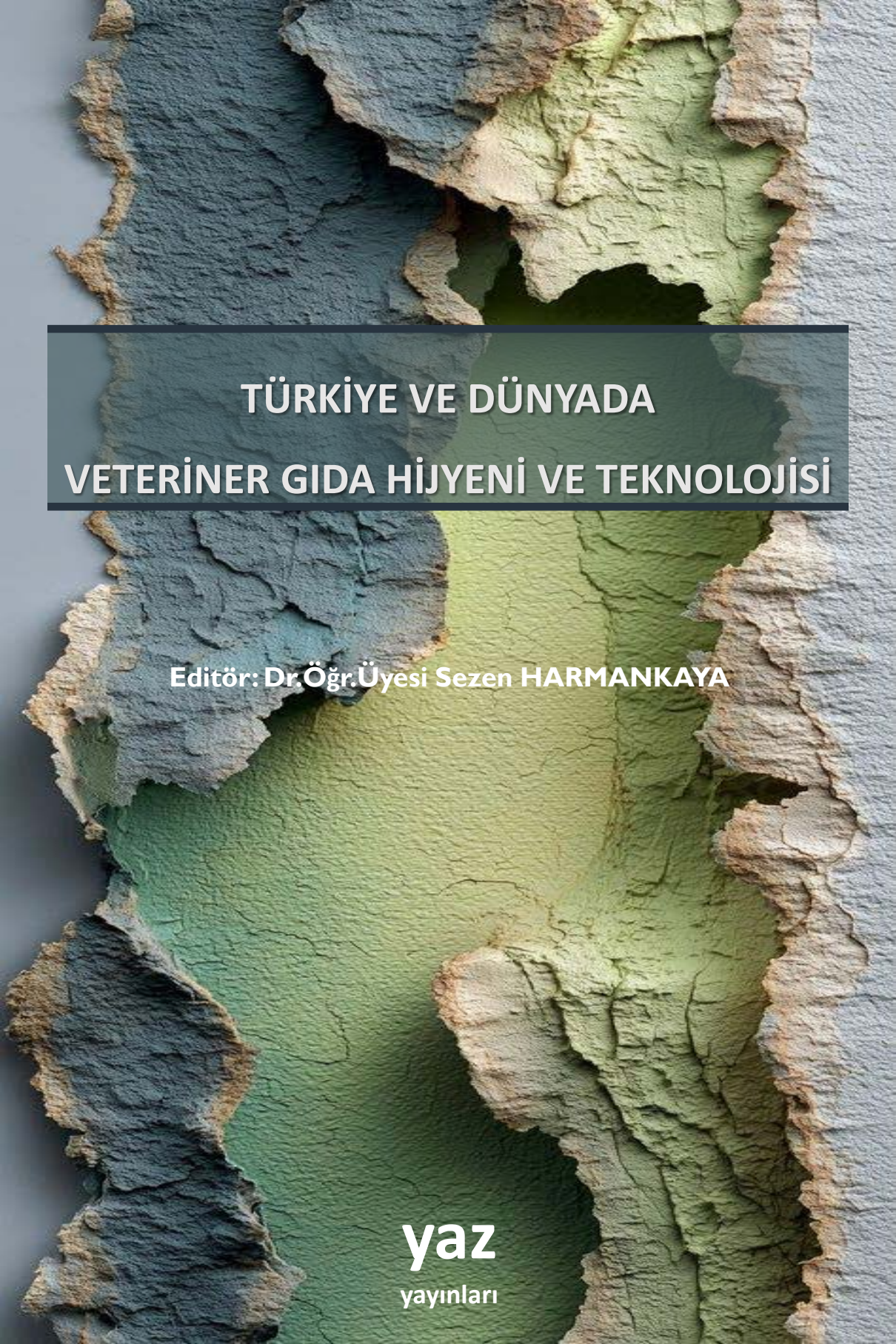




TÜRKİYE VE DÜNYADA VETERİNER GIDA HİJYENİ VE TEKNOLOJİSİ

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Sezen HARMANKAYA

yaz
yayınları

Türkiye ve Dünyada Veteriner Gıda Hijyeni ve Teknolojisi

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Sezen HARMANKAYA

yaz
yayınları

2025

Türkiye ve Dünyada Veteriner Gıda Hijyeni ve Teknolojisi

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Sezen HARMANKAYA

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8678-83-3

Aralık 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

The Importance of Aeromonas Species in Food Safety	1
<i>Başak Gökçe ÇÖL</i>	
The Multifaceted Use of Ultrasound in Food Technology and Molecular Gastronomy.....	30
<i>Başak Gökçe ÇÖL</i>	
Pestisitlerin Süt Ürünleri Oluşumu ve Kalitesine Etkileri: Kimyasal, Mikrobiyolojik ve Gıda Güvenliği Boyutları.....	49
<i>Sezen HARMANKAYA, Ahmet HARMANKAYA</i>	
Gıda Kaynaklı Bakteriyel, Viral ve Fungal Patojenlerin Tespiti ve Karakterizasyonu: Klasik Yöntemlerden Yeni Nesil Yaklaşımlara.....	68
<i>Yasin AKKEMİK, Kemal Kaan TEKİNŞEN</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

THE IMPORTANCE OF *AEROMONAS* SPECIES IN FOOD SAFETY

Başak Gökçe ÇÖL¹

1. INTRODUCTION

Food safety is crucial for long-term public health, necessitating the monitoring and control of microbial hazards throughout all stages of food production. Waterborne and foodborne pathogens continue to pose a significant global threat. Among them, the genus *Aeromonas* has drawn increasing scientific attention for its capacity to act as an opportunistic pathogen, sometimes causing severe illness (Beaz-Hidalgo & Figueras, 2013; Carusi, Kabuki, de Seixas Pereira, & Cabral, 2024; Fernández-Bravo & Figueras, 2020; Gonçalves Pessoa et al., 2019).

Members of this genus primarily inhabit aquatic environments, often found in freshwater, seawater, groundwater, wastewater, soil, and various food-processing settings (Carusi et al., 2024; Janda & Abbott, 2010). Their remarkable ecological flexibility allows them to persist in many habitats and to colonize various host organisms such as humans, companion animals, and aquatic species. This highlights their importance to the One Health perspective (Lamy, Baron, & Barraud, 2022). The wide range of phenotypic and genotypic differences observed in isolates from clinical, environmental, and animal sources further demonstrates the genus's ability to adapt to different ecosystems (Fernández-Bravo & Figueras, 2020).

¹ Department of Gastronomy and Culinary Arts, Faculty of Tourism, Dokuz Eylül University, İzmir, Türkiye. ORCID: 0000-0002-7627-9867.

Aeromonas species can contaminate various types of food, including fish, seafood, dairy products, meat, and fresh produce, posing a significant risk to consumer health (Cortes-Sanchez et al., 2019; Igbiosa, Igumbor, Aghdasi, Tom, & Okoh, 2012; Stratev, Vashin, & Rusev, 2012). The discovery of multidrug-resistant (MDR) strains in ready-to-eat seafood (Lee, Hoel, Lunestad, Lerfall, & Jakobsen, 2021) and other food products (Stratev & Odeyemi, 2016) suggests that these bacteria not only survive in natural waters but also persist through various stages of the food supply chain. Species that are important in clinical settings, *A. hydrophila*, *A. caviae*, and *A. veronii*, are linked to gastrointestinal infections, wound infections, septicemia, and meningitis (Fernández-Bravo & Figueras, 2020; Pessoa, Oliveira, Correia, Fontes, & Coelho, 2022). Severe clinical outcomes, including high death rates, particularly affect those with weakened immune systems; reports show that mortality in *Aeromonas*-related bacteremia ranged from 24% to 63% (Chuang et al., 2011; Janda & Abbott, 2010; Parker & Shaw, 2011).

Over recent years, a clear rise in antimicrobial resistance has been observed in this genus. Many isolates collected from natural environments and different food matrices exhibit pronounced resistance to β -lactams, tetracyclines, and aminoglycosides (Carusi et al., 2024; Harnisz & Korzeniewska, 2018). These findings highlight *Aeromonas*'s role as a reservoir of resistance genes and as a facilitator of gene transfer in water and food-related settings. This dual role positions *Aeromonas* species not only as emerging pathogens of concern in food safety programs but also as important contributors to the spread of antimicrobial resistance in the environment.

Given their ability to survive in the environment, potential to cause disease, patterns of antimicrobial resistance, and capacity to spread through water, food, and human contact, *Aeromonas* species have become increasingly relevant to food safety and

public health. Therefore, this chapter examines recent scientific findings concerning the taxonomy, pathogenic potential, virulence-associated factors, antimicrobial resistance traits, and the occurrence of *Aeromonas* species in foodborne settings. It also explores how these characteristics influence food safety practices and contribute to potential risks for human health.

2. CHARACTERISTICS OF AEROMONAS BACTERIA

2.1. Taxonomic Classification

The genus *Aeromonas*, which belongs to the family Aeromonadaceae, was first identified with the description of *A. hydrophila* in 1891. Progress in molecular biology has changed the taxonomy of the genus. In 1986, it was officially classified as a separate family, *Aeromonadaceae*, based on findings from 16S and 5S rRNA analyses and DNA hybridisation studies (Fernández-Bravo & Figueras, 2020). To date, over 30 *Aeromonas* species have been identified. Approximately two-thirds of these have been associated with opportunistic infections in humans and animals.

Identifying species using traditional phenotypic tests is challenging because of the significant genetic diversity within the genus. As a result, molecular techniques such as 16S rRNA sequencing and analyses of housekeeping genes (e.g., *gyrB*, *rpoD*, *dnaJ*) have become increasingly important. However, studies focusing on single genes often lack sufficient distinguishing power (Fernández-Bravo & Figueras, 2020; Janda & Abbott, 2010; Soler et al., 2004; Yáñez, Catalán, Apráiz, Figueras, & Martínez-Murcia, 2003). For more accurate classification, genomic methods, including multilocus phylogenetic analysis (MLPA) and average nucleotide identity (ANI), are increasingly preferred (Colston et al., 2014; Martinez-

Murcia et al., 2011; Navarro & Martínez-Murcia, 2018; Richter & Rosselló-Móra, 2009). Whole-genome sequencing (WGS) combined with ANI, using a threshold of $\geq 96\%$ identity to define species boundaries, currently provides the the most robust method for resolving taxonomic relationships. Still, practical challenges limit its routine application.

MALDI-TOF MS is widely used in clinical and food labs because it is fast and simple. However, its dependence on phenotypic markers can lead to the misidentification of closely related species, especially when distinguishing between *A. dhakensis* and *A. hydrophila* (Bartie & Desbois, 2024; Chen, Lamy, & Ko, 2016). Recent studies recognise *A. dhakensis* as a separate and highly virulent species. Many infections previously attributed to *A. hydrophila* have been reclassified due to advancements in genomic methods. MLST and analyses of genes like *rpoD* and *gyrB* support its designation as a taxonomically independent species (Chen et al., 2016). WGS studies have also shown significant differences in virulence and resistance genes between the two organisms (Truong et al., 2024). These findings highlight the critical role of genomic methods in achieving accurate species identification. Although MALDI-TOF has certain limitations, it serves as a practical preliminary tool, whereas WGS-ANI currently provides the most reliable taxonomic resolution (Recio et al., 2024; Vieira et al., 2025).

2.2. Morphological Characteristics

Species in the genus *Aeromonas* are Gram-negative, rod-shaped, facultatively anaerobic bacteria that do not form spores and show positivity for both oxidase and catalase. They are found widely in nature, particularly in water and soil. Most motile strains have a single polar flagellum, but some species can develop peritrichous or lateral flagella when grown on solid media. Cell size usually ranges from 0.3 to 1.0 μm in width and

1.0 to 3.5 µm in length. These bacteria ferment glucose and are typically indole-positive. They grow best between 22 °C and 37 °C, but some psychrotrophic species can thrive at temperatures as low as 0 °C and as high as 45 °C. This ability to tolerate cold is important for their survival in chilled foods (Daskalov, 2006; Isonhood & Drake, 2002; Palamae et al., 2025; Praveen, Debnath, Shekhar, Dalai, & Ganguly, 2016).

2.3. Ecological Distribution and Adaptability

Aeromonas species are widely distributed in various ecosystems, including freshwater, marine water, sewage, soil, and food processing environments (Fernández-Bravo & Figueras, 2020; Gonçalves Pessoa et al., 2019; Yassen, EL-Naenaeey, Omar, & Tartor, 2021). These bacteria, exhibiting both saprophytic and pathogenic properties have the capacity to survive for long periods in diverse environments (Berney, Greening, Conrad, Jacobs, & Cook, 2014). The high frequency of *A. hydrophila*, *A. caviae*, and *A. veronii* species reported in environmental and clinical samples demonstrates their strong adaptability (Bhowmick & Bhattacharjee, 2018; Carusi et al., 2024; Fernández-Bravo & Figueras, 2020).

Their environmental resistance is associated with biofilm formation and the transmission of antimicrobial resistance genes. These bacteria can persist for long periods by forming biofilms in low-nutrient environments, chlorinated water systems, and on food processing surfaces (Carusi et al., 2024). Biofilm protects cells from disinfectants and facilitates the transfer of genes, thereby mediating the spread of resistance genes. *Aeromonas* species can also share resistance genes with microorganisms in the environment via plasmids, thus increasing their adaptability through horizontal gene transfer in the aquatic food ecosystem. This characteristic has led the bacterium to be considered not only an environmental microorganism but also a reservoir of

antimicrobial resistance (Pessoa et al., 2022; Selim, Harun-Ur-Rashid, Jahan, & Mohammed Elamir, 2025).

2.4. Pathogenicity and Virulence Characteristics of *Aeromonas* Species

The ability of *Aeromonas* species to cause disease involves multiple factors and several mechanisms. Adhesion to host tissues, movement, toxin production, secretion system activity, and various hydrolytic enzymes all play key roles in disease development (Citterio & Francesca, 2015; Fernández-Bravo & Figueras, 2020). These microorganisms act as opportunistic pathogens that can infect both humans and animals. Research shows that *Aeromonas* can cause disease with even low infectious doses, and infections may not always exhibit symptoms. For this reason, the genus is recognized as a true enteropathogen. The severity of illnesses linked to *Aeromonas* is comparable to that of other major intestinal pathogens, such as *Campylobacter spp.* and *Salmonella spp.* (Cui, Fang, Huang, Dong, & Wang, 2017; Janda & Abbott, 2010; Pessoa et al., 2022; Teunis & Figueras, 2016).

These bacteria cause many kinds of infections. They can avoid the host's defense systems, stick to host tissues, and release different toxins. (Fernández-Bravo & Figueras, 2020; Pessoa et al., 2022). Current literature reports that *A. hydrophila*, *A. veronii* biotype *sobria*, *A. caviae*, and *A. dhakensis* are the most common species causing disease in humans (Fernández-Bravo & Figueras, 2020; Janda & Abbott, 2010; Qu & Liu, 2024). While *A. hydrophila* is considered a well-defined pathogen, the pathogenicity of *A. caviae* and *A. sobria* remains under investigation. *A. sobria* is a microorganism that overlaps with other infection patterns and can complicate the clinical course, and it has the capacity to cause gastrointestinal pathology in humans (Hoel, Vadstein, & Jakobsen, 2017). Transmission of

Aeromonas spp. infections mainly occur through contaminated water and food (Figueras & Beaz-Hidalgo, 2015). These microorganisms are often found in fish, shellfish, meat, milk, vegetables, and ready-to-eat (RTE) products. This makes them a serious concern for food safety at home and in the food industry. Foodborne infections caused by *Aeromonas* typically present with abdominal pain or cramping, diarrhea (which may be bloody), nausea, vomiting, and, in some cases, fever. The incubation period lasts from 12 hours to 7 days, with symptoms commonly appearing within the first 24 to 48 hours (Fernández-Bravo & Figueras, 2020; Figueras & Beaz-Hidalgo, 2015; Miyagi, Hirai, & Sano, 2016; Nuwamanya et al., 2025). Risk factors for foodborne illness include poor hygiene practices, improper cooking, unsuitable storage conditions, and low consumer awareness (Fernández-Bravo & Figueras, 2020; Figueras & Beaz-Hidalgo, 2015). Seafood and fresh vegetables, especially those consumed raw, are considered high-risk food categories for *Aeromonas* contamination (Hoel et al., 2017).

The pathogenicity of *Aeromonas* species is quite complex and is shaped by two main mechanisms:

- (1) the production of various exotoxins and hydrolytic enzymes that cause damage to host cells, and
- (2) structural components that facilitate the bacterium's adhesion to the host cell surface, colonization, and invasion.

Gastrointestinal pathology arises when these bacteria anchor to epithelial cells, breach cellular barriers, and secrete toxin-mediated virulence factors. Specifically, *A. hydrophila*, *A. veronii*, and *A. caviae* are the main species associated with clinical conditions such as gastroenteritis, soft-tissue infections, sepsis, and meningitis in humans (Fernández-Bravo & Figueras, 2020; Pessoa et al., 2022). The ability of *Aeromonas* species to

cause disease depends of these toxins into host cells. So far, researchers have identified five secretion systems in this genus: Type I (T1SS), Type II (T2SS), Type III (T3SS), Type IV (T4SS), and Type VI (T6SS). Extensive investigations in *A. hydrophila* have clarified the operation of these systems, which play a pivotal role in shaping host–pathogen interactions. However, we still do not fully understand their exact impact on disease outcomes (Pintor-Cora et al., 2023). Evidence from studies on shellfish shows that these virulence factors are widespread. For instance, in a study of hard-shell mussels (*Mytilus coruscus*), researchers isolated several *Aeromonas* species, including *A. salmonicida*, *A. veronii*, *A. enteropelogenes*, *A. caviae*, *A. allosaccharophila*, and *A. bivalvium*. This result underscores the considerable genetic and phenotypic variation among strains recovered from aquatic food sources and their potential relevance to food safety. Their findings indicated that the isolates frequently carried numerous virulence-associated markers spanning motility genes, aerolysin and hemolysin components, proteases, lipases, and several cytotoxic or enterotoxic gene clusters (Hossain, Wickramanayake, Dahanayake, & Heo, 2020). Similarly, it has been reported that *A. hydrophila*, *A. veronii*, *A. caviae*, and *A. enteropelogenes* strains isolated from Pacific white-legged shrimp showed high levels of DNase, protease, gelatinase, and lipase activities (De Silva, Hossain, Dahanayake, & Heo, 2018). These enzymes cause protein and lipid degradation in both host tissues and food, increasing the bacteria's pathogenicity and the risk of food spoilage.

3. AEROMONAS SPECIES IN VARIOUS FOODS

The widespread presence of *Aeromonas* species in various food products is considered a significant indicator of both their environmental distribution and potential foodborne

contamination risks. In general, levels of motile mesophilic *Aeromonas* species in foods have been reported to range between 10^2 and 10^5 cfu/g (Neyts, Huys, Uyttendaele, Swings, & Debevere, 2000). Findings reported by Stratev et al. (2012), indicate that *Aeromonas* contamination is particularly high in meat, dairy products, vegetables, and ready-to-eat foods, especially fish and seafood. Fish and seafood are among the most important sources of these bacteria. *A. hydrophila*, *A. caviae*, and *A. veronii biovar sobria* species are frequently encountered in freshwater fish. For example, *A. hydrophila* was detected at a rate of 36.1%, *A. sobria* at 35.7%, and *A. caviae* at 10.9% in catfish fillets (Wang & Silva, 1999). Similarly, among the group of isolates obtained from freshwater fish, the predominant species detected were *A. hydrophila* and *A. caviae* (Erdem, Kariptaş, & Kaya, 2010). The analysis of marine fish revealed that *A. veronii biovar sobria* was the most prevalent species, whereas *A. hydrophila* and *A. caviae* were present in slightly smaller but still considerable proportions (Yucel, Aslim, & Beyatli, 2005). The occurrence of positive samples in sea fish fillets has been documented at approximately 62% (Herrera, Santos, Otero, & García-López, 2006). It has also been reported that species such as *A. salmonicida* (67.5%) and *A. bestiarum* (20.8%) are predominant in frozen tilapia samples (Castro-Escarpulli et al., 2003).

Current data confirm the high prevalence of *Aeromonas* in ready-to-eat seafood: *A. hydrophila* was reported in 57.1% of chilled oysters, 49.1% of sea bass sashimi, and 51.4% of salmon sushi (Park, Kim, Choi, & Rhee, 2021). These values indicate a significant public health risk, particularly in raw seafood products.

Aeromonas contamination is also noteworthy in meat and meat products. The detection of 66 strains of *A. hydrophila* in raw meat indicates the prevalence of this species throughout the

processing chain (Handfield, Simard, Couillard, & Letarte, 1996). Positivity rates of 12.3% and 6.5% were reported in buffalo and sheep meat, respectively; some studies have indicated that 14% of frozen beef was positive (Osman, Aly, Kheader, & Mabrok, 2012). *A. hydrophila* was isolated from 53.75% of packaged turkey meat (Koca & Sarimehmetoğlu, 2009). In a study conducted by Castro-Escarpulli et al. (2003), *Aeromonas* positivity was detected in 47.17% of raw chicken samples. This result indicates a high risk of contamination, particularly in poultry meat. Ghenghesh, Ahmed, El-Khalek, Al-Gendy, & Klena, (2008) emphasize that the presence of *Aeromonas* in meat products is mostly associated with waterborne contamination, improper cleaning practices, and inadequate hygiene management. *Aeromonas species* have also been reported to be commonly detected in milk and dairy products; this indicates that the bacterium can persist throughout both animal-derived production stages and the processed food chain. In raw cow's milk, *A. hydrophila* has been detected at frequencies varying between roughly 17% and 48% (Subashkumar, Thayumanavan, Vivekanandhan, Savithamani, & Lakshmanaperumalsamy, 2006; Nihal Yucel & Çitak, 2003). It has also been noted that species such as *A. caviae* and *A. sobria* can be found at levels of 10^2 – 10^3 cfu/ml (Melas, Papageorgiou, & Mantis, 1999; Yadav & Kumar, 2000). On the other hand, some studies have reported that *Aeromonas* was not detected in pasteurized milk samples, suggesting that the heat treatment applied significantly inactivated the bacteria

Contamination rates in RTE foods are also a cause for concern. It has been reported that 48% of *A. hydrophila* strains isolated from RTE products are haemolytic and 92% are cytotoxins (Handfield et al., 1996). *Aeromonas* positivity in ready-to-eat vegetable salads reaches up to 61.5% (Xanthopoulos, Tzanetakis, & Litopoulou-Tzanetaki, 2010). All caviar samples

were found to be *Aeromonas* positive (Hänninen, Oivanen, & Hirvelä-Koski, 1997). The positivity rate in RTE sandwiches packaged in a modified atmosphere was found to be 3.7% (Camellini, Iseppi, Condò, & Messi, 2021).

Furthermore, some *Aeromonas* species can survive even in cold storage conditions of certain foods. They can grow to a limited degree at low temperatures (Hoel, Vadstein, & Jakobsen, 2019). Additionally, *Aeromonas* species not only stay viable in various foods stored at refrigerator temperatures between -2 and 10 °C, but they can also produce certain virulence factors under these conditions (Castro-Escarpulli et al., 2003). However, *Aeromonas* species are sensitive to heat and can be effectively killed by using proper pasteurization processes at 70 °C in meat products (Feiner, 2006).

4. ANTIMICROBIAL RESISTANCE IN FOODBORNE AEROMONAS: MECHANISMS, GENE PROFILES, AND FOOD SAFETY IMPLICATIONS

The rise in antimicrobial resistance among *Aeromonas* species represents an important concern for food safety and public health. Multiple investigations have shown that these organisms now frequently display reduced susceptibility to β -lactams, tetracyclines, aminoglycosides, and fluoroquinolones (Carusi et al., 2024; Teodoro, Carvalho, Queiroz, Levy, & Kabuki, 2022). The fact that most resistance genes identified in food-borne strains are located on mobile genetic elements, such as plasmids, integrons, and transposons, facilitates the easy spread of these genes in the environment and throughout the food chain.

Lee et al. (2023) identified various resistance markers in different *Aeromonas* isolates; showing that markers such as β -lactamases (*cphA*, *blaOXA*), quinolone resistance genes (*qnrS2*),

and sulfonamide/aminoglycoside resistance genes (*sul1*, *aadA1*) are particularly associated with plasmids and class 1 integrons in *A. rivipollensis* and *A. caviae* strains. This indicates that the aforementioned resistance genes can spread rapidly between species and in environmental settings via horizontal gene transfer.

High resistance rates to ampicillin, ceftazidime, and cefotaxime have also been reported in *A. hydrophila* isolates a weak but significant link has been identified between β -lactam resistance and virulence genes, such as *aerA*, *hlyA*, and *ast*. (Ramadan, Ibrahim, Samir, Abd El-Moaty, & Gad, 2018).

The inappropriate and excessive use of antibiotics in food-producing animal systems significantly accelerates the emergence and spread of antimicrobial resistance. It is known that antibiotics are mainly used for prophylactic purposes in livestock activities, including aquaculture; however, most of these prophylactic uses can be eliminated without adversely affecting animal health or production efficiency through good hygiene practices (Cabello, 2004). These findings point to the necessity of limiting antimicrobial use within food systems and improving hygiene-focused control practices.

