (2024). Upconversion nanoparticles-modified aptasensors for highly sensitivemycotoxin detection for food quality and safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(3). <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13369>
- Balwan, W.K., Neelam Saba, N., Kour, S. (2023). Study of impact of mycotoxins on the human health. *Scholars Bulletin*, 9(2), 19-23. <https://doi.org/10.36348/sb.2023.v09i02.003>
- Benzer Gürel, D. (2023). Atmosferik soğuk plazmanın yüksek ihracat kapasitesine sahip kuru incir ve kuru üzümdeki aflatoksinler ve okratoksin a üzerine etkisi. Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi, Manisa, Türkiye, 127s.
- Calado, T., Fernández-Cruz, M.L., Verde, S.C., Venâncio, A., Abrunhosa, L. (2018). Gamma irradiation effects on ochratoxin A: Degradation, cytotoxicity and application in food. *Food Chemistry*, 240, 463–471. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.136>
- Conte, G., Fontanelli, M., Galli, F., Cotrozzi, L., Pagni, L., Pellegrini, E. (2020). Mycotoxins in feed and food and the role of ozone in their detoxification and degradation: An update. *Toxins*, 12(8), 486. <https://doi.org/10.3390/toxins12080486>
- Çetin, Z. (2024). Sirkede penicillium expansum küfünün inaktivasyonu ve patulin degradasyonunda leuconostoc mesenteroides etkinliğinin incelenmesi. İstanbul Aydın Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul
- Daou, R., Joubrane, K., Maround, R., Khabbaz, L.R., Ali Ismail, A., André El Khoury, A.E. (2021). Mycotoxins: Factors influencing production and control strategies. *Agriculture and Food*, 6(1), 416–447. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2021025>
- Ding, L., Han, M., Wang, X., Yifei Guo, Y. (2023). Ochratoxin A: overview of prevention, removal, and detoxification methods. *Toxins*, 15, 565. <https://doi.org/10.3390/toxins15090565>
- Elkenany, R.M., Awad, A. (2020). Types of Mycotoxins and different approaches used for their detection in foodstuffs. *Mansoura Veterinary Medical Journal*, 21(4), 25-32. <https://doi.org/10.35943/mvmj.2021.161191>
- El-Sayed, R.A., Jebur, A.B., Kang, W., El-Demerdash, F.M. (2022). An overview on the major mycotoxins in food products: characteristics, toxicity, and analysis. *Journal of Future Foods*, 2(2), 91- 102. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2022.03.002> 2772-5669
- Guo, Y., Lihong Zhao, L., Ma, Q., Ji, C. (2021). Novel strategies for degradation of aflatoxins in food and feed: A review. *Food Research International*, 14,109878. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109878>

- Gonçalves, B. L., Muaz, K., Coppa, C. F. S. C., Rosim, R. E., Kamimura, E. S., Oliveira, C. A. F., Corassin, C. H. (2020). Aflatoxin M1 absorption by non-viable cells of lactic acid bacteria and *Saccharomyces cerevisiae* strains in Frescal cheese. *Food Research International*, 136, 109604. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109604>
- Janik, E., Niemcewicz, M., Ceremuga, M., Stela, M., Bijak, J.S., Siadkowski, A., Bijak, M. (2020). Molecular aspects of mycotoxins—a serious problem for human health. *International Journal of Molecular Sciences*, 21, 8187. <https://doi.org/10.3390/ijms21218187>
- Hashemi, S. M. B., & Amiri, M. J. (2020). A comparative adsorption study of aflatoxin B1 and aflatoxin G1 in almond butter fermented by *Lactobacillus fermentum* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *lactis*. *Lwt-Food Science and Technology*, 128, 109500. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109500>
- Hassanpour, M., Rezaie, M. R., & Baghizadeh, A. (2019). Practical analysis of aflatoxin M1 reduction in pasteurized Milk using low dose gamma irradiation. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 17, 863-872. <https://doi.org/10.1007/s40201-019-00403-9>