4.1. Antimicrobial Resistance Mechanisms

Antimicrobial resistance in *Aeromonas* species comes from both inherent and gained mechanisms. However, these mechanisms differ significantly among species and especially among individual isolates. As a result, they are not found in all *Aeromonas* strains. The primary resistance mechanisms noted in some isolates are listed below.

- 1. Hydrolysis of β -lactam antibiotics:**
Natural β -lactamase production is largely mediated by AmpC cephalosporinases and carbapenemases such as blaCphA. AmpC enzymes confer resistance to

cephalosporins, while CphA provides specific resistance to carbapenems (Carusi et al., 2024).

2. Antibiotic Efflux and Limitation of Membrane Passage:

Efflux systems actively expel antibiotics from the cell, decreasing the effectiveness of fluoroquinolones and tetracyclines. Concurrently, alterations in outer membrane porins limit the entry of antibiotics (Teodoro et al., 2022).

3. Target site modifications:

Quinolone resistance comes from mutations in the *gyrA* and *parC* genes. Sulfonamide resistance is associated with alterations in folate synthesis enzymes or the acquisition of *sul1* or *sul2* genes (Lee et al., 2023)

4. Acquisition of resistance via mobile genetic elements:

Aeromonas strains transfer resistance genes to other bacteria through plasmids, transposons, and integrons. Notably, the class 1 integron *int1* plays a central role in mobilizing *sul1* and *aadA1* resistance genes (Carusi et al., 2024).

Taken together, the multidrug-resistant nature of numerous *Aeromonas* isolates reflects a combination of inherent resistance traits and additional genes obtained through horizontal transfer. These features enable the genus to act as a notable reservoir and vector for antimicrobial resistance across food systems.

4.2. Antimicrobial Resistance and Virulence Gene Profiles in Foodborne *Aeromonas* Species

Foodborne *Aeromonas* species display considerable variability in their virulence genes and antimicrobial resistance patterns. Recent studies, summarized in Table 1, show that

isolates from diverse food sources commonly harbor multiple virulence markers and demonstrate rising multidrug resistance.

Table 1. Antimicrobial Resistance and Virulence Gene Profiles of Foodborne *Aeromonas* Species Reported in the Literature

Reference	Food Type	<i>Aeromonas</i> Species	Virulence Genes	Antimicrobial Resistance Profile	Key Findings
Elbehiry et al. (2019)	Chicken meat and water	<i>A. hydrophila</i> <i>A. caviae</i> , <i>A. sobria</i>	—	95.46% ampicillin 50% cefotaxime 45.45% fluoroquinolones	100% identification via MALDI-TOF MS; widespread β -lactam and quinolone resistance.
Hossain et al. (2020)	Mussels	<i>A. salmonicida</i> <i>A. veronii</i> <i>A. enteropelogenes</i> <i>A. caviae</i> , <i>A. allosaccharophila</i> <i>A. bivalvium</i>	<i>Fla</i> , <i>aer</i> , <i>hlyA</i> , <i>ahyB</i> , <i>gcaT</i> , <i>ser</i> , <i>lip</i> , <i>alt</i> , <i>ast</i> , <i>act</i>	100% MDR MARI 0.11–0.44	High prevalence of virulent and MDR strains in mussels.
Lee et al. (2021)	RTE seafood	<i>A. media</i> <i>A. salmonicida</i> <i>A. bestiarum</i>	<i>alt</i> , <i>hlyA</i> <i>aerA</i> , <i>act</i>	100% ampicillin 98% MDR	MDR strains isolated from RTE seafood.
Hoel et al. (2017)	Fresh retail sushi	<i>A. salmonicida</i> <i>A. bestiarum</i> <i>A. dhakensis</i> <i>A. caviae</i> <i>A. media</i> <i>A. hydrophila</i> <i>A. piscicola</i>	<i>hlyA</i> , <i>aerA</i> , <i>act</i> , <i>alt</i> , <i>ast</i>	—	Dominant combination of <i>act/alt/hlyA/aerA</i> (63%); high hemolysis rate (91%); significant public health risk.
Park et al. (2021)	Seafood, RTE sushi	<i>A. hydrophila</i>	<i>aer</i> , <i>ast</i> , <i>alt</i>	—	High prevalence in raw oysters and sushi (57.1%), with higher rates in summer.
Qu et al. (2022)	Fish shrimp clams pigs chickens cows sheep	<i>A. veronii</i> <i>A. caviae</i> <i>A. dhakensis</i> <i>A. salmonicida</i> <i>A. bivalvium</i> <i>A. jandaei</i> <i>A. media</i> <i>A. hydrophila</i>	Most common: <i>act</i> , <i>fla</i> , <i>aexT</i> , <i>ascV</i>	<i>tetE</i> , <i>blaTEM</i> , <i>tetA</i> , <i>qnrS</i> , <i>aac(6)-Ib</i> , <i>mcr-1</i> , <i>mcr-3</i> MDR rate: 11.4%; 93.7% resistant to cefazolin	<i>A. dhakensis</i> and <i>A. hydrophila</i> were most virulent
Ramadan et al. (2018)	Mullet	<i>A. hydrophila</i>	<i>aerA</i> , <i>hlyA</i> , <i>ast</i> , <i>blaTEM</i>	100% cefoxitin 84% ampicillin 56% ceftazidime 40% cefotaxime	Positive correlation between virulence and β -lactamase genes (R = 0.3).

4.3. Dissemination of Antimicrobial Resistance Through the Food Chain and Public Health Risks

Antimicrobial resistance (AMR) is recognized as one of the most critical global issues today, affecting both public health and food safety. Foodborne bacteria present a dual threat. They can directly cause disease and spread resistance genes throughout the environment and food chain.

The presence of *Aeromonas* species in fish, shellfish, vegetables, and other foods exposed to contaminated water indicates poor hygiene and sanitation practices during production and processing (Cortes-Sanchez et al., 2019; Lanzarin, Winter, Ritter, & Cabral, 2024; Sheng & Wang, 2021). Thus, *Aeromonas* spp. function as important reference organisms in determining both water quality status and the adequacy of food safety management practices.

Genomic studies have shown that *Aeromonas* isolates carry many antimicrobial resistance genes, including β -lactamase (*bla*TEM, *bla*OXA, *bla*CphA), tetracycline (*tet*A, *tet*E), sulfonamide (*sul*1), and quinolone (*qnr*S2) genes (Carusi et al., 2024; Lee et al., 2023; Pintor-Cora et al., 2023; Teodoro et al., 2022). Many of these genes are found on mobile genetic elements, like plasmids, transposons, and integrons. This allows for easy horizontal gene transfer between species in aquatic and food-related environments.

The wide rate of β -lactamase genes in *Aeromonas* strains from RTE seafood raises serious concerns. It increases the chance of resistance genes spreading within the food chain. Additionally, genes such as *qnr*S2, *sul*1, and *aad*A1 are often linked with integrons (*int*I1) and transposons (Tn521). This suggests that seafood and aquatic settings may serve as reservoirs for these mobile resistance genes (Lee et al., 2023).

Beyond antibiotic resistance genes (ARGs), genomic evidence shows that *Aeromonas* species also possess several virulence genes, including *aerA*, *hlyA*, *alt*, *ast*, and *act*. This phenomenon, known as the “co-occurrence of resistance and virulence,” enhances both environmental durability and disease-causing ability (Hoel et al., 2017; Pintor-Cora et al., 2023). *Aeromonas* species have been recovered from a wide range of food and environmental sources including water, aquatic animals, milk, and various RTE items consumed without heating and many strains now display elevated resistance to β -lactams, tetracyclines, aminoglycosides, and quinolones. The recovery of *Aeromonas* from raw or partially cooked seafood reflects the possibility of contamination at various nodes of the seafood supply chain, ranging from pre-harvest operations to end-user handling. Therefore, *Aeromonas* spp. should be seen not only as environmental microbes but also as zoonotic pathogens that can spread resistance genes through the food chain (Lee et al., 2021).

Within food safety management systems particularly HACCP and ISO 22000 systematic tracking of *Aeromonas* is a key component for mitigating contamination risks and restricting the propagation of resistance determinants. Their environmental robustness, array of virulence factors, and multidrug-resistant nature underscore their relevance in such assessments.

5. CONCLUSION

Aeromonas species are widely distributed in natural environments and are capable of causing opportunistic infections under suitable conditions. Their persistence across various stages of the water and food chain heightens the likelihood of human exposure. Owing to their broad range of virulence attributes and strong tolerance to environmental stressors, these organisms can remain viable for extended periods within the interconnected

water–food–human continuum. The studies summarized in Table 1 demonstrate that the *A. hydrophila*, *A. caviae*, *A. veronii*, and *A. dhakensis* species, in particular, can simultaneously carry multiple virulence and antimicrobial resistance genes. The role of secretion systems such as T2SS and T6SS in toxin transfer, the ability to form biofilms, and gene transfer via plasmid–integron structures are key factors that enhance these bacteria’s ability to withstand environmental stresses and to initiate disease.

These findings indicate that *Aeromonas* species should be regarded as naturally occurring microorganisms that can also act as major risk factors, requiring close monitoring in terms of food safety, antimicrobial resistance, and public health. Reducing contamination from water and aquatic products, strengthening biofilm control strategies, promoting effective hygiene practices, and regularly monitoring resistance genes are of great importance for the safe management of the food chain.

REFERENCES

- Bartie, K. L., & Desbois, A. P. (2024). *Aeromonas dhakensis*: A Zoonotic Bacterium of Increasing Importance in Aquaculture. *Pathogens*, 13(6), 465. doi: 10.3390/pathogens13060465
- Beaz-Hidalgo, R., & Figueras, M. J. (2013). *Aeromonas* spp. Whole genomes and virulence factors implicated in fish disease. *Journal of Fish Diseases*, 36(4), 371–388. doi: 10.1111/jfd.12025
- Berney, M., Greening, C., Conrad, R., Jacobs, W. R., & Cook, G. M. (2014). An obligately aerobic soil bacterium activates fermentative hydrogen production to survive reductive stress during hypoxia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(31), 11479–11484. doi: 10.1073/pnas.1407034111
- Bhowmick, U. D., & Bhattacharjee, S. (2018). Bacteriological, Clinical and Virulence Aspects of *Aeromonas*-associated Diseases in Humans. *Polish Journal of Microbiology*, 67(2), 137–149. doi: 10.21307/pjm-2018-020
- Cabello, F. C. (2004). [Antibiotics and aquaculture in Chile: Implications for human and animal health]. *Revista Medica De Chile*, 132(8), 1001–1006. doi: 10.4067/s0034-98872004000800014
- Camellini, S., Iseppi, R., Condò, C., & Messi, P. (2021). Ready-to-Eat Sandwiches as Source of Pathogens Endowed with Antibiotic Resistance and Other Virulence Factors. *Applied Sciences*, 11(16), 7177. doi: 10.3390/app11167177
- Carusi, J., Kabuki, D. Y., de Seixas Pereira, P. M., & Cabral, L. (2024). *Aeromonas* spp. In drinking water and food: Occurrence, virulence potential and antimicrobial

- resistance. *Food Research International*, 175, 113710. doi: 10.1016/j.foodres.2023.113710
- Castro-Escarpulli, G., Figueras, M. J., Aguilera-Arreola, G., Soler, L., Fernández-Rendón, E., Aparicio, G. O., ... Chacón, M. R. (2003). Characterisation of *Aeromonas* spp. Isolated from frozen fish intended for human consumption in Mexico. *International Journal of Food Microbiology*, 84(1), 41–49. doi: 10.1016/s0168-1605(02)00393-8
- Chen, P.-L., Lamy, B., & Ko, W.-C. (2016). *Aeromonas dhakensis*, an Increasingly Recognized Human Pathogen. *Frontiers in Microbiology*, 7. doi: 10.3389/fmicb.2016.00793
- Chuang, H.-C., Ho, Y.-H., Lay, C.-J., Wang, L.-S., Tsai, Y.-S., & Tsai, C.-C. (2011). Different clinical characteristics among *Aeromonas hydrophila*, *Aeromonas veronii* biovar *sobria* and *Aeromonas caviae* monomicrobial bacteremia. *Journal of Korean Medical Science*, 26(11), 1415–1420. doi: 10.3346/jkms.2011.26.11.1415
- Citterio, B., & Francesca, B. (2015). *Aeromonas hydrophila* virulence. *Virulence*, 6(5), 417–418. doi: 10.1080/21505594.2015.1058479
- Colston, S. M., Fullmer, M. S., Beka, L., Lamy, B., Gogarten, J. P., & Graf, J. (2014, November). Bioinformatic Genome Comparisons for Taxonomic and Phylogenetic Assignments Using *Aeromonas* as a Test Case | mBio. Retrieved November 25, 2025, from <https://journals.asm.org/doi/10.1128/mbio.02136-14>
- Cortes-Sanchez, A. D. J., Espinosa-Chaurand, L. D., Garza-Torres, R., Diaz-Ramirez, M., Salgado-Cruz, M. D. L. P., SÃ¡nchez-Minutii, L., & GarcÃ-a-Barrientos, R. (2019).

- Foodborne diseases, fish and the case of *Aeromonas* spp. *African Journal of Agricultural Research*, 14(11), 617–628. doi: 10.5897/AJAR2019.13872
- Cui, Q., Fang, T., Huang, Y., Dong, P., & Wang, H. (2017). Evaluation of bacterial pathogen diversity, abundance and health risks in urban recreational water by amplicon next-generation sequencing and quantitative PCR. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 57, 137–149. doi: 10.1016/j.jes.2016.11.008
- Daskalov, H. (2006). The importance of *Aeromonas hydrophila* in food safety. *Food Control*, 17(6), 474–483. doi: 10.1016/j.foodcont.2005.02.009
- De Silva, B. C. J., Hossain, S., Dahanayake, P. S., & Heo, G.-J. (2018). Frozen White-Leg Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in Korean Markets as a Source of *Aeromonas* spp. Harboring Antibiotic and Heavy Metal Resistance Genes. *Microbial Drug Resistance*, 24(10), 1587–1598. doi: 10.1089/mdr.2018.0035
- Elbehiry, A., Marzouk, E., Abdeen, E., Al-Dubaib, M., Alsayeqh, A., Ibrahim, M., ... Hemeg, H. A. (2019). Proteomic characterization and discrimination of *Aeromonas* species recovered from meat and water samples with a spotlight on the antimicrobial resistance of *Aeromonas hydrophila*. *MicrobiologyOpen*, 8(11), e782. doi: 10.1002/mbo3.782
- Erdem, B., Kariptaş, E., & Kaya, T. (2010). Siderophore, hemolytic, protease, and pyrazinamidase activities and antibiotic resistance in motile *Aeromonas* isolated from fish. *Turkish Journal of Biology*, 34(4), 453–462. doi: 10.3906/biy-0901-20
- Feiner, G. (2006). *Meat Products Handbook: Practical Science and Technology*.

- Fernández-Bravo, A., & Figueras, M. J. (2020). An Update on the Genus *Aeromonas*: Taxonomy, Epidemiology, and Pathogenicity. *Microorganisms*, 8(1), 129. doi: 10.3390/microorganisms8010129
- Figueras, M. J., & Beaz-Hidalgo, R. (2015). *Aeromonas* infections in humans. In *Aeromonas* (pp. 65–108). Caister Academic Press. doi: 10.21775/9781908230560.04
- Ghenghesh, K. S., Ahmed, S. F., El-Khalek, R. A., Al-Gendy, A., & Klena, J. (2008). *Aeromonas*-associated infections in developing countries. *Journal of Infection in Developing Countries*, 2(2), 81–98.
- Gonçalves Pessoa, R. B., de Oliveira, W. F., Marques, D. S. C., dos Santos Correia, M. T., de Carvalho, E. V. M. M., & Coelho, L. C. B. B. (2019). The genus *Aeromonas*: A general approach. *Microbial Pathogenesis*, 130, 81–94. doi: 10.1016/j.micpath.2019.02.036
- Handfield, M., Simard, P., Couillard, M., & Letarte, R. (1996). *Aeromonas hydrophila* isolated from food and drinking water: Hemagglutination, hemolysis, and cytotoxicity for a human intestinal cell line (HT-29). *Applied and Environmental Microbiology*, 62(9), 3459–3461. doi: 10.1128/aem.62.9.3459-3461.1996
- Hänninen, M. L., Oivanen, P., & Hirvelä-Koski, V. (1997). *Aeromonas* species in fish, fish-eggs, shrimp and freshwater. *International Journal of Food Microbiology*, 34(1), 17–26. doi: 10.1016/s0168-1605(96)01163-4
- Harnisz, M., & Korzeniewska, E. (2018). The prevalence of multidrug-resistant *Aeromonas* spp. In the municipal wastewater system and their dissemination in the environment. *Science of The Total Environment*, 626, 377–383. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.100

- Herrera, F. C., Santos, J. A., Otero, A., & García-López, M.-L. (2006). Occurrence of foodborne pathogenic bacteria in retail prepackaged portions of marine fish in Spain. *Journal of Applied Microbiology*, 100(3), 527–536. doi: 10.1111/j.1365-2672.2005.02848.x
- Hoel, S., Vadstein, O., & Jakobsen, A. N. (2017). Species Distribution and Prevalence of Putative Virulence Factors in Mesophilic *Aeromonas* spp. Isolated from Fresh Retail Sushi. *Frontiers in Microbiology*, 8, 931. doi: 10.3389/fmicb.2017.00931
- Hoel, S., Vadstein, O., & Jakobsen, A. N. (2019). The Significance of Mesophilic *Aeromonas* spp. In Minimally Processed Ready-to-Eat Seafood. *Microorganisms*, 7(3), 91. doi: 10.3390/microorganisms7030091
- Hossain, S., Wickramanayake, M. V. K. S., Dahanayake, P. S., & Heo, G.-J. (2020). Species identification, virulence markers and antimicrobial resistance profiles of *Aeromonas* sp. Isolated from marketed hard-shelled mussel (*Mytilus coruscus*) in Korea. *Letters in Applied Microbiology*, 70(3), 221–229. doi: 10.1111/lam.13266
- Igbinsosa, I. H., Igumbor, E. U., Aghdasi, F., Tom, M., & Okoh, A. I. (2012). Emerging *Aeromonas* species infections and their significance in public health. *TheScientificWorldJournal*, 2012, 625023. doi: 10.1100/2012/625023
- Isonhood, J. H., & Drake, M. (2002). *Aeromonas* species in foods. *Journal of Food Protection*, 65(3), 575–582. doi: 10.4315/0362-028x-65.3.575
- Janda, J. M., & Abbott, S. L. (2010). The genus *Aeromonas*: Taxonomy, pathogenicity, and infection. *Clinical*

- Microbiology Reviews*, 23(1), 35–73. doi: 10.1128/CMR.00039-09
- Lamy, B., Baron, S., & Barraud, O. (2022). *Aeromonas*: The multifaceted middleman in the *One Health* world. *Current Opinion in Microbiology*, 65, 24–32. doi: 10.1016/j.mib.2021.09.012
- Lanzarin, M., Winter, H. C. L., Ritter, D. O., & Cabral, L. (2024). Ocorrence of *Aeromonas* spp. In fresh fish. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, 17(9), e10182–e10182. doi: 10.55905/revconv.17n.9-019
- Lee, H.-J., Hoel, S., Lunestad, B. -T., Lerfall, J., & Jakobsen, A. N. (2021). *Aeromonas* spp. isolated from ready-to-eat seafood on the Norwegian market: Prevalence, putative virulence factors and antimicrobial resistance. *Journal of Applied Microbiology*, 130(4), 1380–1393. doi: 10.1111/jam.14865
- Lee, H.-J., Storesund, J. E., Lunestad, B.-T., Hoel, S., Lerfall, J., & Jakobsen, A. N. (2023). Whole genome sequence analysis of *Aeromonas* spp. isolated from ready-to-eat seafood: Antimicrobial resistance and virulence factors. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1175304. doi: 10.3389/fmicb.2023.1175304
- Martinez-Murcia, A. J., Monera, A., Saavedra, M. J., Oncina, R., Lopez-Alvarez, M., Lara, E., & Figueras, M. J. (2011). Multilocus phylogenetic analysis of the genus *Aeromonas*. *Systematic and Applied Microbiology*, 34(3), 189–199. doi: 10.1016/j.syapm.2010.11.014
- Melas, D. S., Papageorgiou, D. K., & Mantis, A. I. (1999). Enumeration and confirmation of *Aeromonas hydrophila*, *Aeromonas caviae*, and *Aeromonas sobria* isolated from raw milk and other milk products in Northern Greece.

- Journal of Food Protection*, 62(5), 463–466. doi: 10.4315/0362-028x-62.5.463
- Miyagi, K., Hirai, I., & Sano, K. (2016). Distribution of *Aeromonas* species in environmental water used in daily life in Okinawa Prefecture, Japan. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 21(5), 287–294. doi: 10.1007/s12199-016-0528-0
- Navarro, A., & Martínez-Murcia, A. (2018). Phylogenetic analyses of the genus *Aeromonas* based on housekeeping gene sequencing and its influence on systematics. *Journal of Applied Microbiology*, 125(3), 622–631. doi: 10.1111/jam.13887
- Neyts, K., Huys, G., Uyttendaele, M., Swings, J., & Debevere, J. (2000). Incidence and identification of mesophilic *Aeromonas* spp. From retail foods. *Letters in Applied Microbiology*, 31(5), 359–363. doi: 10.1046/j.1472-765x.2000.00828.x
- Nuwamanya, Y., Ssemanda, I., Aanyu, D., Kibwika, B., Mwebaza, S. S., Mbwire, Y., ... Ario, A. R. (2025). Food poisoning outbreak caused by *Aeromonas* bacteria at a funeral in Buyengo Town Council, Jinja District, Uganda, February 2024. *BMC Infectious Diseases*, 25(1), 639. doi: 10.1186/s12879-025-11034-x
- Odeyemi, O. A. (2016). Antimicrobial resistance of *Aeromonas hydrophila* isolated from different food sources: A mini-review. *Journal of Infection and Public Health*, 9(5), 535–544. doi: 10.1016/j.jiph.2015.10.006
- Osman, K., Aly, M., Kheader, A., & Mabrok, K. (2012). Molecular detection of the *Aeromonas* virulence aerolysin gene in retail meats from different animal sources in

- Egypt. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 28(5), 1863–1870. doi: 10.1007/s11274-011-0915-z
- Palamae, S., Saetang, J., Yingkajorn, M., Zhao, Y., Zhang, B., Kim, J. T., & Benjakul, S. (2025). Quality changes, diversity and virulence of *Aeromonas* spp. In the refrigerated *Meretrix meretrix* and *Paphia undulata* clams. *LWT*, 228, 118046. doi: 10.1016/j.lwt.2025.118046
- Park, S. M., Kim, H. W., Choi, C., & Rhee, M. S. (2021). Pathogenicity and seasonal variation of *Aeromonas hydrophila* isolated from seafood and ready-to-eat sushi in South Korea. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 147, 110484. doi: 10.1016/j.foodres.2021.110484
- Parker, J. L., & Shaw, J. G. (2011). *Aeromonas* spp. Clinical microbiology and disease. *The Journal of Infection*, 62(2), 109–118. doi: 10.1016/j.jinf.2010.12.003
- Pessoa, R. B. G., Oliveira, W. F. de, Correia, M. T. dos S., Fontes, A., & Coelho, L. C. B. B. (2022). *Aeromonas* and Human Health Disorders: Clinical Approaches. *Frontiers in Microbiology*, 13. doi: 10.3389/fmicb.2022.868890
- Pintor-Cora, A., Tapia, O., Elexpuru-Zabaleta, M., Ruiz de Alegría, C., Rodríguez-Calleja, J. M., Santos, J. A., & Ramos-Vivas, J. (2023). Cytotoxicity and Antimicrobial Resistance of *Aeromonas* Strains Isolated from Fresh Produce and Irrigation Water. *Antibiotics*, 12(3), 511. doi: 10.3390/antibiotics12030511
- Praveen, P. K., Debnath, C., Shekhar, S., Dalai, N., & Ganguly, S. (2016). Incidence of *Aeromonas* spp. infection in fish and chicken meat and its related public health hazards: A review. *Veterinary World*, 9(1), 6–11. doi: 10.14202/vetworld.2016.6-11

- Qu, F., & Liu, D. (2024). *Aeromonas*. In *Molecular Medical Microbiology* (pp. 1009–1025). Academic Press. doi: 10.1016/B978-0-12-818619-0.00085-X
- Ramadan, H., Ibrahim, N., Samir, M., Abd El-Moaty, A., & Gad, T. (2018). *Aeromonas hydrophila* from marketed mullet (*Mugil cephalus*) in Egypt: PCR characterization of β -lactam resistance and virulence genes. *Journal of Applied Microbiology*, 124(6), 1629–1637. doi: 10.1111/jam.13734
- Recio, G., Fernández-Bravo, A., Latif-Eugenín, F., Tena, D., Rezusta, A., & Figueras, M. J. (2024, August 13). Identification of 273 Clinical *Aeromonas* Strains with a Gold Standard Method and MALDI-TOF: A Review on the Limitations of the Method. Retrieved November 25, 2025, from Scilit website: <https://www.scilit.com/publications/b2c4a5d8fbb81970b7adcd00987a447a>
- Richter, M., & Rosselló-Móra, R. (2009). Shifting the genomic gold standard for the prokaryotic species definition. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(45), 19126–19131. doi: 10.1073/pnas.0906412106
- Selim, S., Harun-Ur-Rashid, M., Jahan, I., & Mohammed Elamir, M. Y. (2025). Antibiotic susceptibility patterns of *Aeromonas*: Insights from aquatic ecosystems to public health impacts. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 51(2), 257–269. doi: 10.1016/j.ejar.2025.03.003
- Sheng, L., & Wang, L. (2021). The microbial safety of fish and fish products: Recent advances in understanding its significance, contamination sources, and control strategies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(1), 738–786. doi: 10.1111/1541-4337.12671

- Soler, L., Yáñez, M. A., Chacon, M. R., Aguilera-Arreola, M. G., Catalán, V., Figueras, M. J., & Martínez-Murcia, A. J. (2004). Phylogenetic analysis of the genus *Aeromonas* based on two housekeeping genes. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 54(5), 1511–1519. doi: 10.1099/ijs.0.03048-0
- Stratev, D., Vashin, I., & Rusev, V. (2012). Prevalence and survival of *Aeromonas* spp. In foods—a review. *Rev. Med. Vet.*, 163(10), 486–494. Retrieved from https://www.academia.edu/download/43499304/Prevalence_and_survival_of_Aeromonas_spp20160308-28000-p86yw6.pdf
- Subashkumar, R., Thayumanavan, T., Vivekanandhan, C. T., Savithamani, K., & Lakshmanaperumalsamy, P. (2006). Typing of Haemolytic and Antibiotic Resistant *Aeromonas hydrophila* Isolated from Raw Milk of Coimbatore, South India. *International Journal of Dairy Science*, 1(1), 70–83. doi: 10.3923/ijds.2006.70.83
- Teodoro, J. R., Carvalho, G. G., Queiroz, M. M., Levy, C. E., & Kabuki, D. Y. (2022). Incidence, evaluation of detection and identification methods, and antimicrobial resistance of *Aeromonas* spp. In ready-to-eat foods. *International Journal of Food Microbiology*, 379, 109862. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109862
- Teunis, P., & Figueras, M. J. (2016). Reassessment of the Enteropathogenicity of Mesophilic *Aeromonas* Species. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1395. doi: 10.3389/fmicb.2016.01395
- Truong, N. H. M., Nguyen, Q., Voong, P. V., Chau, V., Nguyen, N. H. T., Nguyen, T. H. M., ... Nguyen, H. D. (2024). Genomic characterization of *Aeromonas* spp. Isolates from striped catfish with motile *Aeromonas* septicemia

- and human bloodstream infections in Vietnam. *Microbial Genomics*, 10(5), 001248. doi: 10.1099/mgen.0.001248
- Vieira, T., Costa, G. L., Yamada, A. Y., Bertani, A. M. de J., Medeiros, M. I. C., Moreno, L. Z., ... Tiba, M. R. (2025). Genomic and proteomic identification of *Aeromonas* isolates from diverse sources: Comparative performance of WGS and MALDI-TOF MS in species-level resolution. *Frontiers in Bacteriology*, 4. doi: 10.3389/fbrio.2025.1708292
- Wang, C., & Silva, J. L. (1999). Prevalence and Characteristics of *Aeromonas* Species Isolated from Processed Channel Catfish. *Journal of Food Protection*, 62(1), 30–34. doi: 10.4315/0362-028X-62.1.30
- Xanthopoulos, V., Tzanetakis, N., & Litopoulou-Tzanetaki, E. (2010). Occurrence and characterization of *Aeromonas hydrophila* and *Yersinia enterocolitica* in minimally processed fresh vegetable salads. *Food Control*, 21(4), 393–398. doi: 10.1016/j.foodcont.2009.06.021
- Yadav, A. S., & Kumar, A. (2000). Prevalence of enterotoxigenic motile aeromonads in children, fish, milk and ice-cream and their public health significance. *The Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health*, 31 Suppl 1, 153–156.
- Yáñez, M. A., Catalán, V., Apráiz, D., Figueras, M. J., & Martínez-Murcia, A. J. (2003). Phylogenetic analysis of members of the genus *Aeromonas* based on *gyrB* gene sequences. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 53(Pt 3), 875–883. doi: 10.1099/ijls.0.02443-0
- Yassen, M., EL-Naenaeey, E.-S., Omar, A., & Tartor, Y. (2021). Virulence Determinants of *Aeromonas* Species

Implicated in Fish Diseases and Control of Infection: An overview. *Zagazig Veterinary Journal*, 49(3), 283–299. doi: 10.21608/zvjl.2021.85132.1148

Yucel, N., Aslim, B., & Beyatli, Y. (2005). Prevalence and Resistance to Antibiotics for *Aeromonas* Species Isolated from Retail Fish in Turkey. *Journal of Food Quality*, 28(4), 313–324. doi: 10.1111/j.1745-4557.2005.00037.x

Yucel, Nihal, & Çitak, S. (2003). The Occurrence, Hemolytic Activity and Antibiotic Susceptibility of Motile *Aeromonas* Spp. Isolated from Meat and Milk Samples in Turkey. *Journal of Food Safety*, 23(3), 189–200. doi: 10.1111/j.1745-4565.2003.tb00362.x

THE MULTIFACETED USE OF ULTRASOUND IN FOOD TECHNOLOGY AND MOLECULAR GASTRONOMY

Başak Gökçe ÇÖL¹

1. INTRODUCTION

Ultrasonic waves are a type of energy created by sound waves at frequencies above 16 kHz, which people cannot hear (Jayasooriya, Bhandari, Torley, & D'Arcy, 2004). These high-frequency waves are used in various scientific and industrial areas, such as medical imaging, surface cleaning, nanotechnology, and environmental disinfection. They have also become an important processing method in the food industry (Majid, Nayik, & Nanda, 2015). In food processing, ultrasound offers several benefits, including improved product quality, reduced processing times, and increased energy efficiency (Suslick & Price, 1999).

One key benefit of ultrasound technology in the food industry is its potential to enhance microbiological safety. Ultrasound can help break down microbes by disrupting their cell walls. It has been proven to reduce pathogens in meat and meat products effectively (Bhat & Goh, 2017; Pohlman, Dikeman, & Zayas, 1997a). Additionally, ultrasound treatment boosts protease activity, which leads to more tender meat, and it also causes positive changes in color, viscosity, and other quality factors (Jayasooriya, Torley, D'Arcy, & Bhandari, 2007).

¹ Department of Gastronomy and Culinary Arts, Faculty of Tourism, Dokuz Eylül University, İzmir, Türkiye. ORCID: 0000-0002-7627-9867.

Beyond its antimicrobial properties, ultrasound is crucial for keeping the nutritional value of foods intact. It helps extract vitamins, antioxidants, and phenolic compounds by disrupting cell walls, which reduces nutrient loss in fruits and vegetables during processing (Chemat et al., 2017). When compared to traditional methods, ultrasound-assisted techniques yield higher outputs in less time, resulting in energy savings and improved production efficiency (Khadhraoui, Ummat, Tiwari, Fabiano-Tixier, & Chemat, 2021).

Recently, ultrasound technology has garnered interest not only in industrial processing but also in modern cooking techniques, such as molecular gastronomy. In this area, chefs have adapted scientific laboratory tools, such as rotary evaporators, sintered glass filters, and ultrasonic probes, for culinary use. Techniques such as ultrasonic extraction, infusion, emulsification, and homogenization allow chefs and food scientists to manipulate aroma, texture, and flavor with remarkable precision (Chemat, Zill-e-Huma, & Khan, 2011).

One of the first studies showing ultrasound's culinary applications was by Pingret, Fabiano-Tixier, Petitcolas, Canselier, and Chemat (2011). They compared ultrasound-assisted desserts with conventionally made ones, revealing that the ultrasonic method produced better sensory and physicochemical results.

Collaborations between scientists and chefs, such as physicist Peter Barham with Chef Heston Blumenthal, French scientist Hervé This with Chef Pierre Gagnaire, and Italian scientist Davide Cassi with Chef Ettore Bocchia, have significantly enhanced our understanding of the science behind culinary experiences (Caporaso & Formisano, 2016).

In summary, ultrasound technology has a significant role in the food industry. Its increasing use in molecular gastronomy

shows its potential to connect science and cooking. Enhancing our understanding and application of ultrasound in gastronomy will lead to innovative processing methods, enhanced sensory experiences, and more sustainable cooking practices.

This section will outline the applications of ultrasound technology in food technology and gastronomy, addressing its role in food processing and its use in various culinary techniques. It will also outline how ultrasound connects these two disciplines and indicate potential directions for future research and practice.

2. ULTRASOUND TECHNOLOGY; DEFINITION AND FUNDAMENTAL PRINCIPLES

Ultrasound is a technology widely used in the food industry that utilizes high-frequency sound vibrations. In food processing and preservation, ultrasound can be categorized into two main types: low-intensity (100 kHz–1 MHz) and high-intensity (20–100 kHz) ultrasound (Awad, Moharram, Shaltout, Asker, & Youssef, 2012; Chemat et al., 2011; Jambrak, Mason, Lelas, Paniwnyk, & Herceg, 2014).

Low-intensity ultrasound is primarily used for nondestructive applications, such as homogenization, emulsification, and extraction, without altering the structural integrity of food components. It is also beneficial in microbial inactivation and enzyme control (Chávez-Martínez et al., 2020; Knorr, Zenker, Heinz, & Lee, 2004).

High-intensity ultrasound (20–100 kHz), which requires greater energy, is used for disruptive applications such as cell wall breakdown, molecular structural alteration, or the extraction of bioactive compounds (Awad et al., 2012; Chemat et al., 2011). Its fundamental mechanism relies on acoustic cavitation, which produces high temperatures and pressures in localized areas,

resulting in strong microturbulence (Silva, Gomes, Hubinger, Cunha, & Meireles, 2015; Wen et al., 2018).

At solid-liquid interfaces, cavitation creates microjets that lower the diffusion boundary layer. Bubble collapse also induces free radical formation, chemical bond rupture, and intense mechanical shear, accelerating reactions, homogenization, and membrane disruption. The magnitude of these effects depends on factors including power density, frequency, and processing duration (Ojha, Tiwari, & O'Donnell, 2018).

3. ULTRASOUND APPLICATIONS

3.1. Food Technology Applications

Since the 1990s, ultrasound technology has become a widely adopted alternative process in the food industry (Bates & Patist, 2010). It has been used in many food technology processes, including homogenization, mixing, extraction, filtration, crystallization, dehydration, fermentation, and degassing. The benefits of ultrasonic processing include foam prevention, particle size reduction, viscosity modification, cell disruption, microbial and enzymatic inactivation, and equipment sterilization (Kiani, Zhang, Delgado, & Sun, 2011).

The effects of ultrasound on liquid systems are mainly attributed to the high temperature and pressure generated during cavitation, which enhances the functional properties of hydrophobic groups in food matrices (Arzeni et al., 2012). Ultrasonic cutting technology allows for rapid, precise slicing of difficult-to-process foods such as cakes, bread, pizza, cheese, chocolate bars, and confectionery. It improves cutting uniformity and aesthetics in multi-layered products while also simplifying packaging processes (Bhargava, Mor, Kumar, & Sharanagat,

2020; Liu, Jia, Xu, & Li, 2015; Schneider, Zahn, Schindler, & Rohm, 2009).

Pohlman, Zayas, Dikeman, and Unruh (1997b) demonstrated that ultrasound can accelerate cooking time, improve energy efficiency, and enhance textural characteristics of meat. Additionally, ultrasonic cleaning systems are widely used for the removal of residues, maintenance of machinery, and cleaning of small-scale molds within food production facilities. This method effectively cleans metallic surfaces and complex equipment components within minutes, providing notable advantages in cured meat processing (Mason, 2016).

In the field of functional foods, researchers have also investigated using ultrasound to change plant-based ingredients like aquafaba, the thick liquid that comes from cooking pulses. Aquafaba contains proteins and carbohydrates that provide foaming, emulsifying, gelling, and thickening properties (He, Meda, Reaney, & Mustafa, 2021; Serventi, 2020). Recent studies have shown that ultrasound treatment enhances the foaming capacity and stability of aquafaba, improving its functional performance (Kilicli & Toker, 2022). It has been observed that applying ultrasound at 50% and 100% power for 10–30 minutes to chickpea aquafaba improved foaming and emulsifying properties while increasing lightness (L^*) values. (Meurer, de Souza, & Ferreira Marczak, 2020). Similarly, ultrasonic treatment of green pea aquafaba increased foaming capacity from 575% to 725% and improved foam stability (Kilicli, Özmen, Bayram, & Toker, 2023).

Ultrasound-assisted hydrolysis has been shown to enhance flavor precursor generation in protein hydrolysates. Pre-treating chicken liver proteins with ultrasound reduced particle size and increased flavor compound content after Maillard reaction (Chen, Zou, Wang, Xiong, & Xu, 2020). Likewise, Cai

et al. (2024), found that ultrasound-treated squid viscera (*Dosidicus gigas*) exhibited a significantly higher degree of hydrolysis ($45.67 \pm 0.34\%$) after 40 minutes compared to other treatments.

Ultrasound shows promise in fermentation processes. In traditional and mango-flavored kombucha, sonication influenced metabolic reactions, accelerating sugar consumption and enhancing the production of organic acids such as gluconic, propionic, and isobutyric acid (Fonteles et al., 2024).

In vegetable-based formulations, Martínez-Zamora, Castillejo, and Artés-Hernández (2023) reported that ultrasound treatment (50 °C, 35 kHz, 12 min) on hummus enriched with 2% mustard sprouts preserved vitamin C levels and increased sulforaphane content by 10–24% compared to controls.

In meat technology, high-power ultrasound improves tenderness by breaking down muscle structure and reducing stiffness in both myofibrils and collagen. Jayasooriya et al. (2007) showed that ultrasound treatment (24 kHz, 12 W/cm², 240 s) alleviated the tenderness of the Longissimus lumborum et thoracis and Semitendinosus muscles in beef without negatively impacting other quality factors. Ultrasound has also been applied in the development of natural colorants. (Strieder, Neves, Silva, and Meireles (2020) successfully produced a novel blue pigment through cross-linking between milk proteins and genipin extracted from unripe *Genipa americana* L. fruits using low-frequency, high-power ultrasound. This natural pigment demonstrated excellent color stability in dairy-based products, including ice cream, beverages, and confectionery.

Zhai et al. (2021) found that ultrasound significantly shortened the aging time of crabapple vinegar (*Malus asiatica*) while enhancing its flavor profile. In a similar study, (Jiménez

Muñoz, Sotelo Díaz, Salgado Rohner, Cáez Ramirez, and Filomena Ambrosio (2019) reported that applying high-power ultrasound (37 kHz; 150 W) to lionfish surimi patties increased hardness by 35.1%, reduced stickiness by 89.7%, and decreased chewiness by 49.1%, thus improving textural and sensory properties.

Furthermore, ultrasound-assisted extraction has shown remarkable efficiency in recovering bioactive compounds from herbs such as sage (*Salvia officinalis*) and mint (*Mentha piperita*). Under optimized conditions (40 °C, 10 min, 400 W), ultrasound significantly increased extraction yield, bioactivity, and bioavailability compared to conventional methods (Dogan, Akman, & Törnük, 2019).

In the context of traditional Turkish beverages, Doguer, Yıkmış, Levent, and Turkol, (2021) demonstrated that ultrasonication of sirkencübin (a vinegar–honey drink enriched with purple basil) enhanced antioxidant activity and increased phenolic and aromatic compounds, leading to greater consumer acceptance and potential anticancer effects in vitro. Similarly, (Yıkmış, Aksu, Altunatmaz, and Çöl (2021) found that ultrasound treatment (26 kHz, 200 W, 2 to 10 min, 60 to 80% amplitude) improved microbial quality and increased ACE inhibitory and antidiabetic properties in samples of tomato vinegar.

Rodríguez-Rico et al. (2022) also showed that high-intensity ultrasound treatment of melon juice increased total carotenoid content by 42%, enhanced antioxidant capacity, and improved microbiological safety, thereby confirming its potential as a non-thermal processing technique.

3.2. Molecular Gastronomy Applications

Molecular gastronomy is an innovative field that has evolved through the application of scientific principles to culinary

practices, often defined as “cooking with a scientific approach.” In this approach, sensory characteristics such as taste, aroma, and texture are examined using scientific methods; laboratory-based techniques are adapted to advanced cooking processes (Spence & Youssef, 2018). Unlike traditional food science, which focuses on industrial production, nutrition, and safety, molecular gastronomy examines the physical, chemical, and biological processes involved in cooking, and these principles can be applied in both restaurants and home kitchens. It is also closely related to gastronomic culture (Barham et al., 2010). These studies, conducted using analytical instruments employed in basic sciences, have paved the way for the emergence of modern applications known as “molecular cooking” in the kitchen (Caporaso, 2021; This, 2009).

In recent years, the pursuit of innovation and excellence in the field of gastronomy has increased significantly. Chefs and food scientists have begun to utilize science and technology more frequently to enhance sensory characteristics such as taste, aroma, and texture. In this regard, developments in food science and technology have made significant contributions to the diversification of gastronomic applications, the integration of modern techniques into kitchens, and the emergence of creative cooking methods (Başlar, 2024).

Within the realm of molecular gastronomy applications, ultrasonic technology stands out as a contemporary tool that combines creativity and functionality. The cavitation effect generated by ultrasonic waves accelerates processes such as extraction, infusion, emulsification, and homogenization, enabling the development of new flavor, aroma, and texture profiles. The major culinary and mixology applications of sonication are further summarized in Table 1 (Anonymous, 2025).

Table 1. Applications of Sonication in Molecular Gastronomy

Application Area	Description	Example Applications
Ultrasonic Extraction	Extraction of aromatic, pigment, or bioactive compounds from plants, fruits, or herbs through cavitation, enhancing mass transfer and extraction yield.	Cold-brew coffee, botanical extracts, caffeine or polyphenol extraction.
Infusion (Flavored Oils and Liquids)	Rapid infusion of flavors into oils, syrups, or spirits via ultrasonic agitation, allowing deep flavor penetration in a short time.	Chili or garlic-infused oils, lavender vodka, fruit syrups.
Emulsification and Homogenization	Formation of stable emulsions through ultrasonic shearing, improving smoothness, mouthfeel, and visual appeal.	Creamy vinaigrettes, foams, sauces, emulsified dressings.
Meat Tenderizing and Marination	Disruption of muscle fibers enhances marinade penetration, improving tenderness and flavor development.	“Meat Buzzer” ultrasonic steak tenderization, rapid marination.
Purees and Fruit/Vegetable Processing	Ultrasonic cell disruption releases natural sugars and aromas, improving flavor, sweetness, and texture.	Smoothies, vegetable purées, fruit concentrates.
Ultrasonic Aging (Wine and Vinegar)	Acceleration of aging reactions by reducing acidity and enhancing flavor complexity through ultrasonic micro-mixing.	Ultrasonically aged wines, aromatic vinegars.
Ultrasonic Frying Enhancement	Improves porosity, surface crispness, and oil absorption behavior during frying.	Ultrasonic-enhanced French fries (Modernist Cuisine).
Cocktail and Mixology Applications	Ultrasound enables rapid extraction, infusion, emulsification, and accelerated aging of beverages. Chefs and bartenders use portable sonicators (e.g., UP200Ht) to achieve oak-aged or botanical flavor profiles within minutes.	Oak-aged whiskey, citrus-infused gin, herbal cocktails, lavender rum.

4. CONCLUSION

Ultrasound technology represents an innovative and versatile processing tool with a wide range of applications in both the food industry and the culinary applications. Its multifunctional advantages in food processing, preservation, and quality enhancement have made it an essential method in modern production systems as well as in contemporary culinary practices. The preservation of heat-sensitive compounds, reduction in processing time, improvement in energy efficiency, and better microbial safety show its potential for wider use in future food manufacturing.

The physical and chemical effects generated by ultrasonic waves lead to significant improvements in the texture, flavor, aroma, and nutritional value of foods. From the perspective of molecular gastronomy, ultrasound is no longer limited to laboratory-scale studies but has been actively integrated into professional kitchens. The use of probe-type sonicators for extraction, infusion, emulsification, homogenization, and textural modification has introduced a new dimension to modern gastronomy both technically and aesthetically. Today, chefs and mixologists in top restaurants and bars use ultrasonic technology to create unique flavor profiles, strong aromas, and different textural combinations. Applications such as flavor infusion, rapid aging, and beverage emulsification have produced remarkable sensory and functional outcomes.

In the near future, ultrasound is expected to be further integrated into smart kitchen systems, automated cooking equipment, and sensor-based quality control mechanisms, expanding its scope of application. Moreover, combining ultrasound with other new food processing technologies like high-pressure processing, pulsed electric fields, ozonation, microwave, and laser-assisted systems will create new

opportunities for improving processing efficiency and product quality. Such hybrid approaches also support global sustainability goals by lowering energy use and encouraging eco-efficient production systems. However, some limitations still restrict the widespread use of ultrasound in culinary and industrial applications. The lack of standard processing parameters, like frequency, amplitude, duration, and power intensity, requires optimization for each specific food matrix. High equipment costs, challenges in scale-up, and potential undesirable chemical or sensory changes during processing can limit practical implementation. Additionally, the risks of oxidative degradation, cleaning difficulties, and operational energy demands must be carefully managed.

In conclusion, ultrasound technology remains a powerful tool that bridges scientific innovation and culinary creativity. Strengthening interdisciplinary collaboration between scientists, engineers, and chefs will enable more creative, efficient, and sustainable applications of this technology in professional kitchens, while also contributing to overcoming current challenges and deepening the scientific foundations of gastronomy.