- Karlovsky, P., Suman, M., Berthiller, F., Meester, J., Eisenbrand, G., Perrin, I., Oswald, I.P., Speijers, G., Chiodini, A., Recker, T., Dussort, P. (2016). Impact of food processing and detoxification treatments on mycotoxin contamination. *Mycotoxin Research*, 32, 179–187. <https://doi.org/10.1007/s12550-016-0257-7>
- Khan, R., Anwar, F., Ghazali F.M. (2024). A comprehensive review of mycotoxins: Toxicology, detection, and effective mitigation approaches. *Helvion*, 10(8), e28361. <https://doi.org/10.1016/j.helivon.2024.e28361>
- Kurup, A. H., Patras, A., Pendyala, B., Vergne, M. J., & Bansode, R. R. (2022). Evaluation of Ultraviolet-Light (UV-A) Emitting Diodes Technology on the Reduction of Spiked Aflatoxin B 1 and Aflatoxin M 1 in Whole Milk. *Food and Bioprocess Technology*, 15, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02731-x>
- Lach, M., Kotarska, K. (2024). Negative Effects of Occurrence of Mycotoxins in Animal Feed and Biological Methods of Their Detoxification: A Review. *Molecules*, 29(19), 4563. <https://doi.org/10.3390/molecules29194563>
- Luo, Y., Zhou, Z., Yue, T. (2017). Synthesis and characterization of nontoxic chitosan-coated Fe₃O₄ particles for patulin adsorption in a juice-pH simulation aqueous. *Food Chemistry*, 221, 317-323. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.008>
- Mafe, A. N., Büsselberg, D. (2024). Mycotoxins in food: cancer risks and strategies for control. *Foods*, 13, 3502. <https://doi.org/10.3390/foods13213502>
- Mir, S.A., Dar, B.N., Shah, M.A. Sofi, S.A., Hamdani, A.M. Oliveira, C.A.F., Moosavi, M.H., Khaneghah, A.M., Sant'Ana, A.S. (2021). Application of new technologies in decontamination of mycotoxins in cereal grains: Challenges, and perspectives. *Food and Chemical Toxicology*, 148, 111976. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.111976>
- Mohammadi, H., Mazloomi, S. M., Eskandari, M. H., Aminlari, M., Niakousari, M. (2017). The effect of ozone on aflatoxin M1, oxidative stability, carotenoid content and the microbial count of milk. *Ozone: Science & Engineering*, 39(6), 447-453. <https://doi.org/10.1080/01919512.2017.1329647>
- Morshedi, A., Shakerardekani, A., Reza Karazhian, R., Mohammad Morshedi, M., Valdes, M.E., Mohammadi-Moghaddam, T., Kariminejad, M. (2023). Mycotoxins' contamination in food and feeds: a review. *Journal of Food Chemistry & Nanotechnology*, 9(3), 141-149. <https://doi.org/10.17756/jfcn.2023-160>
- Muaz, K., Riaz, M., Oliveira, C. A. F. D., Akhtar, S., Ali, S. W., Nadeem, H., Park, S., B. (2022). Aflatoxin M1 in milk and dairy products: Global occurrence and potential decontamination strategies. *Toxin Reviews*, 41(2), 588-605. <https://doi.org/10.1080/15569543.2021.1873387>
- Muhammad, B.J., Saari, N., Meor Hussin, A.S. (2020). Review on the biological detoxification of mycotoxins using lactic acid bacteria to enhance the sustainability of foods supply. *Molecules*, 25,

2655. <https://doi.org/10.3390/molecules25112655>
- Nagda, A., Meena, M. (2024). *Alternaria* mycotoxins in food and feed: Occurrence, biosynthesis, toxicity, analytical methods, control and detoxification strategies. *Food Control*, 158, 110211. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110211>
- Nesic, K., Habschied, K., Mastanjevic, K. (2021). Possibilities for the biological control of mycotoxins in food and feed. *Toxins*, 13, 198. <https://doi.org/10.3390/toxins13030198>
- Niedźwiedz, I., Waśko, A., Pawlat, J., Polak-Berecka, M. (2019). The state of research on antimicrobial activity of cold plasma. *Polish Journal of Microbiology*, 68(2), 153-164. <https://doi.org/10.33073/pjm-2019-028>
- Nguyen, T., Palmer, J., Loo, T., Shilton, A., Petcu, M., Newson, H. L., Flint, S. (2022). Investigation of UV light treatment (254 nm) on the reduction of aflatoxin M1 in skim milk and degradation products after treatment. *Food Chemistry*, 390, 133165. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133165>
- Omak, G., Özcan, T., Ersan, L. Y. (2016). Biyolojik detoksifikasyon ve probiyotikler. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 30(1), 157-168.