REFERENCES

- Anonymous. (2025). Ultrasonic cooking: Basics, recipes & applications. Retrieved November 6, 2025, from <https://www.hielscher.com/ultrasonic-cooking-basics-recipes.htm>
- Arzeni, C., Martínez, K., Zema, P., Arias, A., Pérez, O. E., & Pilosof, A. M. R. (2012). Comparative study of high intensity ultrasound effects on food proteins functionality. *Journal of Food Engineering*, 108(3), 463–472. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.08.018
- Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D., & Youssef, M. M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*, 48(2), 410–427. doi: 10.1016/j.foodres.2012.05.004
- Barham, P., Skibsted, L. H., Bredie, W. L. P., Bom Frøst, M., Møller, P., Risbo, J., ... Mortensen, L. M. (2010). Molecular Gastronomy: A New Emerging Scientific Discipline. *Chemical Reviews*, 110(4), 2313–2365. doi: 10.1021/cr900105w
- Başlar, M. (2024). An Innovative Approach in Gastronomy: Ultrasound Technology. *International Journal of Gastronomy Research*, 3, 24–29. doi: 10.56479/ijgr-38
- Bates, D., & Patist, A. (2010). Industrial applications of high power ultrasonics in the food, beverage and wine industry—ScienceDirect. Retrieved December 1, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B978184569551450006X?via%3Dihub>
- Bhargava, N., Mor, R. S., Kumar, K., & Sharanagat, V. S. (2020). Advances in application of ultrasound in food processing:

- A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105293. doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105293
- Bhat, R., & Goh, K. M. (2017). Sonication treatment convalesce the overall quality of hand-pressed strawberry juice. *Food Chemistry*, 215, 470–476. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.07.160
- Cai, H., Tao, L., Liu, Y., Sun, D., Ma, Q., Yu, Z., & Jiang, W. (2024). Effect of different pretreatments on the hydrolysis efficiency and flavor of squid viscera (*Dosidicus gigas*). *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 36, 100919. doi: 10.1016/j.ijgfs.2024.100919
- Caporaso, N. (2021). The impact of molecular gastronomy within the food science community. In *Gastronomy and Food Science* (pp. 1–18). Academic Press. doi: 10.1016/B978-0-12-820057-5.00001-7
- Caporaso, N., & Formisano, D. (2016). Developments, applications, and trends of molecular gastronomy among food scientists and innovative chefs. *Food Reviews International*, 32(4), 417–435. doi: 10.1080/87559129.2015.1094818
- Chávez-Martínez, A., Reyes-Villagrana, R. A., Rentería-Monterrubio, A. L., Sánchez-Vega, R., Tirado-Gallegos, J. M., & Bolivar-Jacobo, N. A. (2020). Low and High-Intensity Ultrasound in Dairy Products: Applications and Effects on Physicochemical and Microbiological Quality. *Foods (Basel, Switzerland)*, 9(11), 1688. doi: 10.3390/foods9111688
- Chemat, F., Rombaut, N., Meullemiestre, A., Turk, M., Perino, S., Fabiano-Tixier, A.-S., & Abert-Vian, M. (2017). Review of Green Food Processing techniques. Preservation, transformation, and extraction. *Innovative*

Food Science & Emerging Technologies, 41, 357–377.
doi: 10.1016/j.ifset.2017.04.016

- Chemat, F., Zill-e-Huma, & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 813–835. doi: 10.1016/j.ultsonch.2010.11.023
- Chen, X., Zou, Y., Wang, D., Xiong, G., & Xu, W. (2020). Effects of ultrasound pretreatment on the extent of Maillard reaction and the structure, taste and volatile compounds of chicken liver protein. *Food Chemistry*, 331, 127369. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127369
- Dogan, K., Akman, P. K., & Törnük, F. (2019). Improvement of Bioavailability of Sage and Mint by Ultrasonic Extraction. *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*, 2(2), 122–135. doi: 10.38001/ijlsb.582148
- Doguer, C., Yıkılmış, S., Levent, O., & Turkol, M. (2021). Anticancer effects of enrichment in the bioactive components of the functional beverage of Turkish gastronomy by supplementation with purple basil (*Ocimum basilicum* L.) and the ultrasound treatment. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(5), e15436. doi: 10.1111/jfpp.15436
- Fonteles, T. V., dos Santos, A. Y. S., Linhares, M. de F. D., Miguel, T. B. A. R., Miguel, E. de C., & Rodrigues, S. (2024). Metabolic responses of kombucha consortium fermentation upon ultrasound-processing. *Food Chemistry Advances*, 4, 100646. doi: 10.1016/j.focha.2024.100646
- He, Y., Meda, V., Reaney, M. J. T., & Mustafa, R. (2021). Aquafaba, a new plant-based rheological additive for food

- applications. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 27–42. doi: 10.1016/j.tifs.2021.02.035
- Jambrak, A. R., Mason, T. J., Lelas, V., Paniwnyk, L., & Herceg, Z. (2014). Effect of ultrasound treatment on particle size and molecular weight of whey proteins. *Journal of Food Engineering*, 121, 15–23. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.08.012
- Jayasooriya, S. D., Bhandari, B. R., Torley, P., & D’Arcy, B. R. (2004). Effect of high power ultrasound waves on properties of meat: A review. *International Journal of Food Properties*, 7(2), 301–319. doi: 10.1081/JFP-120030039
- Jayasooriya, S. D., Torley, P. J., D’Arcy, B. R., & Bhandari, B. R. (2007). Effect of high power ultrasound and ageing on the physical properties of bovine Semitendinosus and Longissimus muscles. *Meat Science*, 75(4), 628–639. doi: 10.1016/j.meatsci.2006.09.010
- Jiménez Muñoz, L. M., Sotelo Díaz, I., Salgado Rohner, C., Cález Ramirez, G., & Filomena Ambrosio, A. (2019). Effectiveness of High Power Ultrasound for Surimi-Based Preparation of Lionfish (*Pterois volitans*) Patties by Textural, Sensory and Shape Preference. *Journal of Culinary Science & Technology*, 17(2), 89–102. doi: 10.1080/15428052.2017.1404538
- Khadhraoui, B., Ummat, V., Tiwari, B. K., Fabiano-Tixier, A. S., & Chemat, F. (2021). Review of ultrasound combinations with hybrid and innovative techniques for extraction and processing of food and natural products. *Ultrasonics Sonochemistry*, 76, 105625. doi: 10.1016/j.ultsonch.2021.105625

- Kiani, H., Zhang, Z., Delgado, A., & Sun, D.-W. (2011). Ultrasound assisted nucleation of some liquid and solid model foods during freezing. *Food Research International*, 44(9), 2915–2921. doi: 10.1016/j.foodres.2011.06.051
- Kilicli, M., Özmen, D., Bayram, M., & Toker, O. S. (2023). Usage of green pea aquafaba modified with ultrasonication in production of whipped cream. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 32, 100724. doi: 10.1016/j.ijgfs.2023.100724
- Kilicli, M., & Toker, O. S. (2022). Some physicochemical and technological properties of cooking water of pulses as a canned industry waste: Effect of ultrasound treatment during soaking. *International Journal of Food Engineering*, 18(2), 105–118. doi: 10.1515/ijfe-2021-0245
- Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V., & Lee, D.-U. (2004). Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 15(5), 261–266. doi: 10.1016/j.tifs.2003.12.001
- Liu, L., Jia, W., Xu, D., & Li, R. (2015). Applications of Ultrasonic Cutting in Food Processing. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 1762–1769. doi: 10.1111/jfpp.12408
- Majid, I., Nayik, G. A., & Nanda, V. (2015). Ultrasonication and food technology: A review. *Cogent Food & Agriculture*, 1(1), 1071022. doi: 10.1080/23311932.2015.1071022
- Martínez-Zamora, L., Castillejo, N., & Artés-Hernández, F. (2023). Ultrasound and microwave treatments preserved quality of a pepper-based hummus enriched in mustard

- sprouts. *LWT*, 185, 115178. doi: 10.1016/j.lwt.2023.115178
- Mason, T. J. (2016). Ultrasonic cleaning: An historical perspective. *Ultrasonics Sonochemistry*, 29, 519–523. doi: 10.1016/j.ultsonch.2015.05.004
- Meurer, M. C., de Souza, D., & Ferreira Marczak, L. D. (2020). Effects of ultrasound on technological properties of chickpea cooking water (*aquafaba*). *Journal of Food Engineering*, 265, 109688. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2019.109688
- Ojha, K. S., Tiwari, B. K., & O'Donnell, C. P. (2018). Effect of Ultrasound Technology on Food and Nutritional Quality. *Advances in Food and Nutrition Research*, 84, 207–240. doi: 10.1016/BS.AFNR.2018.01.001
- Pingret, D., Fabiano-Tixier, A.-S., Petitcolas, E., Canselier, J.-P., & Chemat, F. (2011). First investigation on ultrasound-assisted preparation of food products: Sensory and physicochemical characteristics. *Journal of Food Science*, 76(2), C287-292. doi: 10.1111/j.1750-3841.2010.02019.x
- Pohlman, F. W., Dikeman, M. E., & Zayas, J. F. (1997). The effect of low-intensity ultrasound treatment on shear properties, color stability and shelf-life of vacuum-packaged beef semitendinosus and biceps femoris muscles. *Meat Science*, 45(3), 329–337. doi: 10.1016/s0309-1740(96)00106-4
- Pohlman, F. W., Zayas, J. F., Dikeman, M., & Unruh, J. (1997). Ultrasound versus convection cooking of beef longissimus and pectoralis muscles. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*, (1), 11–13. doi: 10.4148/2378-5977.1909

- Rodríguez-Rico, D., Sáenz-Esqueda, M. de L. Á., Meza-Velázquez, J. A., Martínez-García, J. J., Quezada-Rivera, J. J., Umaña, M. M., & Minjares-Fuentes, R. (2022). High-Intensity Ultrasound Processing Enhances the Bioactive Compounds, Antioxidant Capacity and Microbiological Quality of Melon (*Cucumis melo*) Juice. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(17), 2648. doi: 10.3390/foods11172648
- Schneider, Y., Zahn, S., Schindler, C., & Rohm, H. (2009). Ultrasonic excitation affects friction interactions between food materials and cutting tools. *Ultrasonics*, 49(6–7), 588–593. doi: 10.1016/j.ultras.2009.03.001
- Serventi, L. (2020). *Upcycling Legume Water: From wastewater to food ingredients*. Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-42468-8
- Silva, E. K., Gomes, M. T. M. S., Hubinger, M. D., Cunha, R. L., & Meireles, M. A. A. (2015). Ultrasound-assisted formation of annatto seed oil emulsions stabilized by biopolymers. *Food Hydrocolloids*, 47, 1–13. doi: 10.1016/j.foodhyd.2015.01.001
- Spence, C., & Youssef, J. (2018). Assessing the long-term impact of the molecular gastronomy movement on haute cuisine. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 14, 35–44. doi: 10.1016/j.ijgfs.2018.10.001
- Strieder, M. M., Neves, M. I. L., Silva, E. K., & Meireles, M. A. A. (2020). Low-frequency and high-power ultrasound-assisted production of natural blue colorant from the milk and unripe *Genipa americana* L. *Ultrasonics Sonochemistry*, 66, 105068. doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105068

- Suslick, K. S., & Price, G. J. (1999). Applications Of Ultrasound To Materials Chemistry. *Annual Review of Materials Research*, 29(Volume 29, 1999), 295–326. doi: 10.1146/annurev.matsci.29.1.295
- This, H. (2009). Molecular gastronomy, a scientific look at cooking. *Accounts of Chemical Research*, 42(5), 575–583. doi: 10.1021/ar8002078
- Wen, C., Zhang, J., Zhang, H., Dzah, C. S., Zandile, M., Duan, Y., ... Luo, X. (2018). Advances in ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from cash crops – A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 538–549. doi: 10.1016/j.ultsonch.2018.07.018
- Yıkılmış, S., Aksu, F., Altunatmaz, S. S., & Çöl, B. G. (2021). Ultrasound Processing of Vinegar: Modelling the Impact on Bioactives and Other Quality Factors. *Foods (Basel, Switzerland)*, 10(8), 1703. doi: 10.3390/foods10081703
- Zhai, X., Wang, X., Wang, X., Zhang, H., Ji, Y., Ren, D., & Lu, J. (2021). An efficient method using ultrasound to accelerate aging in crabapple (*Malus asiatica*) vinegar produced from fresh fruit and its influencing mechanism investigation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 72, 105464. doi: 10.1016/j.ultsonch.2021.105464

PESTİSİTLERİN SÜT ÜRÜNLERİ OLUŞUMU VE KALİTESİNE ETKİLERİ: KİMYASAL, MİKROBİYOLOJİK VE GIDA GÜVENLİĞİ BOYUTLARI

Sezen HARMANKAYA¹

Ahmet HARMANKAYA²

1. GİRİŞ

Pestisitler gıda endüstrisinde üretim verimliliğini artırmak aynı zamanda ürünlerin kalite ve görünümünü iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle tarımda kullanılan pestisitler özellikle süt ve süt ürünlerini de kontamine edebilmektedir. Ayrıca süt ürünleri üretiminde kullanılan hammadde ve katkı maddelerinde pestisit kalıntılarının bulunması, gıda güvenliği açısından endişe verici boyutta riskler taşımaktadır. Bu nedenle pestisitlerin kalıntı düzeylerinin belirlenmesi ve kontrol altında tutulması, gıda güvenliğinin sağlanması için temel unsurlardan biridir. Ayrıca pestisitlerin yoğurt, kefir, peynir gibi fermente süt ürünlerinin oluşumu sırasındaki mikrobiyolojik ve enzimatik süreçler üzerindeki etkileri de dikkate alınmalıdır. Çünkü pestisitler, mikroorganizmaların aktivitelerini engelleyebilir veya değiştirebilir. Bu durum da ürünün kalitesinin bozulmasına, istenmeyen tat ve aroma gelişimine neden olabilir (Anani et al., 2020). Bu problemler tüketici sağlığını doğrudan

¹ Dr. Öğrt. Üyesi, Kafkas Üniversitesi, Kars Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, ORCID: 0000-0003-2498-5003.

² Dr. Öğrt. Üyesi, Kafkas Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, ORCID: 0000-0001-9923-6723.

etkileyebileceği gibi, aynı zamanda ürünlerin kalite özelliklerini de etkileyerek ekonomik kayıplara neden olabilir. Dolayısıyla pestisitlerin süt ürünleri üretim sürecine olan etkilerinin bilinmesi ve bu etkilerin en aza indirilmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesi, sürdürülebilir ve güvenilir gıda üretimi açısından büyük önem taşımaktadır. Gıda güvenliğini ve kalite standartlarını korumak için üretim zincirinde pestisitlerin kullanımını sınırlandıran uygulamaların geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Sonuç olarak, pestisitlerin süt ürünleri oluşum sürecine ve kalitesine etkileri, sadece duyuşal açıdan değil, aynı zamanda gıda güvenliği açısından da önemli bir konudur ve bu alandaki çalışmaların sürekli geliştirilmesi gerekmektedir (Fan, & Jackson, 1989).

2. PESTİSİTLERİN GIDA GÜVENLİĞİ VE İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNE ETKİSİ

Gıda güvenliği açısından bakıldığında, pestisit kalıntılarının yasal sınırların üzerinde bulunması, gastrointestinal sorunlar, alerjik reaksiyonlar veya kronik hastalıkların riskini artırabilir. Pestisitlerin yağda çözünme özelliğine sahip olması, vücut yağ dokularında kolaylıkla birikerek insan sütüne dahi geçebilmelerine neden olmaktadır (Sonawane, 1995). 37 adet anne sütünün incelendiği bir çalışmada sütlerde 1.595 mg/kg yağ DDT, 0.003 ng/kg yağ HCB ve 0.151 mg/kg yağ HCH kalıntısına rastlanmıştır (Erdoğrul, et al., 2004). Uzun süreli pestisit alımı kanser, hormonal bozukluk, karaciğer ve sinir sistemi hasarlarına neden olabilir (Karakaya, & Boyraz, 1992). Özellikle bu durumdan çocuklar ve bebekler daha fazla etkilenebilir. Yine pestisitli sütlerin bebek ve küçük çocuk beslenmesinde kullanılması olası risklerin ciddiyetini artırmaktadır. Ayrıca, pestisitlerin yoğun kullanımı, bakterilerin antibiyotiklere karşıda direnç geliştirmesine neden olarak, toplum

sağlığı açısından uzun vadeli sorunlara yol açabilir. Bu bağlamda, gıda üretim zincirinde pestisit kalıntılarının minimize edilmesi, düzenleyici standartlara uygunluk ve sürekli denetimlerin sağlanması mutlak bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, üretim süreçlerinde dikkatli ve bilinçli pestisit kullanımı ile güvenli, sağlıklı ve kaliteli süt ürünlerinin tüketiciye sunulması, hem bireysel sağlığın korunması hem de genel gıda güvenliği açısından hayati öneme sahiptir.

Pestisit kalıntıları, tüketiciye ulaşmadan önce hijyenik ve kalite standartlarına uygun üretim ortamlarında bile kontaminasyon kaynağı olabilmektedir. Bu kimyasal maddelerin yoğurt gibi hassas ürünlerde kalıntı bırakması, özellikle mikrobiyal dengeyi olumsuz etkileyerek patojenlerin gelişimine zemin hazırlayabilir. Aynı zamanda, pestisitler içerdiği bileşikler aracılığıyla gıdada biyokimyasal değişikliklere neden olabilir, bu da tüketicilerin sağlığını tehdit eden farklı riskleri ortaya çıkarabilir. Bu nedenle, pestisitlerin süt ürünlerine bulaşması, hem ürün kalitesini düşürmekte hem de tüketici sağlığı açısından ciddi riskler oluşturmaktadır.

3. PESTİSİTLER VE SÜT ÜRÜNLERİ ÜRETİMİNDE POTANSİYEL BULAŞMA KAYNAKLARI

Pestisitler, bitki koruma amacıyla tarımsal üretimde yaygın olarak kullanılan kimyasal maddeler olup, süt ürünleri üretim sürecinde çeşitli bulaşma kaynakları aracılığıyla kontaminasyona neden olabilir. Bunların en temel kaynakları, ilk olarak süt ineklerinin beslenmesinde kullanılan yemler ve su kaynaklarıdır. Tarımsal alanlarda uygulanan pestisitler, bitkiselden hayvansal üretime kadar birçok aşamada çevreye yayılmakta ve hayvanların yemlerine ulaşabilmektedir. Bu durumda, ineklerin günlük beslenmesi sırasında pestisit kalıntıları

sütlere geçiş yapabilmektedir. Aynı zamanda, tarımsal faaliyetlerle ilişkili sulama suyu ve toprak kontaminasyonu da, pestisitlerin süt ürünleri üretim zincirine girişinde önemli rol oynamaktadır. Bitki zararlılarına karşı mücehalede kullanılan insektisitler ve hayvanlarda parazit sağaltımında kullanılan paraziter pestisitler süütün kontaminasyonuna neden olan diğer kaynaklardır (Kınık, & Kavas, 2002; Ciscato, et al., 2002). Sütte daha çok kalıntı oluşturabilen pestisitler; klorlu pestisitler, dioksinleri içeren bileşikler, poliklorinat bifeniller (PCBs) ve DDT (diklorodifeniltrikloreten) dir. Bu pestisitler doğada uzun süre kalarak çevrede çok fazla kalıntı oluşturabilirler. Lipofilik özellik göstermeleri nedeniyle de yağ dokularında birikebilme özellikleri vardır. Bu nedenle tereyağı ve süt yağında süttten daha fazla oranda bulunabilirler (Girma et al., 2014; Sonawane 1995). Üretim hattına giren sütlerin hijyen ve kalite kontrol süreçleri, pestisit kalıntılarının tespiti açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, üretim tesislerinin ekipman ve makinalarında kullanılan temizlik ve dezenfeksiyon maddeleri de pestisit kalıntılarının yayılmasına katkı sağlayabilir. Tesislerde uygulanan hijyen prosedürleri yetersiz kalırsa, pestisit kalıntılarının mikroorganizmalarla etkileşimi sonucu kontaminasyon riski artmakta ve ürünlerin gıda güvenliği tehlikeye girmektedir (Tas, 1992). Sonuç olarak, pestisitlerin süt ürünleri üretiminde potansiyel bulaşma kaynakları, tarımsal ve endüstriyel aşamalarda çeşitli kontaminasyon yolları aracılığıyla olmaktadır ve bu durum, ürün kalitesi ile gıda güvenliği bakımından önemli bir risk oluşturmaktadır. Bu nedenle, üretimden itibaren etkin kontrol ve düzenleyici önlemlerle pestisit kalıntılarının minimum seviyelere indirilmesi, tüketici sağlığını korumada temel adımlardan biri olarak görülmektedir.

4. PESTİSİTLERİN SÜT ÜRÜNLERİ İÇERİĞİNE VE KALİTESİNE ETKİLERİ

Pestisit kalıntıları özellikle süt yağında birikebilir, bu da peynir ve tereyağı gibi ürünlerde yüksek seviyelerde pestisit maruziyetine neden olabilir. Pestisitlerin süt ürünleri içeriğine ve kalitesine olan etkileri, hem mikrobiyal hem de enzimatik süreçler açısından önemli sonuçlar doğurmaktadır. Pestisit kalıntıları, yoğurt, peynir kefir gibi süt ürünlerinin üretimi sırasında mikroorganizmaların aktivitesini olumsuz yönde etkileyerek fermentasyon süreçlerini zayıflatabilir veya bozulmalara yol açabilir. Bu durum, fermente süt ürünlerinin temel mikroflora bakteri türlerinin gelişimini engelleyerek, fermentasyon hızını azaltabilir ve ürünün karakteristik özelliklerine zarar verebilir. Ayrıca, pestisitlerin enzimatik aktivite üzerindeki etkileri, özellikle yoğurt oluşumunda dokusal özelliklerde değişikliklere neden olabilir; örneğin kıvam ve homojenlik gibi kalite parametreleri bozulabilir. Bazı pestisitler süt proteinleri ve vitaminlerle etkileşerek biyoyararlanımı düşürebilir, bu durum besin öğeleri üzerinde de olumsuz etkiler göstererek, protein içeriğinde azalmaya yol açabilir ve böylece ürünün besin değeri düşebilir. Aroma profili ise, pestisit kalıntılarının mikrobiyal ve kimyasal süreçleri değiştirmesi sonucunda değişebilir, istenmeyen tat ve koku oluşumları ortaya çıkabilir (Karakaya, & Boyraz, 1992). Bir çalışmada 1.5-2 ppm folpet ve 5-60 mg/kg dichlorvos kalıntısı içeren sütle yapılan krema ve yoğurtta kültürlere duyuşal özelliklerini veren diasetil, asetoin ve asetaldehit'in oluşumunun etkilendiğı belirtilmiştir (Blüthgen, & Tuinstra, 1992). Bu bağlamda, pestisitlerin kullanımı sırasında alınacak önlemler ve denetimler, ürünlerin güvenliğı ve kalitesinin korunması açısından büyük önem taşımaktadır.

Pestisitler süt ürünlerinin oluşum sürecini pek çok yönden etkileyebilir. Öncelikle süt ürünlerinin üretiminde kullanılan

starter kültürlerin gelişimini ve faaliyetlerini olumsuz yönde etkileyebilir. Böylece ürünün enzimatik faaliyetleri, aroma ve yapı özellikleri, besleyici değeri de istenilen düzeyde gelişim gösteremez. Pestisitlerin süt ürünlerinin üretiminde mikrobiyal faaliyetler üzerindeki etkisi, ürün kalitesi ve güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Pestisitlerin kalıntıları, fermente süt ürünlerinin üretiminde kullanılan mikroorganizmaların gelişimini ve aktivitesini doğrudan etkileyebilir. Bu etkiler, hem yararlı hem de patojen mikroorganizmaların hayatta kalma ve çoğalma oranlarını değiştirebilir. Örneğin, bazı pestisitler antibiyotik benzeri etkiler göstererek, laktik asit bakterilerinin gelişimlerini ve aktivitelerini engelleyebilir. Bu durum, yoğurt, kefir gibi ürünlerin fermantasyon sürecinin düzgün ilerlemesini zorlaştırabilir ve ürünün viskozitesi, kıvamı ve lezzeti üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Bir çalışmada araştırmacılar; farklı oranlarda fenvalerate, malathion ve DDT içeren yağsız sütte, *S. Lactis*, *S.thermophilus*, *L.bulgaricus*, *L.helveticus* kültürlerinin gelişimlerini ve asit üretimlerini araştırmışlardır. İnkübasyon sonrasında fenvalerate kültürlerin gelişimini en çok etkileyen kimyasal olarak belirlenirken, en düşük etkiyi de DDT'nin gösterdiğini belirlenmiştir. Malathionun ise kültürlerin asit üretimi üzerinde etkili olduğu, *L. Helveticus*'un ise söz konusu pestisitlere, gerek asit üretimi, gerekse gelişim açısından diğer üç bakteri cinsine göre daha dayanıklı olduğu belirlenmiştir (Blüthgen, & Tuinstra, 1992). Ayrıca, pestisitlerin mikroorganizmalar üzerindeki toksik etkileri, mikro flora dengesini bozabilir. Bu da, probiyotik bakterilerin miktarında azalma veya dengesizliklere neden olabilir. Pestisit kalıntılarıyla kontamine olmuş ortamlarda geliştirilen mikroorganizmalar, toksik maddelerin varlığında genetik değişiklikler gösterebilir veya direnç kazanabilir. Bu durum, hem üretim aşamasında hem de tüketici sağlığı açısından risk oluşturmaktadır. Kotan ve Tozlu (2021) tarımda kullanılan farklı pestisitlerin bakteriler üzerine etkilerini araştırdıkları bir çalışmada, pestisitlerin birçok faydalı

bakteri üzerinde bakterisidal etki gösterdiğini bildirmiştir (Kotan, & Tozlu, 2021).

Bazı pestisitlerin mikroorganizmalardaki etkisi, enzim aktivitesini de değiştirebilir. Enzimlerin fonksiyonunun bozulması, ürünün doku ve yapı özelliklerinde farklılıklara yol açabilir. Laktaz ve proteaz enzimleri gibi bakteri kaynaklı enzimler, laktozun glukoz ve galaktoza dönüşümünü sağlayarak fermantasyon sürecini hızlandırır ve tat ile kıvam üzerinde olumlu etkiler oluşturur. Aynı zamanda, proteinlerin enzimatik hidrolizi sonucu üretilen peptitler ve amino asitler, özellikle yoğurdun dokusunu yumuşatırken, aromasını ve lezzet profilini de etkiler. Enzimatik aktivitelerin yetersiz veya aşırı olması durumunda, ürünün kıvamı bozulabilir, tekstüründe sertlik veya yapışkanlık gibi istenmeyen özellikler oluşabilir (Köse, & Ocak, 2014; Usta, & Yılmaz-Ersan, 2013; Ay, & Şanlı, 2018).

Pestisitlerin yoğurt, peynir, kefir, tereyağı gibi süt ürünlerinin içeriğinde bulunan temel besin elementleri ve aroma profilleri üzerinde önemli etkileri vardır. Süt ürünlerinin bu maddeler ile kontaminasyonu, metabolik süreçleri ve mikroorganizmaların aktivitesini etkileyerek, ürünün besin değerinde değişikliklere yol açabilir. Özellikle vitaminler ve mineraller pestisitlerin kimyasal yapısıyla etkileşime girerek ayrışabilir veya biyoyararlılıkları azalabilir. Bu durum, tüketici sağlığını olumsuz yönde etkileyebileceği gibi, ürünün besin değerinde de kayıplara neden olabilir.

5. SÜT VE ÜRÜNLERİNDE PESTİSİT VARLIĞININ BELİRLENMESİ

Süt ürünlerindeki pestisit kalıntılarının riskini azaltmak, MRL'lerin (Maksimum Kalıntı Limitleri) belirlenmesi ve etkin denetim mekanizmaları kurulmasıyla mümkündür.

- **Analitik Yöntemler:** Gıdalardaki kalıntıların analizi, gıdaların kalitesini ve güvenliğini sağlamak için önemlidir. Analizlerde genellikle Gaz Kromatografisi (GC) ve Sıvı Kromatografisi/Kütle Spektrometrisi (LC-MS/MS) gibi yüksek hassasiyetli teknikler kullanılmaktadır. Pestisitlerin hayvansal ve bitkisel kaynaklı gıdalarda analizi için pek çok yöntem kullanılmaktadır. DDT, aldrin, lindan ve bunların izomerleri gibi bileşiklerin analizi için daha çok kolorimetrik ve kromatografik yöntemler yıllardır kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında gaz kromatografisi (GC), kâğıt kromatografisi, ince tabaka kromatografisi ve elektron yakalama detektörü (ECD) yer almaktadır. Bu bileşiklerin yapılarında klor bulunmasından dolayı GC-ECD ile başarılı sonuçlar alınmıştır. Son zamanlarda ise GC-ECD'den çok daha fazla duyarlı, GC-MS/MS cihazları kullanılmaya başlamıştır. Süt gibi yağ içeren örneklerin analizinde ekstraksiyon için; metilen klorid asetonitril, hekzan/aseton, etil asetat, aseton, petrol eteri, ve kloroform gibi organik çözücüler kullanılmaktadır. Sütten süt yağının ekstraksiyonunda ise petrol eteri ve asetonitril kullanılmaktadır (Güvenç, 2008).
- **Yeni Nesil Sensörler:** Süt, meyve suyu gibi kompleks matrislerde eser miktardaki kirleticileri saptamak için yüksek hassasiyetli yeni analitik yöntemler geliştirilmektedir. Örneğin, ditiyokarbamat fungusit olan thiram kalıntılarının meyve suyu örneklerinde ultra düşük tespit limiti ile saptanabilmesi için yüzeyde güçlendirilmiş Raman spektroskopisi (SERS) tabanlı bimetalik nanoçiçek substratları geliştirilmiştir (Xiao et al., 2024).

Harmankaya ve ark. da benzer şekilde süt numunelerinde tiram (THI) tayini için kükürt katkılı titanyum dioksit (S-TiO₂) nanoyapıları ve moleküler baskılı polimer (MIP) temelinde yeni bir yüzey plazmon rezonansı (SPR) sensörü geliştirmişler ve sonuç olarak, hazırlanan SPR sensörü, gerçek numunelerde $3,3 \times 10^{-10}$ M algılama limiti (LOD) ile $1,0 \times 10^{-9}$ – $1,0 \times 10^{-7}$ M aralığında doğrusallık göstermiştir (Harmankaya, et al., 2024). Tarımda mantarlar ile mücadelede kullanılan tiyofanat-metil varlığının süt ürünlerinde olan kalıntısının belirlenmesi amacıyla geliştirilen kuvars kristal mikrodenge sensörü ile de süt numunelerinde $3,3 \times 10^{-10}$ M algılama limiti ile $1,0 \times 10^{-9}$ – $1,0 \times 10^{-8}$ M aralığında doğrusallık belirlenmiştir (Harmankaya, et al., 2025). Benzer şekilde, Bisphenol A (BPA) ve Ochratoxin A (OTA) gibi diğer zararlı maddelerin gıda numunelerinde yüksek seçicilikle ve düşük limitlerle tespiti için moleküler baskılama (MIP) esaslı elektrokimyasal sensörler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır (Rajendraprasad, et al., 2023).

Süt ürünlerindeki pestisit kalıntılarının etkisi, kimyasalın yapısı (özellikle yağda çözünürlüğü), tüketim miktarı ve tüketicinin yaşı gibi birçok faktöre bağlıdır. Süt ürünlerinin hayati besin değeri göz önüne alındığında, kalıntı izleme programlarının sıklaştırılması ve bilinçli pestisit kullanımının teşvik edilmesi, halk sağlığını korumak için temel adımlardır.

6. OLASI RİSKLERİN BELİRLENMESİ VE ALINABİLECEK ÖNLEMLER

Pestisitlerin süt ve ürünlerinin üretiminde oluşturduğu risklerin etkin bir şekilde değerlendirilmesi, gıda güvenliğinin

sağlanması ve kamu sağlığının korunması açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, pestisit kalıntılarının potansiyel sağlık etkileri, içerik seviyeleri ve bulaşma kaynakları dikkate alınarak kapsamlı risk analizi yapılmalıdır. İlk aşamada, pestisit kullanımının farklı üretim aşamalarındaki olası bulaşma noktaları tespit edilerek, kontaminasyon riskleri belirlenebilir. Ardından, kimyasal analiz yöntemleri kullanılarak kalıntı seviyeleri izlenmeli ve standart sınırların aşılmadığından emin olunmalıdır (Eyhorn, 2015).

Risk değerlendirmesinde, pestisitlerin mikroorganizmalar ve enzimatik aktiviteler üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulmalı, tüketicinin maruziyet düzeyi hesaplanmalıdır. Bu, özellikle hassas gruplar açısından potansiyel sağlık risklerinin belirlenmesi için önemlidir. Yönetim stratejileri ise, pestisit kullanımını minimize eden ve bulaşma risklerini azaltan üretim süreçlerini içermelidir. Bu amaçla, çiftçi eğitimleri, biyolojik ve mekanik koruma yöntemleri, temizleme ve dezenfeksiyon prosedürleri geliştirilerek uygulanmalıdır (Yılmaz, et al., 2024).

Üretim ve ambalaj süreçlerinde pestisit kontaminasyonunun önlenmesine yönelik çeşitli önleyici tedbirler alınmalıdır. Bunlar arasında, hammadde seçimi ve tedarik aşamasında sıkı kalite kontrollerinin gerçekleştirilmesi büyük önem taşır. Tedarikçilerin güvenilirliği ve ürünlerin uygun analizlerle denetlenmesi, pestisit kalıntılarının ürünlere girişini engellemeye yardımcı olur. Fabrika içi hijyen protokollerinin sıkı uygulanması ve çalışanların eğitim seviyelerinin artırılması da kontaminasyon risklerini azaltır. Ayrıca, üretim alanlarının düzenli temizlik ve dezenfekte edilmesi, mikrobiyal ve kimyasal kalıntıların homojen dağılımını engelleyerek, pestisitlerin ürünlere birikmesini önler. Ambalaj aşamasında ise, uygun hijyen standartlarının korunması, paketleme ortamlarının kontrol altında tutulması ve sterilize ambalaj malzemeleri kullanılması,

pestisitlerin ürünlerle temasını minimize eder (Pazır, & Turan, 2017). Farklı meyve ve sebzelere su veya çeşitli çözeltiler ile yıkama (Yaralı, 2014), ısıtma işlemi uygulama (Han, et al., 2013), maserasyon ve fermentasyon işlemleri (Cangi, et al., 2014), ozon uygulaması (Aslan, & Akyıldız, 2025), ultrases uygulaması (Zhang, et al., 2010), vurgulu elektrik alan uygulamaları (Chen, et al., 2009), yüksek hidrostatik basınç uygulamaları (Aslan, & Akyıldız, 2025), gama ışını uygulamaları (Basfar, et al., 2012) gibi yöntemler ile çeşitli pestisit kalıntılarının uzaklaştırıldığı belirtilmiştir. Gelişmiş izleme ve analiz tekniklerinin kullanılmasıyla, üretim sürecinin her aşamasında pestisit kalıntılarının tespiti ve kontrolü sağlanabilir. Ayrıca, kalite yönetim sistemi ve tehlike analizleri temel alınarak, pestisit kaynaklı risklerin belirlenmesi ve uzaklaştırılması için caydırıcı önlemler geliştirilmelidir. Bu çerçevede, sürekli denetim ve çalışanların farkındalık düzeyinin artırılması, olası kontaminasyonların önlenmesine katkı sağlar. Sonuç olarak, üretim ve ambalaj süreçlerinde bütüncül ve disiplinli önleyici tedbirler alınması, hem ürün kalitesini koruma hem de gıda güvenliğini sağlama açısından önemli unsurlardır. Bu tedbirlerin etkinliği sürekli izleme ve iyileştirme faaliyetleriyle desteklenerek, pestisit kalıntılarının süt ve ürünlerindeki olası etkileri en düşük seviyeye indirilmelidir (Yılmaz, et al., 2024).

Pestisitler ile mücadelede kullanılan bir diğer yöntemde biyolojik mücadeledir. Bu yöntemde belli bir popülasyon düzeyini kontrol altında tutmak için patojenler, predatör ya da parazitler kullanılmaktadır (DeBach, 1964). Bu amaçla kullanılan mikroorganizmalar iki şekilde pestisitlerin parçalanmasını sağlayabilmektedirler. Bunlardan ilki metabolik faaliyetleri ile ortam koşullarını etkilemeleri sonucu pestisitlerin hasar görmesi ile gerçekleşmektedir. Bu yollardan diğeri ise oksitlenme, dehidrojenasyon, indirgeme, hidroliz ve sentez içeren enzimatik tepkimelerle gerçekleşmektedir (Ye, et al., 2018). Canlılar için

potansiyel tehlike olan pestisitlerin arındırılmasında biyodegradasyon gelişmiş ülkelerde yaygın olarak kullanılan bir uygulamadır. Toprak örneklerinde yapılan çalışmalarda chlorpyrphos ve methyl parathon pestisitlerini *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Brucella* ve *Ochrobactrum* türlerinin etkisiz hale getirdikleri belirlenmiştir (Singh, et al., 2003; Zhang et al., 2005).

Ayrıca, izleme ve denetim mekanizmalarının güçlendirilmesi, düzenleyici kurumların standartları sürekli güncellemeleri ve sektörle iş birliği yaparak risklerin etkin bir şekilde yönetilmesi sağlanmalıdır. Son olarak, acil durum planlarının oluşturulması ve kriz yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi, olası pestisit kontaminasyonu kaynaklı tehlikelerin en aza indirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu bütüncül yaklaşım, hem kalite kontrolünü güçlendirecek hem de tüketici güvenliğini artıracaktır.

7. YASAL MEVZUAT, STANDARTLAR VE UYGULAMA ZORLUKLARI

Pestisitlerin çevre ve sağlık yönünden sorun yaratabilecek kullanım limitleri, uygulama metodları ve ürünlerdeki kalıntı limitleri her ülkenin ilgili bakanlık veya organizasyon kurumu tarafından belirlenmektedir. Ülkemizde ise Avrupa Birliği mevzuatıyla uyumlu olarak, gıda maddelerinde pestisit kalıntılarına ilişkin değişiklikler yapılmıştır. Türk Gıda Kodeksi Pestisitlerin Maksimum Kalıntı Limitleri Yönetmeliği ile pestisit kullanımının yasal sınırları belirlenmiştir. Bu yönetmelik ile hayvansal gıdalarda bulunabilecek pestisitlerin maksimum kalıntı limitleri de belirlenmiştir (Anonim, 2014). Yasal mevzuat ve standartlar, pestisitlerin süt ve ürünleri üretimindeki kullanımını ve bulaşma risklerini kontrol altında tutmak amacıyla ulusal ve uluslararası düzeyde belirlenen çerçeveyi oluşturmaktadır. Bu düzenlemeler, üreticilere pestisit kullanım sınırlarını, etki

sürelerini ve analiz yöntemlerini esas alarak, ürünlerin kaliteli ve güvenli olarak piyasaya sunulmasını hedefler. Ancak, çeşitli uygulama zorlukları da mevcuttur. Bunlar arasında, pestisit kalıntılarının tespit ve analiz edilmesindeki teknik güçlükler, sınır değerlerinin belirlenmesinde yaşanan belirsizlikler yer almaktadır. Ayrıca, üretim süreçlerinin karmaşık yapısı ve farklı üretim ortamlarının değişkenliği, standartların tutarlı şekilde uygulanmasını zorlaştırabilir (Yılmaz, et al., 2024). Uygulama esnasında karşılaşılan bu zorluklar, pestisit kalıntılarının sınır değerlerinin aşılması veya gözden kaçması riskini artırmakta ve tüketici güvenliğini tehlikeye atabilmektedir. Dolayısıyla yasalar, sürekli gelişen bilimsel ve teknolojik gelişmeler doğrultusunda, standartları güncellemek ve denetim mekanizmalarını güçlendirmek suretiyle, gıda güvenliğine katkı sağlamaya çalışmaktadır. Ayrıca, eğitim ve bilinçlendirme faaliyetleri ile üreticilerin mevzuata uyumu teşvik edilmekte, izlenebilirlik sistemleri ile pestisit kalıntılarının kaydı ve takibi sağlanmaktadır. Bu bağlamda, mevcut düzenlemelerin etkin şekilde uygulanabilmesi için çoklu işbirliği ve sürdürülebilir denetim stratejilerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir.

8. SONUÇLAR

Sonuçlar, pestisit kalıntılarının süt ürünleri üretimi sırasında ve sonrasında ortaya çıkabilecek olumsuz etkileri gözler önüne sermektedir. Pestisitlerin mikroorganizmalar, enzim aktiviteleri ve doku yapısı gibi temel bileşenler üzerindeki etkileri, ürünün besin değeri ve tüketici güvenliği açısından önemlidir. Bu doğrultuda, pestisitlerin yoğurt kalitesine olumsuz katkılarını en aza indirmek için üretim süreçlerinde sıkı kontroller ve izleme mekanizmalarının uygulanması gereklidir. Ayrıca, üreticilerin training desteği ile pestisit kullanımını optimize ederek, olası bulaşma risklerini azaltmaları önerilmektedir. Gıda

güvenliği açısından, pestisit kalıntılarının belirlenmesi ve sınırlandırılması amacıyla mevzuatın güncellenmesi ve standartların sıkılaştırılması kaçınılmazdır. Sistemli risk değerlendirmeleri ve entegre yönetim stratejileri, pestisit maruziyetini azaltmaya katkı sağlayacaktır. Aynı zamanda, ambalajlama ve koruyucu önlemlerle pestisit kontaminasyonunun engellenmesi, tüketici sağlığını korumanın temel unsuru olarak ön plana çıkmaktadır. Önleyici tedbirlerin yanı sıra, tüketicilerin de bilinçlendirilmesi, doğru tüketim ve saklama koşulları konusunda bilgilendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmaların toplamında, pestisit kalıntılarını minimize ederek, yoğurt ürünlerinin hem kalite hem de güvenlik açısından yüksekte tutulması hedeflenmelidir. Sonuç olarak, pestisit kontrolü ve sürdürülebilir üretim uygulamaları, hem tüketici sağlığını koruma hem de sektörel gelişmeyi sağlama noktasında vazgeçilmezdir ve bu yönde sürekli güncellenen politikalar ve eğitimlerle desteklenmelidir.

KAYNAKÇA

- Anani, O. A., Mishra, R. R., Mishra, P., Enuneku, A. A., Anani, G. A., & Adetunji, C. O. (2020). Effects of toxicant from pesticides on food security: current developments. In *Innovations in food technology: Current perspectives and future goals* (pp. 313-321). Singapore: Springer Singapore.
- Anonim, (2014). Türk Gıda Kodeksi Pestisitlerin Maksimum Kalıntı Limitleri Yönetmeliği. T.C. Resmi Gazete, Sayı: 29099 (Mükerrer). *Başbakanlık Yayınevi*, Ankara, Türkiye.
- Aslan, M., & Akyıldız, A. (2025). Gıdalarda Bulunan Pestisitlerin Detoksifikasyonu İle İlgili Yeni (Isıl Olmayan) Uygulamalar. *Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 40(1), 12-20.
- Ay, C., & Şanlı, T. (2018). Süt ürünlerinde biyoaktif peptitlerin oluşumu ve fonksiyonel özellikleri. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 15(1), 115-120.
- Basfar, A.A., Mohamed, K.A. & AlSager, O.A. (2012). Decontamination of pesticide residues in food by ionizing radiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 81, 473–478.
- Blüthgen, A. and Tuinstra, M.G.L.(1992), Monograph on Residues and Contaminant in Milk And Milk Products, *Pesticides, IDF-Special Issue 9701*, 54-61.
- Cangi, R., Yanar, Y., Yağcı, A., Topçu N., Sucu, S. & Dülgeroğlu, Y. (2014). Narince Üzüm Çeşidinin Yapraklarında Farklı Fungusit Uygulamaları ve Salamura Yöntemlerine Bağlı Olarak Fungusit Kalıntı Düzeylerinin Belirlenmesi. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 31(2), 23-30.

- Chen, F., Zeng, L., Zhang, Y., Liao, X., Ge, Y., Hu, X. & Jiang, L. (2009). Degradation behaviour of methamidophos and chlorpyrifos in apple juice treated with pulsed electric fields. *Food Chemistry*, 112(4), 956-961.
- Ciscato, C.H.P., Gebara, A.B, Spinosa, H.S., (2002). Pesticide residues in cow milk consumed in Sao Paulo city (Brazil). *Journal Environmental Science and Health B*. 37(4): 323-330.
- DeBach, P. (1964). The scope of biological control. Pp. 1–20, in P. DeBach (ed.), *Biological Control of Insect Pests and Weeds*. Reinhold Pub. Corp. NY.
- Erdoğrul, Ö., Covaci, A., Kurtul, N., Schepens, P., (2004). Levels of organohalogenated persistent pollutants in human milk from Kahramanmaraş Region, Turkey. *Environment International*, 30: 659- 666
- Eyhorn, F., Roner, T., & Specking, H. (2015). Pestisit kullanımını ve pestisitlere ilişkin riskleri azaltmak: nasıl bir eyleme ihtiyaç var. *Web sayfası: [https://www. zehirsizkentler.org/wp content/uploads/2021/12/Pestisit-kullanimini-azaltmak. pdf](https://www.zehirsizkentler.org/wp-content/uploads/2021/12/Pestisit-kullanimini-azaltmak.pdf)*(Erişim tarihi: Aralık 2025).
- Fan, A. M., & Jackson, R. J. (1989). Pesticides and food safety. *Regulatory toxicology and pharmacology*, 9(2), 158-174.
- Girma K., Tilahun, Z., Haimanot, D., (2014). Review on milk safety with emphasis on its public health. *World Journal of Dairy & Food Sciences*, 9(2):166- 183
- Güvenç, D. (2008). Samsun yöresinden toplanan çiğ süt örneklerinde bazı pestisit kalıntılarının araştırılması üzerine bir çalışma, *Ondokuz Mayıs Üniv. Sağlık Bilimleri Ens. Doktora Tezi*, 64s.

- Han, Y., Li, W., Dong, F., Xu, J., Liu, X., Li, Y., Kong, Z., Liang, X. & Zheng, Y. (2013). The behavior of chlorpyrifos and its metabolite 3,5,6-trichloro-2-pyridinol in tomatoes during home canning. *Food Control*, 31(2), 560-565.
- Harmankaya, S., Deveci, H. A., Harmankaya, A., Gül, F. H., Atar, N., & Yola, M. L. (2024). Thiram determination in milk samples by surface plasmon resonance based on molecularly imprinted polymers and sulphur-doped titanium dioxide. *Biosensors*, 14(7), 329.
- Harmankaya, S., Deveci, H. A., Harmankaya, A., Gül, F. H., Atar, N., & Yola, M. L. (2025). A novel environmental pollutant thiophanate-methyl fungicide detection in milk samples by quartz crystal microbalance nanosensor based on molecularly imprinting polymer and sulfur-doped reduced graphene oxide nanomaterial. *Microchimica Acta*, 192(11), 729.
- Karakaya, M., Boyraz, N., (1992). Gıda kirlenmesinde pestisitler ve korunma yolları. *Ekoloji*, 1(4): 11-15.
- Kınık, Ö., Kavas, G., (2002). Süt ve ürünlerinde pestisitler. *Gıda Mühendisliği Dergisi* 12: 31-32.
- Kotan, R., & Tozlu, E. (2021). Bazı pestisitlerin faydalı bakteriler ve patojen bakteriler üzerine bakterisidal etkilerinin belirlenmesi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 18(2), 197-212.
- Köse, Ş., & Ocak, E. (2014). Yoğurtta lezzet bileşenlerinin oluşumu ve bu oluşum üzerine etki eden faktörler. *Akademik Gıda*, 12(2), 101-107.
- Pazır, F., & Turan, F. (2017). Meyve Ve Sebzelerde Karşılaşılabilen Bazı Pestisit Kalıntılarının Uzaklaştırılmasında Kullanılan Çeşitli Yöntemler. *Food And Health*, 3(3), 109-116.

- Rajendraprasad, S. D., Girigoswami, A., Chakraborty, S., & Girigoswami, K. (2023). Detection of food contaminants using nanotechnology-a mini review. *Current Nutrition & Food Science*, 19(9), 896-905.
- Singh, B. K., Walker, A., Morgan, A. W. and Wright, D. J. (2003). Effects of soil pH on the biodegradation of chlorpyrifos and isolation of a chlorpyrifos-degrading bacterium. *Applied Environmental Microbiology*, 69, 5198-5206.
- Sonawane, B.R., (1995). Chemical contaminants in human milk: An overview. *Environmental Health Perspectives* 103(6): 197-205
- TAS, G. (1992). Karbamatlı Pestisitleri Süt Teknolojisindeki Önemi *E.Ü.Ziraat Fak. Süt. Tekn. Böl. Lisans Semineri*, 1-13
- Usta, B., & Yılmaz-Ersan, L. (2013). Sütün antioksidan enzimleri ve biyolojik etkileri. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 27(2), 123-130.
- Xiao, L., Hua, M.Z., Lu, X. (2024). Determination of thiram in fruit juices using a bacterial cellulose nanocrystal-based SERS substrate. *Int J Biol Macromol*. Jan;255:128207.
- Yaralı, E. (2014). Gıda Mühendisliğinde Temel İşlemler I. <http://www.akademik.adu.edu.tr/myo/cine/webfolders/File/ders%20notlari/gida%20temel%20islemler%20I.pdf> (Erişim Tarihi: 16.01.2025).
- Ye, X., Dong, F. and Lei, X. (2018). Microbial resources and ecology-microbial degradation of pesticides. *Natural Resources Conservation and Research*, 23(9), 22-28.
- Yılmaz, H., Düzenli, A., & Dağ, M. M. (2024). Dünya, Avrupa Birliği Ülkeleri ve Türkiye’de Pestisit Kullanımı ve Yasal

Düzenlemeler. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 11(3), 315-330.

Zhang, R., Cui, Z., Jiang, J., He, J., Gu, X. and Li, S. (2005). Diversity of organophosphorus pesticides degrading bacteria in a polluted soil and conservation of their organophosphorus hydrolase genes. *Canadian Journal of Microbiology*, 51, 337- 343.

Zhang, Y., Zhang, W., Liao, X., Zhang, J., Hou, Y., Xiao, Z., Chen, F., & Hu, X. (2010). Degradation of diazinon in apple juice by ultrasonic treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 17(4), 662-668.

GIDA KAYNAKLI BAKTERİYEL, VİRAL VE FUNGAL PATOJENLERİN TESPİTİ VE KARAKTERİZASYONU: KLASİK YÖNTEMLERDEN YENİ NESİL YAKLAŞIMLARA

Yasin AKKEMİK¹

Kemal Kaan TEKİNŞEN²

1. GİRİŞ

Mikroorganizmalar, gıda üretimi, gıda güvenliği ve gıda bozulması süreçlerinde merkezi bir rol oynamaktadır. Gıdalarla etkileşime giren mikroorganizmalar, ürünün duyu ve teknolojik özelliklerini olumsuz etkileyerek insan tüketimine uygun olmayan hale getirebilmekte, hatta bazı durumlarda doğrudan gıda kaynaklı hastalık ve zehirlenmelere yol açabilmektedir (Iulietto, Sechi, Borgogni, & Cenci-Goga, 2015; Saucier, 2016). Bunun temel nedeni, gıdalarda bulunan mikroorganizmaların bir bölümünün yalnızca bozulma etmeni değil aynı zamanda patojen karakterde olması ve gıda işleyicileri ile tüketiciler açısından ciddi bir halk sağlığı riski oluşturmalarıdır (Aladhadh, 2023). Bugün için 200'ün üzerinde gıda kaynaklı hastalık tanımlanmış olup, bu hastalıklar morbidite ve mortalite yanında önemli ekonomik kayıplara da yol açmaktadır (Mead et al., 1999).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kastamonu Üniversitesi, Veteriner Fakültesi Gıda Hijyeni ve Teknolojisi Bölümü, ORCID: 0000-0002-9086-0324.

² Prof. Dr., Selçuk Üniversitesi, Veteriner Fakültesi, Besin Hijyeni ve Teknolojisi Bölümü, ORCID: 0000-0003-3287-3925.

Gıda kaynaklı patojenler arasında başta *Bacillus cereus*, *Clostridium botulinum*, *Campylobacter* spp., *Clostridium perfringens*, belirli *Escherichia coli* serogrupları, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp., *Shigella* spp., *Staphylococcus aureus* ve *Vibrio* spp. olmak üzere çok sayıda bakteri türü yer almaktadır (Lianou, Panagou, & George-John E, 2023). Bu patojenler, et ve et ürünleri, süt ve süt ürünleri, yumurta, balık ve deniz ürünleri, taze sebzeler ve hazır tüketime yönelik gıdalar gibi farklı gıda gruplarında saptanmakta ve çoğu zaman salgınlarla ilişkilendirilmektedir. Bu nedenle, söz konusu patojenler için varlık–yokluk veya mikrobiyal yük esasına dayanan yasal sınırlar belirlenmiş; bu sınırların izlenmesine ve doğrulanmasına yönelik spesifik tespit yöntemleri geliştirilmiştir.

Bununla birlikte yalnızca bakteriyel etkenler değil, gıdalarda gelişebilen *Penicillium*, *Claviceps*, *Aspergillus* ve *Fusarium* gibi mikotoksijenik küf türleri de halk sağlığı açısından kritik öneme sahiptir (Aladhadh, 2023). Bu türlerin ürettiği mikotoksinler, akut toksik etkilerin yanı sıra hepatokarsinojenik, nefrotoksik ve immünmodülatör etkiler göstererek uzun vadede ciddi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Öte yandan, gıda kökenli viral patojenler de özellikle son yıllarda dikkat çeken bir diğer grup olarak öne çıkmaktadır. *Norovirus*, *Hepatit A* ve *E* virüsleri, *Rotavirus*, *Enterovirus*, *Adenovirus*, *Sapovirus*, *Achivirus* ve *Astrovirus*, başlıca gıda kaynaklı virüsler arasında yer almakta; kabuklu deniz ürünleri, taze ve dondurulmuş meyve-sebzeler ile toplu tüketim alanlarında hazırlanan yemekler üzerinden bulaşabilmektedir (Pexara, Govaris, Pexara, & Govaris, 2020).