- Pallarés, N., Barba, F. J., Berrada, H., Tolosa, J., Ferrer, E. (2020). Pulsed electric fields (PEF) to mitigate emerging mycotoxins in juices and smoothies. *Applied Sciences*, 10(19), 6989. <https://doi.org/10.3390/app10196989>
- Peng, Z., Zhang, Y., Ai, Z., Ravi Pandiselvam, R., Jiale Guo, J., Anjineyulu Kothakota, A., Yanhong Liu, Y. (2023). Current physical techniques for the degradation of aflatoxins in food and feed: Safety evaluation methods, degradation mechanisms and products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22, 4030–4052. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13197>
- Petrovic, E., Cosic, J., Vrandecic, K., Godena, K.S. (2023). Occurrence of mycotoxins in food and beverages. *Journal of Central European Agriculture*, 24(1), 137-150. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.1.3704>
- Piotrowska, M. (2021). Microbiological decontamination of mycotoxins: opportunities and limitations. *Toxins*, 13, 819. <https://doi.org/10.3390/toxins13110819>
- Pleadin, J., Jadranka Frece, J., Ksenija Markov, K. (2019). Mycotoxins in food and feed. *Advances in Food and Nutrition Research*, 89, 297-345. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2019.02.007>
- Rao, W., Li, Y., Dhaliwal, H., Feng, M., Xiang, Q., Roopesh, M. S., Du, L. (2023). The application of cold plasma technology in low-moisture foods. *Food Engineering Reviews*, 15(1), 86-112. <https://doi.org/10.1007/s12393-022-09329-9>
- Rodríguez-Bencomo, J. J., Sanchis, V., Viñas, I., Martín-Belloso, O., Soliva-Fortuny, R. (2020). Formation of patulin-glutathione conjugates induced by pulsed light: A tentative strategy for patulin degradation in apple juices. *Food Chemistry*, 315, 126283. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126283>
- Ryu D., Bianchini, A., Bullerman, L.B. (2008). Effects of processing on mycotoxins. *Stewart Postharvest Review*, 6, 5. <https://doi.org/10.2212/spr.2008.6.5>
- Saghir, S. A., Bancroft, J. (2024). Molds and mycotoxins indoors I: Current issues and way forward. *Archives of Clinical Toxicology*, 7(1), 1-7. <https://doi.org/10.46439/toxicology.7.032>
- Schrenk, D., Bignami, M., Bodin, L., Chipman, J.K., Mazo, J., Grasl-Kraupp, B., Hoogenboom, L., Leblanc, J.C., Nebbia, C.S., Nielsen, E., Ntzani, E., Petersen, A., Sand, S., Schwerdtle, T., Vleminckx, C., Wallace, H., Rose, M., Cottrill, B., Lundebye, A.K., Metzler, M., Ben Whitty, B., Alberto Navarro-Villa, A. (2024). Guidance for the assessment of detoxification processes in feed. *EFSA Journal*, 22, e8528. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.8528>
- Silva, J.V.B., Oliveria, C.A.F., Ramalho, L.N.Z. (2022). An overview of mycotoxins, their pathogenic effects, foods where they are found and their diagnostic biomarkers. *Food Science and Technology*, 42 (6). <https://doi.org/10.1590/fst.48520>
- Sipos, P., Peles, F., Brassó, D.L., Béri, B., Pusztahelyi, T., Pócsi, I., Gyori, Z. (2021).

- Physical and chemical methods for reduction in aflatoxin content of feed and food. *Toxins*, 13, 204. <https://doi.org/10.3390/toxins13030204>
- Taheur, F. B., Fedhila, K., Chaieb, K., Kouidhi, B., Bakhrouf, A., & Abrunhosa, L. (2017). Adsorption of aflatoxin B1, zearalenone and ochratoxin A by microorganisms isolated from Kefir grains. *International Journal of Food Microbiology*, 251, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.03.021>.
- Torlak, E. (2019). Use of gaseous ozone for reduction of ochratoxin A and fungal populations on sultanas. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 25(1), 25-29. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12362>
- Viviane, I., Masabo, E., Joseph, H., Rene, M., Bizuru, E. (2021). Mycotoxin's Infections and Prevention Methods: State of the Art. *Agricultural Sciences*, 12,1269-1285. <https://doi.org/10.4236/as.2021.1211081>
- Zhao, L., Qi, D., Ma, Q. (2023). Novel strategies for the biodegradation and detoxification of mycotoxins in post-harvest grain. *Toxins*, 15, 445. <https://doi.org/10.3390/toxins15070445>
- Zhuang, K., Zhang, C., Zhang, W., Xu, W., Tao, Q., Wang, G., Ding, W. (2020). Effect of different ozone treatments on the degradation of deoxynivalenol and flour quality in Fusarium-contaminated wheat. *CyTA-Journal of Food*, 18(1), 776-784. <https://doi.org/10.1080/19476337.2020.1849406>
- Wang, Y., Shang, J., Cai, M., Liu, Y., Kai Yang, K. (2023). Detoxification of mycotoxins in agricultural products by non-thermal physical technologies: a review of the past five years. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63 (33), 11668–11678. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2095554>
- Wang, Y., Zhou, A., Yu, B., Sun, X. (2024). Recent advances in non-contact food decontamination technologies for removing mycotoxins and fungal contaminants. *Foods*, 13, 2244. <https://doi.org/10.3390/foods13142244>
- Woldemichael Woldemariam, H., Emire, S.A. (2019). High pressure processing of foods for microbial and mycotoxins control: current trends and future prospects. *Cogent Food & Agriculture*, 5(1), 1622184. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1622184>
- Xu, H., Wang, L., Sun, J., Wang, L., Guo, H., Ye, Y., Sun, X. (2022). Microbial detoxification of mycotoxins in food and feed. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(18), 4951-4969. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1879730>