Gıda güvenliğini artırmak ve raf ömrünü uzatmak amacıyla son yıllarda gıda muhafaza yöntemlerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Soğutma ve dondurma gibi düşük sıcaklık uygulamaları, uçucu yağlar ve bakteriyosinler gibi kimyasal/biyokimyasal koruyucular (Batiha et al., 2021; Falleh,

Ben Jemaa, Saada, & Ksouri, 2020) ile vakum ve modifiye atmosferde paketlenme sistemleri (Wang et al., 2019) gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler, birçok gıdada bozulma etmenlerinin ve patojenlerin azaltılmasında etkili olmakla birlikte, her zaman tam eliminasyon sağlayamamaktadır. Çevresel koşulların veya proses basamaklarının oluşturduğu stres altında bazı patojenlerin metabolik olarak hasarlı hücreler şeklinde yaşamını sürdürebildiği; bu hücrelerin bir kısmında hasarın geri dönüşsüz, bir kısmında ise geri dönüşlü olabildiği bildirilmektedir. Ayrıca, bazı patojenlerin uyku halinde hücre formlarına geçerek canlılığını devam ettirebildiği; özellikle kültüre edilemeyen ancak canlı (viable but non-culturable, VBNC) hücreler ve persister hücreler gibi fizyolojik durumların gıda güvenliği açısından ayrı bir sorun alanı oluşturduğu vurgulanmaktadır (Aladhadh, 2023). VBNC hücreler, rutin besiyerlerinde ürememelerine karşın düşük düzeyde de olsa metabolik aktivite gösterebilen canlı hücrelerdir. Persister hücreler ise antibiyotiklere toleranslı, ancak klasik anlamda dirençli olmayan; metabolik aktiviteleri son derece düşük, canlılık testleriyle tespiti güç hücreler olarak tanımlanmakta ve uygun uyarılarla yeniden kültüre edilebilir hale gelebilmektedir (Foddai & Grant, 2020).

Gıda kaynaklı hastalıkların sıklığının günümüzde hâlâ yüksek seviyelerde seyretmesi, gıda üretim teknolojilerindeki ve gıda güvenliği sistemlerindeki tüm gelişmelere karşın, patojenlerin önemli bir halk sağlığı problemi olmaya devam ettiğini göstermektedir (Foddai & Grant, 2020). Bu durum, gıdalarda patojen varlığının duyarlı, hızlı ve güvenilir biçimde izlenmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu amaçla, kültüre dayalı yöntemlerin yanı sıra, kültürden bağımsız çok sayıda analitik yaklaşım gıda mikrobiyolojisi alanına kazandırılmıştır. Literatürde; klasik besiyeri ve zenginleştirme teknikleri ile birlikte Polimeraz Zincir

Reaksiyonu (PCR) ve türevleri (multiplex PCR, Real-Time PCR, Reverse Transcriptase PCR), DNA mikroarray, nükleik asit sekansına dayalı amplifikasyon (NASBA), yeni nesil dizileme (Next Generation Sequencing, NGS), immünolojik ve nanoteknoloji temelli yöntemlerin gıda kaynaklı patojenlerin tespitinde kullanımını ayrıntılı olarak irdeleyen çok sayıda derleme bulunmaktadır (Aladhadh, 2023; Saravanan et al., 2021).

Ne var ki bu derlemelerin büyük çoğunluğu, gıda kaynaklı patojenler içinde en sık karşılaşılan ve mevzuat açısından en çok çalışılan grup olmaları nedeniyle bakterilere odaklanmakta; diğer patojen grupları olan fungi ve virüsler genellikle kısaca ele alınmaktadır. Oysa fungal ve viral etkenler de gıda kaynaklı salgınlara yol açabilmekte ve en az bakteriler kadar dikkate alınması gereken halk sağlığı riskleri oluşturmaktadır. Bu bağlamda, mevcut çalışma; bakterilerin yanı sıra fungal ve viral patojenlere de eşit ağırlık vererek, özellikle PCR (endpoint PCR, multiplex PCR, RT-PCR vb.) ve NGS gibi özgül moleküler yöntemler çerçevesinde farklı gıda kaynaklı patojenlerin tespit ve tanımlanmasına ilişkin güncel bilgileri bütüncül biçimde ortaya koymayı amaçlamaktadır. Çalışmanın ilerleyen bölümünde, gıda kaynaklı hastalıkların görülme sıklığına ilişkin en güncel veriler özetlenmekte ve son yıllarda bildirilen bazı gıda kaynaklı salgın örnekleri sunularak, bu patojenlerin hâlen ciddi bir halk sağlığı riski oluşturduğu somut verilerle gösterilmektedir.

2. GIDA KAYNAKLI HASTALIK SALGINLARI

2.1. Bakteriler

Bakteriyel kaynaklı gıda enfeksiyon ve intoksikasyonları, tüm dünyada yaygın olarak görülen önemli bir halk sağlığı sorunudur. Örneğin Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) yılda en az 76 milyon gıda kaynaklı hastalık olgusunun ortaya çıktığı; bunların 128.000–325.000'inin hastaneye yatış, 3000–5000'inin

ise ölümle sonuçlandığı ve bu tablonun ülke ekonomisine yıllık 83 milyar dolara varan bir maliyet getirdiği tahmin edilmektedir (Mead et al., 1999; Ribot & Hise, 2016).

Avrupa Birliği (AB) verilerine göre ise, 2020 yılı özelinde 20.017 insan olgusu ve 3086 gıda kaynaklı salgın bildirilmiştir; bu salgınlarda özellikle *Salmonella* spp. (özellikle yumurta ve yumurta ürünlerinde) en sık saptanan bakteriyel etken olarak öne çıkmıştır. *Salmonella*'nın yanı sıra, *Campylobacter*, *Yersinia*, Shiga toksin üreten *Escherichia coli* (STEC) ve *Listeria monocytogenes* de 2020 yılında AB'de bildirilen gıda kaynaklı hastalıkların başlıca nedenleri arasında yer almıştır. Bu etkenler arasında *L. monocytogenes*'e bağlı enfeksiyonların, nispeten düşük vaka sayısına rağmen, en yüksek ölüm oranıyla seyreden hastalıklardan biri olduğu vurgulanmaktadır (Aladhadh, 2023).

Küresel ölçekte değerlendirildiğinde, gıda kaynaklı mikrobiyal patojenlere bağlı yaklaşık 3 milyon diyare olgusunun her yıl ortaya çıktığı tahmin edilmektedir (Ribot & Hise, 2016). Bunun yanında, Avustralya Sağlık Bakanlığı verilerine göre yalnızca Avustralya'da yılda 4,1 milyon gıda kaynaklı hastalık olgusu meydana geldiği bildirilmektedir (Hawksworth, 2001).

2.2. Fungiler

Bakteri ve virüslere kıyasla, fungal gıda kaynaklı patojenlere bağlı salgınlar oldukça seyrek görülmektedir. Bunun temel nedenlerinden biri, doğada bulunduğu tahmin edilen yaklaşık 1,5 milyon fungal türün yalnızca 300 kadarının insanlarda hastalık etkeni olarak tanımlanmış olmasıdır (Hawksworth, 2001) Buna rağmen, özellikle fungal ikincil metabolitler (toksinler) aracılığıyla ortaya çıkan ve çoğu zaman bağışıklık sistemi baskılanmış bireylerde (immünsüprese hastalar, organ nakli alıcıları, immünsüpresif tedavi alanlar) görülen önemli örnekler mevcuttur. Nadir de olsa, bağışıklık

sistemi sağlam (immünkompetan) bireylerde de gıda kaynaklı fungal enfeksiyonların ortaya çıkabildiği bildirilmektedir.

Örneğin 2013 yılında ABD’de, *Mucor circinelloides* ile kontamine yoğurtların tüketimi sonrası 200’den fazla kişide kusma, bulantı ve diyare ile seyreden gastroenterit vakaları bildirilmiştir (Aladhadh, 2023). Benzer şekilde, Hong Kong’da hastanelerde yatan 7 hastada, *Rhizopus microsporus* kaynaklı gıda zehirlenmesi vakaları rapor edilmiş; bu olguların, kontamine önceden paketlenmiş hazır tüketim yemekleri veya allopurinol tablet üretiminde kullanılan mısır nişastası ile ilişkili olabileceği ifade edilmiştir (Cheng et al., 2009).

Aspergillus, *Fusarium* ve *Mucor* gibi bazı iplikli küflerin kontamine gıdalarla alınması veya sporlarının inhalasyonu sonucunda, immünkompetan bireylerde bile sinüsler, akciğerler ve diğer organlarda lokalize enfeksiyonlara yol açabildiği bildirilmiştir (Paterson, Lima, Paterson, & Lima, 2017). Bununla birlikte, bu tür küflerin neden olduğu invaziv pulmoner enfeksiyonlar çoğunlukla immünsüpre hastalarda görülmekte, primer bulaş yolu çoğu zaman inhalasyon olmakla birlikte, gastrointestinal yolun da enfeksiyonda rol oynayabildiği vurgulanmaktadır. Bu nedenle, özellikle bağışıklığı baskılanmış hastaların, fungusla kontamine olma olasılığı yüksek gıdalardan kaçınması gerektiği belirtilmektedir (Paterson et al., 2017).

2.3. Virüsler

Viral gıda zehirlenmeleri ve gıda kaynaklı viral salgınlar, sayısal olarak bakteriyel salgınlara göre daha az bildirilmesine karşın, önemli bir yük oluşturmaktadır. Gıda kaynaklı viral patojenler arasında özellikle *Noroviruslar* ve *Hepatit A* virüsü, insanlarda en sık hastalık oluşturan etkenler olarak tanımlanmaktadır. *Norovirus*’ların yalnızca ABD’de yılda yaklaşık 21 milyon akut gastroenterit olgusuyla ilişkili olduğu bildirilmiştir (Benedict, Chiller, & Mody, 2016).

AB verilerine göre 2020 yılında, özellikle kabuklular, yumuşakçalar ve bunlardan elde edilen ürünlerde *Norovirus* kaynaklı gıda salgınları ön plandadır (Aladhadh, 2023). Genel olarak bakıldığında, enterik virüslerin, gıda kaynaklı hastalık salgınlarının AB’de yaklaşık %13’ünden, ABD’de ise yaklaşık %45’inden sorumlu olabileceği öne sürülmektedir (Yeargin & Gibson, 2019).

Son yıllarda bildirilen bazı önemli *Norovirus* salgınları arasında; 2018 Kış Olimpiyatları’nda Güney Kore’de görülen 194 olguluk gastroenterit salgını, 2017 yılında Kanada’da dondurulmuş ahududu tüketimi ile ilişkili yaklaşık 700 olguluk salgın ve 2017’de Royal Caribbean kruvaziyer hattında ortaya çıkan *Norovirus* salgını yer almaktadır (Miranda & Schaffner, 2019). Literatür taramaları, 2014 yılında AB’de bildirilen tüm gıda kaynaklı salgınların yaklaşık %20’sinin viral etkenlerle ilişkili olduğunu göstermektedir (Aladhadh, 2023).

Daha spesifik örnekler arasında; 2011 yılında ABD’de kontamine nar tanelerinin tüketimiyle ilişkili 162 *Hepatit A* olgusu, 2012 yılında Çin’de dondurulmuş çilek tüketimine bağlı bildirilen 1100’ün üzerinde *Norovirus* olgusu sayılabilir. Ayrıca, 2020 yılında AB’de, gıda kaynaklı patojenler arasında *Batı Nil* virüsüne bağlı hastalıkların, insan ölümlerinin en yüksek olduğu etkenlerden biri olduğu rapor edilmiştir (Aladhadh, 2023). Bu veriler, gıda kaynaklı viral patojenlerin hem sporadik olgular hem de geniş çaplı salgınlar açısından dikkate değer bir halk sağlığı riskini temsil etmeye devam ettiğini göstermektedir.

3. GIDA KAYNAKLI PATOJENLERİN TESPİT YÖNTEMLERİ

Gıda matrislerinde patojenlerin duyarlı ve tekrarlanabilir biçimde tespit edilmesi, gıda güvenliği açısından temel bir gerekliliktir. Ancak düşük düzeyde hedef mikroorganizma

bulunması, gıdanın doğal mikroflorası ve bileşenlerinin interferansı ile gıdadan mikroorganizma ekstraksiyonundaki teknik güçlükler, bu süreci zorlaştırmaktadır.

Bu amaçla gıda mikrobiyolojisinde başlıca dört yöntem grubu kullanılmaktadır:

- Kültüre dayalı yöntemler,
- İmmünolojik testler,
- Nükleik asit temelli yöntemler (özellikle PCR ve türevleri),
- Yeni nesil dizileme (NGS) yaklaşımları.

Bununla birlikte, bu yöntemlerin başarısı yalnızca kullanılan analiz tekniğine değil, aynı zamanda doğru örnekleme ve uygun saklama koşullarına bağlıdır. Örnekleme planı; gıdanın türüne, hedeflenen mikroorganizma grubuna ve uygulanacak tespit yöntemine göre şekillenmelidir. Özellikle kültür izolasyonuna dayalı yöntemlerde, numune alma ve analiz süreçlerinin FDA, FSIS/USDA, ISO ve AOAC gibi resmî kuruluşlar tarafından onaylanmış standart protokollere uygun yürütülmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Diğer yöntemler için de kit ve cihaz üreticilerinin sağladığı standart prosedürler, analizin doğru uygulanması ve sonuçların güvenilir yorumlanması açısından belirleyici öneme sahiptir.

3.1. Kültüre Dayalı Yöntemler

Kültüre dayalı yöntemler, daha modern teknikler geliştirilmiş olsa da gıda kaynaklı patojenlerin tespitinde hâlâ referans yöntem olarak kabul edilmektedir (Altayb, Badri, Chaieb, & Moglad, 2023; Park et al., 2023). Temel prensip, bakteri ve fungusların uygun besiyerlerinde çoğalarak görülür koloni oluşturmaları ve bu kolonilerin gerekirse ileri tanımlama testlerine (koloni morfolojisi, Gram boyama, biyokimyasal

testler, MALDI-TOF MS, PCR–sekanslama vb.) tabi tutulmasıdır (Foddai & Grant, 2020; Martinović, Andjelković, Gajdošik, Rešetar, & Josić, 2016). Bu yöntemlerle hem nitel (var/yok) hem de nicel (sayım) veriler elde edilebilir; ayrıca izole edilen suşlar sonraki analizlerde (direnç, tip tayini vb.) kullanılabilir.

Bununla birlikte kültüre dayalı yöntemlerin önemli sınırlılıkları vardır. Tüm mikroorganizmalar kültüre edilebilir değildir ve bazı türler (örn., *Salmonella typhi*, *E. coli*) stres koşullarında VBNC (viable but non-culturable) forma geçerek standart besiyerlerinde üreyemeyebilir; bu da patojen varlığının olduğundan düşük tahmin edilmesine veya hiç saptanamamasına yol açabilir (Foddai & Grant, 2020; Gill, 2017). Ayrıca kültür, çok basamaklı, yavaş ve emek yoğun bir süreçtir; bakteriler için sonuç alma süresi çoğu zaman birkaç günü, funguslarda ise daha uzun süreleri bulur (Law, Ab Mutalib, Chan, & Lee, 2015b). Bu nedenle, hızlı veya yerinde (on-the-spot) tespit gereken durumlarda tek başına yeterli değildir ve genellikle moleküler ya da immünolojik yöntemlerle desteklenmesi gerekmektedir (Aladhadh, 2023).

Gıda kaynaklı hastalıklarla en sık ilişkilendirilen bakteriyel gruplar arasında *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Yersinia*, *Salmonella*, *Campylobacter*, *Clostridium*, *Enterobacteriaceae* ve *Bacillus* türleri yer almakta; bu patojenler doğrudan gıda içerisinde çoğalarak ya da ürettikleri toksinler aracılığıyla hastalık oluşturmakta ve çoğunlukla süt ve süt ürünleri, kanatlı eti, sığır eti ve bunlardan üretilen hazır tüketime yönelik (RTE) ürünler üzerinden insana bulaşmaktadır (Aladhadh, 2023). Uygun besiyerleri kullanıldığında bu bakteriler kültüre edilebilmekle birlikte, VBNC fazına geçmiş hücrelerin klasik kültürle saptanamaması nedeniyle yalnızca kültüre dayalı yaklaşımların duyarlılığı sınırlıdır. Dolayısıyla kültür esaslı yöntemler tek başına kullanıldığında hem iş gücü yoğun hem de tüm bakteri popülasyonunu temsil etmeyen, kısmî

bir tablo sunar. Bu nedenle güncel eğilim, kültüre dayalı yöntemlerin nükleik asit temelli ve diğer moleküler yöntemlerle (PCR, immünoassay, NGS, biyosensörler, MALDI-TOF MS vb.) birlikte kullanılması yönündedir. Böylece hem kültüre edilebilen hem de normalde kültürle zor yakalanan hedeflerin daha hızlı ve güvenilir biçimde tanımlanması mümkün olmakta; klasik yaklaşımlarla yaklaşık bir haftayı bulan identifikasyon süresi 3 günün altına indirilebilmektedir. Özellikle MALDI-TOF MS, zorlu (fastidious) bakterilerin tanımlanmasında PCR ve NGS temelli yöntemlere göre daha hızlı, ayrıca NGS'ye kıyasla görece daha düşük maliyetli bir tanı aracıdır (Rychert, 2019; Singhal, Kumar, Kanaujia, & Virdi, 2015). Yöntem, izole edilen bakteri kültürlerinden peptit kütle parmak izi (PMF) oluşturulması ve bunun seçilmiş veri tabanlarındaki referans profillerle karşılaştırılmasına dayanır. Son yıllarda MALDI-TOF MS; kıymadan *S. typhimurium* (Aladhadh, 2023), Orta Doğu kökenli bir yemek olan Matazeez'den *C. jejuni*, *E. coli* ve *Enterobacter cloacae* (Elbehiry et al., 2017), Mısır'daki market ve mağazalardan temin edilen balık, et ve süt ürünlerinden *E. coli*, *S. typhimurium*, *Klebsiella*, *Enterobacter* ve diğer patojenler (Khater, Lela, El-Diasty, Moustafa, & Wareth, 2021), Pekin'de taze sebzelerden *E. coli*, *S. typhimurium*, *S. aureus*, *C. jejuni*, *Klebsiella*, *L. monocytogenes* (Xu et al., 2021), Suudi Arabistan'da salata, burger ve tortillalardan (Elbehiry et al., 2017) ve Türkiye'de halk pazarlarından alınan çiğ süttten (Cebeci, 2019) benzer patojenlerin tanımlanmasında başarıyla kullanılmış; ayrıca bebek mamaları ve takviyelerinden *C. difficile* ve *C. perfringens* izolasyon ve tanımlamasında da etkinliği gösterilmiştir (Sulaiman, Miranda, & Simpson, 2021). Tüm bu bulgular, sınırlılıklarına rağmen kültür yöntemlerinin MALDI-TOF MS ile birleştirildiğinde gıda kaynaklı patojen bakterilerin izolasyonu ve hızlı tanımlanmasında güncel ve güçlü bir yaklaşım sunduğunu ortaya koymaktadır.

Fungiler ve bunların metabolitleri (özellikle mikotoksinler), kontamine gıdaların tüketimiyle insanlara bulaşabilmektedir. Kültüre dayalı tespit yaklaşımlarında, fungal kolonilerin besiyerinde görünür hale gelmesi çoğu zaman 7 güne kadar sürebilmekte, bu durum hızlı tanı gerektiren durumlar için önemli bir kısıt oluşturmaktadır. Bu nedenle güncel uygulamalarda, fungal patojenlerin tespiti ve identifikasyonu için kültüre dayalı yöntemler çoğunlukla PCR, immünoassay, MALDI-TOF MS ve NGS gibi tekniklerle birlikte kullanılmaktadır (Quéro et al., 2019). Özellikle MALDI-TOF MS, belirli başlı fungal grupların tanımlanmasında başarıyla uygulanmış; bu yöntemle *Rhizopus*, *Aspergillus*, *Fusarium* ve *Mucor* gibi temel gruplar tanımlanabilmiş; ayrıca olası gıda patojenleri olan *A. niger*, *A. flavus* ile *Alternaria alternata*, *Penicillium digitatum* ve *Candida albicans* gibi türler, Suudi Arabistan'ın Al-Qassim bölgesindeki restoranlardan temin edilen salata, burger, tortilla, peynir, kabsa ve jareesh gibi ürünlerde tespit edilmiştir (Elbehiry et al., 2017). Bunun yanında *Mucor* türleri (Aladhadh, 2023), gıda kaynaklı mayalar (Quintilla et al., 2018) ve fermente gıdalardaki fungiler (Ahmadsah, Kim, Jung, & Kim, 2018) de MALDI-TOF MS kullanılarak tanımlanmıştır. Buna karşın MALDI-TOF MS'in fungiler için kullanımı, bakterilere kıyasla hâlâ daha sınırlıdır; bunun temel nedenleri arasında kapsamlı ve küratörlüğü yapılmış fungal spektrum veri tabanlarının görece azlığı ve yöntemin fungilere özgü adaptasyonunun henüz istenen düzeyde olmaması yer almaktadır (Aladhadh, 2023).

Gıda kaynaklı viral enfeksiyonlar arasında *Noroviruslar* ve *Hepatit A* virüsü, en sık görülen etkenler olarak öne çıkmaktadır (Aladhadh, 2023). *Noroviruslar*, *Rotavirus* ve *Astrovirus* ile birlikte genellikle akut gastroenterit tablosuna yol açarken; gıda kaynaklı *Hepatit* virüsleri *Hepatit A* veya *E* klinik hepatit tablosu oluşturmakta, enterovirüsler ise el-ayak-ağız

hastalıkları, menenjit/ensefalit ve kalp tutulumları gibi farklı klinik tablolar oluşturabilmektedir. Bu virüsler; kabuklu deniz ürünleri (istiridye, midye, diğer yumuşakçalar), balık, süt, taze meyve ve sebzeler gibi gıdaları kontamine edebilmekte; bulaş çoğunlukla fekal–oral yolla, virüs yüklü damlacıkların inhalasyonu ya da kontamine yüzeylerle temas sonucu gerçekleşmektedir (Pexara et al., 2020; Su, Liang, & Tan, 2021). Önemli bir istisna olarak *Hepatit E* virüsü, daha çok çiğ veya az pişmiş et ve karaciğer tüketimiyle ilişkilendirilmektedir (Pexara et al., 2020). Gıdalarda virüs tespiti, klasik olarak numuneden elde edilen ekstraktların hücre kültürlerinde çoğaltılması ve virüsün neden olduğu sitopatik etkilerin gözlenmesiyle gerçekleştirilebilir (Miranda & Schaffner, 2019). Ardından TCID₅₀, plak sayım testi veya en olası sayı (MPN) yaklaşımlarıyla kantitasyon yapılabilir (Bosch et al., 2011). Ancak bu kültüre dayalı yöntemlerin kullanımını sınırlayan önemli faktörler vardır: gıdalarda viral yükün genellikle çok düşük olması nedeniyle yüksek duyarlılıklı ön zenginleştirme basamaklarına ihtiyaç duyulması (Chhabra & Vinjé, 2016), kültür sürelerinin günler alması, bazı virüslerin (örn., *Noroviruslar*) belirgin sitopatik etki göstermemesi ve bazı gıda kaynaklı virüsler için uygun hücre kültürü sistemlerinin bulunmaması (Bosch et al., 2011; Miranda & Schaffner, 2019). Bu nedenle, daha az emek yoğun, yüksek duyarlılık ve özgüllüğe sahip RT-PCR ve RT-qPCR gibi moleküler yöntemler günümüzde viral tespit için çok daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kültür temelli yaklaşımlar hâlâ bazı virüsler için önemini korumaktadır. Örneğin, halk sağlığı açısından ciddi risk oluşturan *Avian İnfluenza* Virüsleri (*H7N9*, *H5N8*) yabani kuşlar, kümes hayvanları ve ördeklerde; numunelerin homojenize edilip embriyolu tavuk yumurtalarında 2–5 gün inkübe edilmesi ve ardından hemagglütinasyon testi ile doğrulanması yoluyla tespit edilebilmektedir (Dai, Yan, Huang, Zhao, & Liao, 2022; Zhang et al., 2021). Bazı durumlarda kültür yöntemleri, plak testi ve

entegre hücre kültürü–RT-qPCR ile kombine edilmekte; önce hücre kültüründe çoğaltılan virüsün varlığı ve düzeyi daha sonra RT-qPCR ile belirlenmektedir. Bu yaklaşıma örnek olarak, insan adenovirüsünün (HAdV) marul, soğan ve çilek gibi taze ürünlerde plak testi ve entegre hücre kültürü–RT-qPCR kombinasyonu ile başarıyla tespit edilmesi verilmektedir (Marti & Barardi, 2016). Tüm bu örnekler, moleküler yöntemlerin baskın rolüne rağmen, belirli virüsler için kültür ve moleküler tekniklerin entegrasyonunun hâlâ değerli ve tamamlayıcı bir araç olduğunu göstermektedir.

3.2. İmmünolojik Testler

Gıda kaynaklı patojenlerin ve toksinlerinin tespitinde kullanılan başlıca immünolojik yöntemler; serotiplendirme, immunofloresans, lateral akış testleri (LFD) ve özellikle Enzyme-Linked Immunosorbent Assay (ELISA)’dır. Bu yöntemler, mikrobiyal antijenler ile bunlara özgü antikorlar arasındaki yüksek afinite prensibine dayanır ve bu etkileşim, patojenlerin hızlı ve özgül biçimde saptanması için kullanılır (Oluwaseun et al., 2018).

İmmünoassay’lerin temel avantajları;

- Kültüre dayalı yöntemlere kıyasla daha hızlı olmaları,
- Uygulamasının görece kolay olması,
- Toksinleri de tespit edebilmeleri (örn., enterotoksinler, mikotoksinler),
- Yüksek özgüllük sağlayabilmeleridir.

Buna karşın, reaksiyon ortamının kontaminasyonu yanlış pozitif sonuçlara yol açabilmekte ve bu da önemli bir sınırlılık olarak belirtilmektedir (Aladhadh, 2023). Günümüzde özellikle ELISA ve LFD’ler, gıda kaynaklı mikroorganizmalar ve toksinlerinin tespitinde en yaygın kullanılan immünolojik

yöntemlerdir (Agriopoulou, Stamatelopoulou, & Varzakas, 2020; Law et al., 2015b). ELISA, bazı çalışmalarda PCR ile kombine (PCR–ELISA) edilerek hem duyarlılık hem de özgüllüğü artırmıştır. Omori ve ark (2018) PCR–ELISA yaklaşımı ile gerçekleştirdikleri bir çalışmada, kontamine mısır örneklerinde *Fusarium verticillioides* tespitinde klasik PCR’ye kıyasla yaklaşık 100 kat daha yüksek duyarlılık sağlandığını bildirmişlerdir.

ELISA; *Salmonella*, *Campylobacter*, *E. coli*, *Listeria* gibi önemli bakteriyel patojenlerin yanı sıra,

- Et, süt, makarna ve yumurtada *Salmonella* spp. (Di Febo et al., 2019; S. Wang et al., 2015),
- Çeşitli gıda örneklerinde *Campylobacter* (Khan, Rathore, Abulreesh, Qais, & Ahmad, 2018),
- Lahana ve sığır etinde *E. coli* O157:H7 (Pang et al., 2018; Zhao et al., 2020),
- Deniz ürünlerinde *Vibrio parahaemolyticus* (Kumar et al., 2011),
- Sütte *Listeria* spp. (Tu et al., 2016)

gibi pek çok hedef için başarıyla uygulanmıştır. Ayrıca *Stafilokok* enterotoksinleri (Nagaraj, Ramlal, Kingston, & Batra, 2016), *Botulinum* toksinleri (et ve sütte) (Stanker et al., 2013), *Shiga* toksinleri (Valderrama, Dudley, Doores, & Cutter, 2016) ve *B. cereus* enterotoksinleri (Rajkovic et al., 2020) gibi bakteriyel toksinlerin saptanmasında da yoğun şekilde kullanılmaktadır. Mikotoksin ve toksijenik fungusların tespiti için geliştirilen ELISA ve PCR–ELISA kitleri (örn., patojenik *F. verticillioides* için) yanında, aflatoksin B₁’in depolanmış mısırdaki (Hassan, Jibouri, & Hashim, 2014), düşük düzey aflatoksinlerin kuru balık (Ounleye & Olaiya, 2015), yer fıstığı (Oplatowska-Stachowiak et al., 2016) ve soya sütünde (Aladhadh, 2023) belirlenmesinde de etkin

sonuçlar vermiştir. LFD'ler de özellikle aflatoksin, deoksinivalenol ve fumonisinler gibi mikotoksinlerin mısır ve arpa gibi ürünlerde hızlı taramasında kullanılmaktadır (Agriopoulou et al., 2020).

Virüsler açısından immünoassay'ler, gıda kaynaklı örneklerden çok daha sık olarak klinik ve çevresel numunelerde, nokta-temelli tanı (point-of-care) ve halk sağlığı surveyans amaçlı kullanılmaktadır (Wu et al., 2020). Tarihsel olarak *Adenovirüs*, grup A *Rotavirus* ve *Astrovirus* tespiti için ELISA kitleri geliştirilmiş ve gıdalarda da uygulanmıştır (Aladhadh, 2023). Ancak günümüzde, daha hızlı ve daha duyarlı oldukları için nükleik asit temelli yöntemler (özellikle RT-PCR/RT-qPCR) viral tespitte immünolojik testlerin büyük ölçüde yerini almış durumdadır.

3.3. Nükleik Asit Bazlı Yöntemler (Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PCR) ve Varyantları (PCR, RT-PCR vb.)

PCR ve varyantları, gıda kaynaklı patojen mikroorganizmaların DNA veya RNA'sına özgü dizilerin çoğaltılmasına dayanan nükleik asit temelli yöntemlerdir. Hedef mikroorganizmaya özgü primerler kullanılarak ilgili gen bölgesi ekponansiyel olarak amplifiye edilir; bu nedenle PCR, kültüre dayalı ve çoğu immünolojik yöntemle kıyasla daha hızlı, daha duyarlı, yüksek derecede tekrarlanabilir ve çok yönlü bir yaklaşım olup, gıda patojenlerinin tespitinde sıklıkla tercih edilmektedir (Priyanka, Patil, & Dwarakanath, 2016). PCR, gıdadan doğrudan ekstrakte edilen nükleik asitlerde ya da gıdadan izole edilen mikroorganizma kültürlerinde uygulanabilmektedir. PCR ve varyantlarının temel prensipleri, avantaj ve kısıtlılıkları ayrıntılı biçimde derlenmiştir (Law et al., 2015b; Muhamad Rizal et al., 2020; Priyanka et al., 2016).

Bu yaklaşımın çok sayıda varyantı geliştirilmiştir (nested, touchdown, hot-start vb.). Nested PCR, iki ardışık reaksiyonda iki primer seti kullanarak düşük düzeydeki hedef patojenleri yakalamayı amaçlar (Mancini, Murolo, & Romanazzi, 2016). Touchdown PCR, yüksek başlangıç bağlanma sıcaklıkları ile non-spesifik amplifikasyonu azaltır (Aladhadh, 2023). Multiplex PCR, aynı reaksiyonda birden fazla patojene yönelik primer setlerinin kullanılmasıyla çoklu tespiti mümkün kılar (Singhal et al., 2015). RT-PCR, RNA'dan cDNA sentezleyip bunu çoğaltarak metabolik olarak aktif mikroorganizmaların veya RNA virüslerinin tespitine imkân verir (Aladhadh, 2023). Gerçek zamanlı / kantitatif PCR (qPCR) ise floresan boyalar veya probalar kullanarak amplifikasyonu anlık izler ve patojen yükünün kantitatif olarak belirlenmesini sağlar (Mancini et al., 2016). RT-qPCR, RNA'nın cDNA'ya dönüştürülmesini takiben gerçek zamanlı amplifikasyonla hem nitel hem kantitatif analiz yapılmasına olanak tanır (Aladhadh, 2023). Droplet digital PCR (ddPCR) ise reaksiyon karışımını binlerce damlacığa bölerek standart eğri gereksinimi olmadan mutlak kantitasyon sağlayan bir diğer varyanttır (Olmedillas-López, García-Arranz, & García-Olmo, 2017). LAMP (Loop-Mediated Isothermal Amplification) ise sabit sıcaklıkta yaklaşık bir saat içinde klasik PCR'den daha fazla kopya üreterek ($\approx 10^9$ kopya) hızlı amplifikasyon sağlar (Soroka et al., 2021).

DNA'ya dayalı klasik ve varyant PCR yaklaşımları (endpoint PCR, nested PCR, multiplex PCR vb.), hedef patojenin canlı olup olmadığı hakkında doğrudan bilgi vermez; ancak *Salmonella* spp., *Campylobacter* spp., *E. coli* O157:H7, *S. aureus*, *B. cereus*, *L. monocytogenes* ve *V. parahaemolyticus* gibi pek çok önemli bakteriyel patojenin farklı gıdalarda (Kore RTE gıdaları, peynir, süt, et, yumurta, salata, balık vb.) tespiti için başarıyla kullanılmıştır (Carvalho et al., 2014; Lee et al., 2014; Moezi, Kargar, Doosti, & Khoshneviszadeh, 2019; Pires, Dong,

Yang, & da Silva, 2021; Pires et al., 2021; Samad et al., 2018; Vinayaka et al., 2019). Gerçek zamanlı PCR (qPCR), bu patojenlerin (*Salmonella*, *E. coli*, *Campylobacter*, *L. monocytogenes*, *C. perfringens*, *S. aureus*, *Vibrio* spp.) et, süt ürünleri, kanatlı eti, balık ve sebzelerdeki miktarının belirlenmesinde klasik ve multiplex PCR'ye göre daha yaygın kullanılan yöntem haline gelmiştir (Azimirad et al., 2021; Bai et al., 2022; Bonnin-Jusserand et al., 2019; Cao et al., 2019; Chin, Salihah, Shivanand, & Ahmed, 2022; Heo, Kim, Suh, & Moon, 2022; Yang et al., 2020).

RT-PCR ise, teorik olarak canlılık göstergesi sayılabilecek mRNA'yı hedeflese de, mRNA'nın gıda matrisinde hızlı degradasyonu ve yöntemin emek yoğun olması nedeniyle bakteriler için qPCR kadar yaygın değildir (Foddai & Grant, 2020). Yine de; yapay kontamine biberlerde *S. typhimurium* ve kontamine yumurta ile sütte *S. enterica* tespitinde kullanılmıştır (Aladhadh, 2023).

Canlı-ölü ayrımını mümkün kılmak amacıyla geliştirilen viable PCR (vPCR) yaklaşımında, örnekler EMA veya PMA gibi interkale boyalarla ön işleme tabi tutulur; bu boyalar yalnızca membranı bozulmuş (ölü) hücrelere girerek DNA'yı bloke eder ve böylece PCR amplifikasyonu yalnızca canlı hücrelere ait DNA'dan oluşur (Chen et al., 2022). vPCR, canlı *Salmonella* spp.'nin domuz eti ve RTE salatada (Thanh, Agustí, Mader, Appel, & Codony, 2017) ve *Helicobacter pylori*'nin perakende domuz etinde tespitinde (De Cooman et al., 2013); vPCR-qPCR kombinasyonu ise dondurulmuş ve soğutulmuş kanatlı etinde canlı *Campylobacter* spp. (Castro et al., 2018) ve et, salata, peynir, sütte *Listeria* spp.'nin doğru tespit ve kantitasyonunda kullanılmıştır (Agustí, Fittipaldi, & Codony, 2018).

Fungal patojenlerin gıdalarda PCR ile tespitine dair bildirimler bakterilere göre daha sınırlı olmakla birlikte,

aflatoksijenik *Aspergillus*, *Penicillium* ve *Fusarium* gibi mikotoksijenik türlerin tespiti için endpoint PCR, real-time PCR, nested PCR, RT-qPCR, LAMP ve multiplex PCR gibi pek çok varyant uygulanmıştır (H. Ur Rahman et al., 2020). Örneğin multiplex PCR ile Kore’ye özgü fermente soya başlangıç kültürü “meju”da aflatoksijenik *Aspergillus* izolatları ayrıştırılmış (Kim, Chung, & Chun, 2011), kontamine mısır tozunda *Aspergillus*–*Penicillium*–*Fusarium* birlikte tespit edilmiştir (Hamid Ur Rahman et al., 2020); RT-PCR ile patulin üreten *P. expansum* elmalarda (Tannous et al., 2015), LAMP ile ochratoksin A üreten *P. nordicum* kuru fermente etlerde (Ferrara et al., 2015), PCR-DGGE–sekanslama kombinasyonu ile da şarapta ochratoksin üreten *A. niger* izlenmiştir (Laforgue et al., 2009).

Viral patojenlerde RT-PCR, RT-qPCR, dijital RT-PCR ve kantitatif RT-PCR, gıda örneklerinde virüs tespiti için yaygın biçimde kullanılmaktadır (Bosch et al., 2011). Virüsler, öncelikle gıda matrisinden ekstrakte ve konsantre edildikten sonra bu yöntemlerle analiz edilir; yöntemler hem doğrudan gıda ekstraktlarına hem de hücre kültürü ile kombine protokollere (entegre hücre kültürü–RT-qPCR) uygulanabilir (Miranda & Schaffner, 2019). Ancak ekstraksiyon verimsizliği, matristen gelen inhibitörler ve enfektif/inefektif partiküllerin ayrımının yapılamaması önemli sınırlılıklardır (Sánchez & Bosch, 2016). Bu sorunu azaltmak için RT-(q)PCR öncesi PMA/EMA ile ön işlem kullanılarak, enfektif *Hepatit A* ve *Rotavirus* partiküllerinin non-enfektif partiküllerden ayrılabilirdiği gösterilmiştir (Coudray-Meunier, Fraisse, Martin-Latil, Guillier, & Perelle, 2013). RT-PCR, midyelerde *Hepatit A* ve *Norovirus* prevalansının gösterilmesinde (La Bella et al., 2017), domuz karaciğer sosislerinde ve perakende ürünlerde *Hepatit E* virüsünün saptanmasında (Althof et al., 2019) ve sığır, domuz, kanatlı etlerinde *Adenovirus*, *Hepatit E* ve *Rotavirus* prevalansının belirlenmesinde kullanılmıştır (Soares et al., 2022). Mikroakışkan

sistemlerle birleştirilen dijital RT-PCR ise yumuşak meyveler ve marul gibi düşük kontaminasyon düzeyine sahip ürünlerde *Norovirus* ve *Hepatit A* tespitinde duyarlılığı artırmış, PCR inhibisyonunu azaltmıştır (Fraissee et al., 2017).

3.4. Yeni Nesil Dizileme (NGS) Yöntemleri

Yeni nesil dizileme (Next-Generation Sequencing, NGS) ve buna eşlik eden biyoenformatik analizler, gıda güvenliğinde hem araştırma hem de sürveyans açısından güçlü bir araç haline gelmiştir. NGS, başlıca iki şekilde kullanılmaktadır: (i) tüm genom dizileme (Whole Genome Sequencing, WGS) ile tek bir izolatın tüm genomunun ortaya konması ve (ii) metagenomik yaklaşımlarla bir örnekte bulunan çok sayıdaki mikroorganizmanın (bakteri, fungi, virüs) birlikte dizilenmesi. Metagenomik uygulamalarda, 16S rRNA, ITS veya diğer biyolojik belirteçler kullanılarak belirli mikrobiyal gruplar hedeflenebilmektedir (Desdouits et al., 2020).

NGS, gıda kaynaklı bakteriyel patojenlerin tespiti, karakterizasyonu ve sürveyansında yaygınlaşmaktadır. Taze ürünlerde *Salmonella* ve *Norovirus*'un yerine model virüs olarak kullanılan MS2 fajının varlığı farklı NGS yaklaşımlarıyla araştırılmış; ScriptSeq tabanlı RNA-seq yöntemi, *Salmonella* için 10^4 CFU/reaksiyon ve MS2 için 10^5 PFU/reaksiyon düzeyinde en duyarlı yöntem olarak bildirilmiştir (Lewis, Hudson, Cook, Barnes, & Haynes, 2020). WGS, gıda kaynaklı salgınlarda *L. monocytogenes* suşlarının izlenmesinde (Law, Ab Mutalib, Chan, & Lee, 2015a), Şiga toksin üreten *E. coli*'nin spinat yapraklarında shot-gun metagenomik ile ≈ 10 CFU/100 g düzeyinde saptanmasında kullanılmıştır (Aladhadh, 2023). Ayrıca, RT-PCR veya multiplex PCR ile önceden pozitifliği gösterilmiş örneklerde, Illumina tabanlı NGS ile *S. sonnei*, *L. monocytogenes*, *C. jejuni*, *S. enterica* ser. Enteritidis, *S. aureus*, *E. coli*, *Y. enterocolitica* gibi patojenler et, süt, deniz ürünleri ve

sebzelerden doğrulanmıştır (Miralles et al., 2019). WGS, bu bağlamda gıda kaynaklı patojenlerin filogenetik karakterizasyonu ve sürveyansında kritik bir araç olarak öne çıkmaktadır (Moran-Gilad, 2017).

Fungal patojenlerde NGS kullanımı, bakterilere göre daha sınırlı olmakla birlikte, klinik ve bazı çevresel örneklerde tespit ve tanımlama amacıyla uygulanmıştır (Jiang et al., 2022). Gıda kaynaklı virüslerde ise NGS genellikle diğer yöntemlerle (özellikle RT-PCR/RT-qPCR) pozitifliği gösterilmiş örneklerin doğrulanması ve genotiplendirilmesi için kullanılmaktadır. Örneğin; tavuk ve ördek et ürünlerinde tespit edilen *Avian Influenza* virüsleri WGS ile filogenetik olarak karakterize edilmiş (Cui et al., 2022); Almanya'da 2012'de gerçekleşen dondurulmuş çilek kaynaklı *Norovirus* salgınında, RT-qPCR ve dPCR ile birlikte metagenomik NGS kullanılarak *Norovirus* genotipi doğrulanmıştır (Bartsch, Höper, Mäde, & Johne, 2018). Benzer şekilde, RT-PCR kereviz, ıstiridye, marul, maydanoz ve çilek örneklerinde *Norovirus* ve/veya *Hepatit A* virüslerinin varlığı ve genetik çeşitliliği metagenomik ve amplicon tabanlı NGS ile ayrıntılı biçimde ortaya konmuştur (Imamura et al., 2017; Itarte et al., 2021). Bu uygulamalar, NGS'in gıda kaynaklı virüslerin hem tespitinde hem de ayrıntılı moleküler tiplenmesinde tamamlayıcı ve yüksek çözünürlüklü bir araç olduğunu göstermektedir.

4. SONUÇLAR VE GELECEK YÖNELİMLER

Bu derlemede, gıda kaynaklı patojenlerin tespitinde kullanılan dört temel yaklaşım – kültüre dayalı yöntemler, immünolojik yöntemler, nükleik asit temelli (PCR) yöntemler ve yeni nesil dizileme (NGS) temelli yöntemler – karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Kültüre dayalı yöntemlerin, MALDI-TOF MS ve nükleik asit temelli teknikler (özellikle bakteriler için

gerçek zamanlı PCR, funguslar için RT-PCR) ile birlikte kullanılması durumunda, başta bakteriyel ve fungal patojenler olmak üzere birçok gıda kaynaklı etkenin hızlı ve güvenilir şekilde tespit ve identifikasyonunda oldukça etkili olduğu vurgulanmaktadır.

Güncel uygulamalarda, patojen tespiti için gerçek zamanlı PCR ve vPCR gibi nükleik asit temelli yöntemlerin, gerektiğinde dizileme ile birleştirilerek, immünolojik ve NGS temelli yaklaşımlara göre daha yaygın kullanıldığı belirtilmektedir. Bununla birlikte, NGS temelli yaklaşımlar (özellikle metagenomik), gıda kaynaklı patojenlerin genotipi, çeşitliliği ve aktiviteleri hakkında benzersiz düzeyde ayrıntı sunmakta; sürveyans, izleme, iz sürme (tracing), tarama ve tanımlama süreçlerinde önemli bir potansiyel taşımaktadır. Bu sayede, gıda zincirinde daha erken dönemde tespit edilen patojenlerin yol açabileceği salgınların daha etkin yönetilmesi ve halk sağlığının güçlendirilmesi mümkün olabilecektir.

Mevcut ve gelecekteki çalışmaların;

- Mevcut moleküler ve genomik araçların gıda denetimi ve resmî kontrol sistemlerine daha etkin entegrasyonu,
- Bu yöntemlerin uygulamasına yönelik gıda güvenliği ve sürveyans personelinin eğitimi,
- Ve gıda kaynaklı patojenlerin kontrolü ve eliminasyonu için yeni yaklaşımların geliştirilmesi (örn., bakteriyofaj temelli biyokontrol stratejileri)

üzerinde yoğunlaşması gerektiği düşünülmektedir. Bu çerçevede, çoklu yöntem kombinasyonları (kültür + PCR + NGS vb.) ve hedefe yönelik biyokontrol araçları, gelecekte gıda kaynaklı patojenlerle mücadelede temel bileşenler arasında yer alacaktır.

KAYNAKÇA

- Agriopoulou, S., Stamatelopoulou, E., & Varzakas, T. (2020). Advances in Analysis and Detection of Major Mycotoxins in Foods. *Foods*, 9(4), 518. <https://doi.org/10.3390/foods9040518>
- Agustí, G., Fittipaldi, M., & Codony, F. (2018). Optimization of a Viability PCR Method for the Detection of *Listeria monocytogenes* in Food Samples. *Current Microbiology*, 75(6), 779–785. <https://doi.org/10.1007/s00284-018-1448-6>
- Ahmadsah, L. S. F., Kim, E., Jung, Y.-S., & Kim, H.-Y. (2018). Identification of LAB and Fungi in Laru, a Fermentation Starter, by PCR-DGGE, SDS-PAGE, and MALDI-TOF MS. 28(1), 32–39. <https://doi.org/10.4014/jmb.1705.05044>
- Aladhadh, M. (2023). A Review of Modern Methods for the Detection of Foodborne Pathogens. *Microorganisms*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051111>
- Altayb, H. N., Badri, R. M., Chaieb, K., & Moglad, E. (2023). Detection and characterization of the most common foodborne pathogens by using multiplex PCR procedure. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 30(6), 103653. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103653>
- Althof, N., Trojnar, E., Böhm, T., Burkhardt, S., Carl, A., Contzen, M., ... Johne, R. (2019). Interlaboratory Validation of a Method for Hepatitis E Virus RNA Detection in Meat and Meat Products. *Food and Environmental Virology*, 11(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s12560-018-9360-6>
- Azimirad, M., Nadalian, B., Alavifard, H., Negahdar Panirani, S., Mahdigholi Vand Bonab, S., Azimirad, F., ... Zali, M. R.

- (2021). Microbiological survey and occurrence of bacterial foodborne pathogens in raw and ready-to-eat green leafy vegetables marketed in Tehran, Iran. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 237, 113824. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113824>
- Bai, X., Wang, Z., Li, W., Xiao, F., Huang, J., Xu, Q., & Xu, H. (2022). Rapid and accurate detection for *Listeria monocytogenes* in milk using ampicillin-mediated magnetic separation coupled with quantitative real-time PCR. *Microchemical Journal*, 183, 108063. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.108063>
- Bartsch, C., Höper, D., Mäde, D., & Johne, R. (2018). Analysis of frozen strawberries involved in a large norovirus gastroenteritis outbreak using next generation sequencing and digital PCR. *Food Microbiology*, 76, 390–395. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.06.019>
- Batiha, G. E.-S., Hussein, D. E., Algammal, A. M., George, T. T., Jeandet, P., Al-Snafi, A. E., ... Cruz-Martins, N. (2021). Application of natural antimicrobials in food preservation: Recent views. *Food Control*, 126, 108066. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108066>
- Benedict, K., Chiller, T. M., & Mody, R. K. (2016). Invasive Fungal Infections Acquired from Contaminated Food or Nutritional Supplements: A Review of the Literature. *Foodborne Pathogens and Disease*, 13(7), 343–349. <https://doi.org/10.1089/fpd.2015.2108>
- Bonnin-Jusserand, M., Copin, S., Le Bris, C., Brauge, T., Gay, M., Brisabois, A., ... Midelet-Bourdin, G. (2019). *Vibrio* species involved in seafood-borne outbreaks (*Vibrio cholerae*, *V. parahaemolyticus* and *V. vulnificus*): Review of microbiological versus recent molecular detection

- methods in seafood products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(4), 597–610. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1384715>
- Bosch, A., Sánchez, G., Abbaszadegan, M., Carducci, A., Guix, S., Le Guyader, F. S., ... Sellwood, J. (2011). Analytical Methods for Virus Detection in Water and Food. *Food Analytical Methods*, 4(1), 4–12. <https://doi.org/10.1007/s12161-010-9161-5>
- Cao, X., Zhao, L., Zhang, J., Chen, X., Shi, L., Fang, X., ... Wang, L. (2019). Detection of viable but nonculturable *Vibrio parahaemolyticus* in shrimp samples using improved real-time PCR and real-time LAMP methods. *Food Control*, 103, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.04.003>
- Carvalho, R. N., Oliveira, A. N. de, Mesquita, A. J. de, Rezende, C. S. M. e, Mesquita, A. Q. de, & Romero, R. A. M. (2014). PCR and ELISA (VIDAS ECO O157®) *Escherichia coli* O157:H7 identification in Minas Frescal cheese commercialized in Goiânia, GO. *Brazilian Journal of Microbiology*, 45, 07–10. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822014000100002>
- Castro, A. G. S. A., Dorneles, E. M. S., Santos, E. L. S., Alves, T. M., Silva, G. R., Figueiredo, T. C., ... Cançado, S. V. (2018). Viability of *Campylobacter* spp. In frozen and chilled broiler carcasses according to real-time PCR with propidium monoazide pretreatment. *Poultry Science*, 97(5), 1706–1711. <https://doi.org/10.3382/ps/pey020>
- Cebeci, T. (2019). A Survey of Raw Milk For Microbiological Quality and Typing of Foodborne Pathogens by MALDI-TOF MS. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 16(2), 185–191. <https://doi.org/10.25308/aduziraat.575681>

- Chen, M., Lan, X., Zhu, L., Ru, P., Xu, W., Liu, H., ... Liu, H. (2022). PCR Mediated Nucleic Acid Molecular Recognition Technology for Detection of Viable and Dead Foodborne Pathogens. *Foods*, 11(17). <https://doi.org/10.3390/foods11172675>
- Cheng, V. C. C., Chan, J. F. W., Ngan, A. H. Y., To, K. K. W., Leung, S. Y., Tsoi, H. W., ... Yuen, K. Y. (2009). Outbreak of Intestinal Infection Due to *Rhizopus microsporus*. *Journal of Clinical Microbiology*, 47(9), 2834–2843. <https://doi.org/10.1128/jcm.00908-09>
- Chhabra, P., & Vinjé, J. (2016). Molecular Detection Methods of Foodborne Viruses. In S. M. Goyal & J. L. Cannon (Eds), *Viruses in Foods* (pp. 303–333). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30723-7_11
- Chin, N. A., Salihah, N. T., Shivanand, P., & Ahmed, M. U. (2022). Recent trends and developments of PCR-based methods for the detection of food-borne *Salmonella* bacteria and Norovirus. *Journal of Food Science and Technology*, 59(12), 4570–4582. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05280-5>
- Coudray-Meunier, C., Fraisse, A., Martin-Latil, S., Guillier, L., & Perelle, S. (2013). Discrimination of infectious hepatitis A virus and rotavirus by combining dyes and surfactants with RT-qPCR. *BMC Microbiology*, 13(1), 216. <https://doi.org/10.1186/1471-2180-13-216>
- Cui, S., Zou, L., Liu, Y., Zhao, J., Lu, G., Shi, W., ... Wang, Q. (2022). Detection by environmental surveillance and genomic characterization of H5N8 highly pathogenic avian influenza virus from a poultry meat market in Beijing, China, 2021–22. *Veterinary Research*

- Communications*, 46(4), 1369–1375.
<https://doi.org/10.1007/s11259-022-10005-w>
- Dai, M., Yan, N., Huang, Y., Zhao, L., & Liao, M. (2022). Survivability of highly pathogenic avian influenza virus on raw chicken meat in different environmental conditions. *The Lancet Microbe*, 3(2), e92.
[https://doi.org/10.1016/S2666-5247\(21\)00333-5](https://doi.org/10.1016/S2666-5247(21)00333-5)
- De Cooman, L., Flahou, B., Houf, K., Smet, A., Ducatelle, R., Pasmans, F., & Haesebrouck, F. (2013). Survival of *Helicobacter suis* bacteria in retail pig meat. *International Journal of Food Microbiology*, 166(1), 164–167.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.05.020>
- Desdouits, M., de Graaf, M., Strubbia, S., Oude Munnink, B. B., Kroneman, A., Le Guyader, F. S., & Koopmans, M. P. G. (2020). Novel opportunities for NGS-based one health surveillance of foodborne viruses. *One Health Outlook*, 2(1), 14. <https://doi.org/10.1186/s42522-020-00015-6>
- Di Febo, T., Schirone, M., Visciano, P., Portanti, O., Armillotta, G., Persiani, T., ... Luciani, M. (2019). Development of a Capture ELISA for Rapid Detection of *Salmonella enterica* in Food Samples. *Food Analytical Methods*, 12(2), 322–330. <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1363-2>
- Elbehiry, A., Marzouk, E., Hamada, M., Al-Dubaib, M., Alyamani, E., Moussa, I. M., ... Hemeg, H. A. (2017). Application of MALDI-TOF MS fingerprinting as a quick tool for identification and clustering of foodborne pathogens isolated from food products. *New Microbiologica*, 40(4), 268–278.
- Falleh, H., Ben Jemaa, M., Saada, M., & Ksouri, R. (2020). Essential oils: A promising eco-friendly food

- preservative. *Food Chemistry*, 330, 127268.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127268>
- Ferrara, M., Perrone, G., Gallo, A., Epifani, F., Visconti, A., & Susca, A. (2015). Development of loop-mediated isothermal amplification (LAMP) assay for the rapid detection of *Penicillium nordicum* in dry-cured meat products. *International Journal of Food Microbiology*, 202, 42–47.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.02.021>
- Foddai, A. C. G., & Grant, I. R. (2020). Methods for detection of viable foodborne pathogens: Current state-of-art and future prospects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(10), 4281–4288.
<https://doi.org/10.1007/s00253-020-10542-x>
- Fraisse, A., Coudray-Meunier, C., Martin-Latil, S., Hennechart-Collette, C., Delannoy, S., Fach, P., & Perelle, S. (2017). Digital RT-PCR method for hepatitis A virus and norovirus quantification in soft berries. *International Journal of Food Microbiology*, 243, 36–45.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.11.022>
- Gill, A. (2017). The Importance of Bacterial Culture to Food Microbiology in the Age of Genomics. *Frontiers in Microbiology*, 8.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00777>
- Hassan, F., Jibouri, M. A.-, & Hashim, A. K. (2014). Isolation and Identification of Fungal Propagation in Stored Maize and detection of aflatoxin B1 Using TLC and ELISA Technique. *Iraqi Journal of Science*, 55(2B), 634–642.
- Hawksworth, D. L. (2001). The magnitude of fungal diversity: The 1·5 million species estimate revisited. *Mycological*

- Research*, 105(12), 1422–1432.
<https://doi.org/10.1017/S0953756201004725>
- Heo, E. J., Kim, H.-Y., Suh, S. H., & Moon, J. S. (2022). Comparison of DNA Extraction Methods for the Quantification of *Listeria monocytogenes* in Dairy Products by Real-Time Quantitative PCR>. *Journal of Food Protection*, 85(11), 1531–1537.
<https://doi.org/10.4315/JFP-22-117>
- Imamura, S., Kanezashi, H., Goshima, T., Haruna, M., Okada, T., Inagaki, N., ... Akimoto, K. (2017). Next-Generation Sequencing Analysis of the Diversity of Human Noroviruses in Japanese Oysters. *Foodborne Pathogens and Disease*, 14(8), 465–471.
<https://doi.org/10.1089/fpd.2017.2289>
- Itarte, M., Martínez-Puchol, S., Forés, E., Hundesa, A., Timoneda, N., Bofill-Mas, S., ... Rusiñol, M. (2021). NGS Techniques Reveal a High Diversity of RNA Viral Pathogens and Papillomaviruses in Fresh Produce and Irrigation Water. *Foods*, 10(8).
<https://doi.org/10.3390/foods10081820>
- Iulietto, M. F., Sechi, P., Borgogni, E., & Cenci-Goga, B. T. (2015). Meat Spoilage: A Critical Review of a Neglected Alteration Due to Ropy Slime Producing Bacteria. *Italian Journal of Animal Science*, 14(3), 4011.
<https://doi.org/10.4081/ijas.2015.4011>
- Jiang, S., Chen, Y., Han, S., Lv, L., Li, L., Jiang, S., ... Li, L. (2022). Next-Generation Sequencing Applications for the Study of Fungal Pathogens. *Microorganisms*, 10(10).
<https://doi.org/10.3390/microorganisms10101882>
- Khan, J. A., Rathore, R. S., Abulreesh, H. H., Qais, F. A., & Ahmad, I. (2018). Cultural and Immunological methods

- for the Detection of *Campylobacter jejuni*: A Review. *Indian Journal of Biotechnology and Pharmaceutical Research*, 6(3), 4–10.
- Khater, D. F., Lela, R. A., El-Diasty, M., Moustafa, S. A., & Wareth, G. (2021). Detection of harmful foodborne pathogens in food samples at the points of sale by MALDT-TOF MS in Egypt. *BMC Research Notes*, 14(1), 112. <https://doi.org/10.1186/s13104-021-05533-8>
- Kim, D. M., Chung, S. H., & Chun, H. S. (2011). Multiplex PCR assay for the detection of aflatoxigenic and non-aflatoxigenic fungi in *meju*, a Korean fermented soybean food starter. *Food Microbiology*, 28(7), 1402–1408. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2011.06.017>
- Kumar, B. K., Raghunath, P., Devegowda, D., Deekshit, V. K., Venugopal, M. N., Karunasagar, I., & Karunasagar, I. (2011). Development of monoclonal antibody based sandwich ELISA for the rapid detection of pathogenic *Vibrio parahaemolyticus* in seafood. *International Journal of Food Microbiology*, 145(1), 244–249. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.12.030>
- La Bella, G., Martella, V., Basanisi, M. G., Nobili, G., Terio, V., & La Salandra, G. (2017). Food-Borne Viruses in Shellfish: Investigation on Norovirus and HAV Presence in Apulia (SE Italy). *Food and Environmental Virology*, 9(2), 179–186. <https://doi.org/10.1007/s12560-016-9273-1>
- Laforgue, R., Guérin, L., Pernelle, J. J., Monnet, C., Dupont, J., & Bouix, M. (2009). Evaluation of PCR-DGGE methodology to monitor fungal communities on grapes. *Journal of Applied Microbiology*, 107(4), 1208–1218. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04309.x>

- Law, J. W.-F., Ab Mutalib, N.-S., Chan, K.-G., & Lee, L.-H. (2015a). An insight into the isolation, enumeration, and molecular detection of *Listeria monocytogenes* in food. *Frontiers in Microbiology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01227>
- Law, J. W.-F., Ab Mutalib, N.-S., Chan, K.-G., & Lee, L.-H. (2015b). Rapid methods for the detection of foodborne bacterial pathogens: Principles, applications, advantages and limitations. *Frontiers in Microbiology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00770>
- Lee, N., Kwon, K. Y., Oh, S. K., Chang, H.-J., Chun, H. S., & Choi, S.-W. (2014). A Multiplex PCR Assay for Simultaneous Detection of *Escherichia coli* O157:H7, *Bacillus cereus*, *Vibrio parahaemolyticus*, *Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes*, and *Staphylococcus aureus* in Korean Ready-to-Eat Food. *Foodborne Pathogens and Disease*, 11(7), 574–580. <https://doi.org/10.1089/fpd.2013.1638>
- Lewis, E., Hudson, J. A., Cook, N., Barnes, J. D., & Haynes, E. (2020). Next-generation sequencing as a screening tool for foodborne pathogens in fresh produce. *Journal of Microbiological Methods*, 171, 105840. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2020.105840>
- Lianou, A., Panagou, P., & George-John E, N. (2023). Meat safety—I Foodborne pathogens and other biological issues. In *Lawrie's Meat Science* (pp. 549–590). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85408-5.00015-7>
- Mancini, V., Murolo, S., & Romanazzi, G. (2016). Diagnostic methods for detecting fungal pathogens on vegetable seeds. *Plant Pathology*, 65(5), 691–703. <https://doi.org/10.1111/ppa.12515>

- Marti, E., & Barardi, C. R. M. (2016). Detection of human adenoviruses in organic fresh produce using molecular and cell culture-based methods. *International Journal of Food Microbiology*, 230, 40–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.04.018>
- Martinović, T., Andjelković, U., Gajdošik, M. Š., Rešetar, D., & Josić, D. (2016). Foodborne pathogens and their toxins. *Journal of Proteomics*, 147, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.jprote.2016.04.029>
- Mead, P. S., Slutsker, L., Dietz, V., McCaig, L. F., Bresee, J. S., Shapiro, C., ... Tauxe, R. V. (1999). Food-related illness and death in the United States. *Emerging Infectious Diseases*, 5(5), 607–625. <https://doi.org/10.3201/eid0505.990502>
- Miralles, M. M., Maestre-Carballe, L., Lluesma-Gomez, M., Martinez-Garcia, M., Miralles, M. M., Maestre-Carballe, L., ... Martinez-Garcia, M. (2019). High-Throughput 16S rRNA Sequencing to Assess Potentially Active Bacteria and Foodborne Pathogens: A Case Example in Ready-to-Eat Food. *Foods*, 8(10). <https://doi.org/10.3390/foods8100480>
- Miranda, R. C., & Schaffner, D. W. (2019). Virus risk in the food supply chain. *Current Opinion in Food Science*, 30, 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.12.002>
- Moezi, P., Kargar, M., Doosti, A., & Khoshneviszadeh, M. (2019). Multiplex touchdown PCR assay to enhance specificity and sensitivity for concurrent detection of four foodborne pathogens in raw milk. *Journal of Applied Microbiology*, 127(1), 262–273.
- Moran-Gilad, J. (2017). Whole genome sequencing (WGS) for food-borne pathogen surveillance and control – taking the

- pulse. *Eurosurveillance*, 22(23), 30547.
<https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2017.22.23.30547>
- Muhamad Rizal, N. S., Neoh, H., Ramli, R., A/L K Periyasamy, P. @ R., Hanafiah, A., Abdul Samat, M. N., ... Khor, B. Y. (2020). Advantages and Limitations of 16S rRNA Next-Generation Sequencing for Pathogen Identification in the Diagnostic Microbiology Laboratory: Perspectives from a Middle-Income Country. *Diagnostics*, 10(10), 816.
<https://doi.org/10.3390/diagnostics10100816>
- Nagaraj, S., Ramlal, S., Kingston, J., & Batra, H. V. (2016). Development of IgY based sandwich ELISA for the detection of staphylococcal enterotoxin G (SEG), an *egc* toxin. *International Journal of Food Microbiology*, 237, 136–141.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.08.009>
- Olmedillas-López, S., García-Arranz, M., & García-Olmo, D. (2017). Current and Emerging Applications of Droplet Digital PCR in Oncology. *Molecular Diagnosis & Therapy*, 21(5), 493–510. <https://doi.org/10.1007/s40291-017-0278-8>
- Oluwaseun, A. C., Phazang, P., BhallaSarin, N., Oluwaseun, A. C., Phazang, P., & BhallaSarin, N. (2018). Biosensors: A Fast-Growing Technology for Pathogen Detection in Agriculture and Food Sector. In *Biosensing Technologies for the Detection of Pathogens—A Prospective Way for Rapid Analysis*. IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.74668>
- Omori, A. M., Ono, E. Y. S., Bordini, J. G., Hirozawa, M. T., Fungaro, M. H. P., & Ono, M. A. (2018). Detection of *Fusarium verticillioides* by PCR-ELISA based on *FUM21* gene. *Food Microbiology*, 73, 160–167.
<https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.01.020>

- Oplatowska-Stachowiak, M., Sajic, N., Xu, Y., Haughey, S. A., Mooney, M. H., Gong, Y. Y., ... Elliott, C. T. (2016). Fast and sensitive aflatoxin B1 and total aflatoxins ELISAs for analysis of peanuts, maize and feed ingredients. *Food Control*, 63, 239–245. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.11.041>
- Ounleye, A. O., & Olaiya, G. A. (2015). Isolation, Identification and Mycotoxin Production of Some Mycoflora of Dried Stockfish (*Gadus Morhua*). *Academic Journal of Science*, 4(1), 345–363.
- Pang, B., Zhao, C., Li, L., Song, X., Xu, K., Wang, J., ... Li, J. (2018). Development of a low-cost paper-based ELISA method for rapid *Escherichia coli* O157:H7 detection. *Analytical Biochemistry*, 542, 58–62. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2017.11.010>
- Park, D.-G., Ha, E.-S., Kang, B., Choi, I., Kwak, J.-E., Choi, J., ... Lee, J.-H. (2023). Development and Evaluation of a Next-Generation Sequencing Panel for the Multiple Detection and Identification of Pathogens in Fermented Foods. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(1), 83–95. <https://doi.org/10.4014/jmb.2211.11009>
- Paterson, R. R. M., Lima, N., Paterson, R. R. M., & Lima, N. (2017). Filamentous Fungal Human Pathogens from Food Emphasising *Aspergillus*, *Fusarium* and *Mucor*. *Microorganisms*, 5(3). <https://doi.org/10.3390/microorganisms5030044>
- Pexara, A., Govaris, A., Pexara, A., & Govaris, A. (2020). Foodborne Viruses and Innovative Non-Thermal Food-Processing Technologies. *Foods*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/foods9111520>

- Pires, N. M. M., Dong, T., Yang, Z., & da Silva, L. F. B. A. (2021). Recent methods and biosensors for foodborne pathogen detection in fish: Progress and future prospects to sustainable aquaculture systems. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(11), 1852–1876. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1767032>
- Priyanka, B., Patil, R. K., & Dwarakanath, S. (2016). A review on detection methods used for foodborne pathogens. *Indian Journal of Medical Research*, 144(3), 327. <https://doi.org/10.4103/0971-5916.198677>
- Quéro, L., Girard, V., Pawtowski, A., Tréguer, S., Weill, A., Arend, S., ... Mounier, J. (2019). Development and application of MALDI-TOF MS for identification of food spoilage fungi. *Food Microbiology*, 81, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.05.001>
- Quintilla, R., Kolečka, A., Casaregola, S., Daniel, H. M., Houbraeken, J., Kostrzewa, M., ... Groenewald, M. (2018). MALDI-TOF MS as a tool to identify foodborne yeasts and yeast-like fungi. *International Journal of Food Microbiology*, 266, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.11.016>
- Rahman, H. Ur, Yue, X., Yu, Q., Zhang, W., Zhang, Q., & Li, P. (2020). Current PCR-based methods for the detection of mycotoxigenic fungi in complex food and feed matrices. *World Mycotoxin Journal*, 13(2), 139–150. <https://doi.org/10.3920/WMJ2019.2455>
- Rahman, Hamid Ur, Yue, X., Ren, X., Zhang, W., Zhang, Q., & Li, P. (2020). Multiplex PCR assay to detect *Aspergillus*, *Penicillium* and *Fusarium* species simultaneously. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 37(11), 1939–1950. <https://doi.org/10.1080/19440049.2020.1810860>

- Rajkovic, A., Jovanovic, J., Monteiro, S., Decleer, M., Andjelkovic, M., Foubert, A., ... Uyttendaele, M. (2020). Detection of toxins involved in foodborne diseases caused by Gram-positive bacteria. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(4), 1605–1657. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12571>
- Ribot, E. M., & Hise, K. B. (2016). Future challenges for tracking foodborne diseases. *The EMBO Reports*, 17(11), 1499–1505. <https://doi.org/10.15252/embr.201643128>
- Rychert, J. (2019). Benefits and Limitations of MALDI-TOF Mass Spectrometry for the Identification of Microorganisms. *Journal of Infectiology and Epidemiology*, 2(4). Retrieved from <https://www.infectiologyjournal.com/articles/benefits-and-limitations-of-malдитof-mass-spectrometry-for-the-identification-of-microorganisms.html>
- Samad, A., Abbas, F., Ahmad, Z., Tanveer, Z., Ahmad, I., Patching, S. G., ... Mustafa, M. Z. (2018). Multiplex polymerase chain reaction detection of Shiga toxin genes and antibiotic sensitivity of Escherichia coli O157:H7 isolated from beef meat in Quetta, Pakistan. *Journal of Food Safety*, 38(6), e12540. <https://doi.org/10.1111/jfs.12540>
- Sánchez, G., & Bosch, A. (2016). Survival of Enteric Viruses in the Environment and Food. In S. M. Goyal & J. L. Cannon (Eds), *Viruses in Foods* (pp. 367–392). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30723-7_13
- Saravanan, A., Kumar, P. S., Hemavathy, R. V., Jeevanantham, S., Kamalesh, R., Sneha, S., & Yaashikaa, P. R. (2021). Methods of detection of food-borne pathogens: A review.

- Environmental Chemistry Letters*, 19(1), 189–207.
<https://doi.org/10.1007/s10311-020-01072-z>
- Saucier, L. (2016). Microbial spoilage, quality and safety within the context of meat sustainability. *Meat Science*, 120, 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.04.027>
- Singhal, N., Kumar, M., Kanaujia, P. K., & Viridi, J. S. (2015). MALDI-TOF mass spectrometry: An emerging technology for microbial identification and diagnosis. *Frontiers in Microbiology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00791>
- Soares, V. M., dos Santos, E. A. R., Tadielo, L. E., Cerqueira-Cézar, C. K., da Cruz Encide Sampaio, A. N., Eisen, A. K. A., ... Pereira, J. G. (2022). Detection of adenovirus, rotavirus, and hepatitis E virus in meat cuts marketed in Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Brazil. *One Health*, 14, 100377. <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2022.100377>
- Soroka, M., Wasowicz, B., Rymaszewska, A., Soroka, M., Wasowicz, B., & Rymaszewska, A. (2021). Loop-Mediated Isothermal Amplification (LAMP): The Better Sibling of PCR? *Cells*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/cells10081931>
- Stanker, L. H., Scotcher, M. C., Cheng, L., Ching, K., McGarvey, J., Hodge, D., ... Hnasko, R. (2013). A Monoclonal Antibody Based Capture ELISA for Botulinum Neurotoxin Serotype B: Toxin Detection in Food. *Toxins*, 5(11), 2212–2226. <https://doi.org/10.3390/toxins5112212>
- Su, W., Liang, D., & Tan, M. (2021). Nucleic acid-based detection for foodborne virus utilizing microfluidic systems. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 97–109. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.053>

- Sulaiman, I. M., Miranda, N., & Simpson, S. (2021). MALDI-TOF Mass Spectrometry and 16S rRNA Gene Sequence Analysis for the Identification of Foodborne Clostridium Spp. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 104(5), 1381–1388. <https://doi.org/10.1093/jaoacint/qsab070>
- Tannous, J., Atoui, A., El Khoury, A., Kantar, S., Chdid, N., Oswald, I. P., ... Lteif, R. (2015). Development of a real-time PCR assay for *Penicillium expansum* quantification and patulin estimation in apples. *Food Microbiology*, 50, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2015.03.001>
- Thanh, M. D., Agustí, G., Mader, A., Appel, B., & Codony, F. (2017). Improved sample treatment protocol for accurate detection of live Salmonella spp. In food samples by viability PCR. *PLOS ONE*, 12(12), e0189302. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189302>
- Tu, Z., Chen, Q., Li, Y., Xiong, Y., Xu, Y., Hu, N., & Tao, Y. (2016). Identification and characterization of species-specific nanobodies for the detection of *Listeria monocytogenes* in milk. *Analytical Biochemistry*, 493, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2015.09.023>
- Valderrama, W. B., Dudley, E. G., Doores, S., & Cutter, C. N. (2016). Commercially Available Rapid Methods for Detection of Selected Food-borne Pathogens. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(9), 1519–1531. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.775567>
- Vinayaka, A. C., Ngo, T. A., Kant, K., Engelsmann, P., Dave, V. P., Shahbazi, M.-A., ... Bang, D. D. (2019). Rapid detection of *Salmonella enterica* in food samples by a novel approach with combination of sample concentration and direct PCR. *Biosensors and Bioelectronics*, 129, 224–230. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2018.09.078>

- Wang, S., Zhang, Y., An, W., Wei, Y., Liu, N., Chen, Y., & Shuang, S. (2015). Magnetic relaxation switch immunosensor for the rapid detection of the foodborne pathogen *Salmonella enterica* in milk samples. *Food Control*, 55, 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.02.031>
- Wang, T., Guo, H., Zhang, H., Ren, F., Zhang, M., Ge, S., ... Zhao, L. (2019). Dynamics of Bacterial Communities of Lamb Meat Packaged in Air and Vacuum Pouch during Chilled Storage. *Food Science of Animal Resources*, 39(2), 209–221. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2019.e16>
- Wu, J.-L., Tseng, W.-P., Lin, C.-H., Lee, T.-F., Chung, M.-Y., Huang, C.-H., ... Chen, S.-C. (2020). Four point-of-care lateral flow immunoassays for diagnosis of COVID-19 and for assessing dynamics of antibody responses to SARS-CoV-2. *Journal of Infection*, 81(3), 435–442. <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2020.06.023>
- Xu, X., Liu, G., Huang, X., Li, L., Lin, H., & Xu, D. (2021). MALDI-TOF MS-Based identification of bacteria and a survey of fresh vegetables with pathogenic bacteria in Beijing, China. *Food Bioscience*, 41, 100746. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100746>
- Yang, X., Zhang, X., Wang, Y., Shen, H., Jiang, G., Dong, J., ... Gao, S. (2020). A Real-Time Recombinase Polymerase Amplification Method for Rapid Detection of *Vibrio vulnificus* in Seafood. *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.586981>
- Yeargin, T., & Gibson, K. E. (2019). Key characteristics of foods with an elevated risk for viral enteropathogen contamination. *Journal of Applied Microbiology*, 126(4), 996–1010. <https://doi.org/10.1111/jam.14113>

- Zhang, J., Li, X., Wang, X., Ye, H., Li, B., Chen, Y., ... Qi, W. (2021). Genomic evolution, transmission dynamics, and pathogenicity of avian influenza A (H5N8) viruses emerging in China, 2020. *Virus Evolution*, 7(1), veab046. <https://doi.org/10.1093/ve/veab046>
- Zhao, Y., Zeng, D., Yan, C., Chen, W., Ren, J., Jiang, Y., ... Dai, J. (2020). Rapid and accurate detection of Escherichia coli O157:H7 in beef using microfluidic wax-printed paper-based ELISA. *Analyst*, 145(8), 3106–3115. <https://doi.org/10.1039/D0AN00224K>

TÜRKİYE VE DÜNYADA
VETERİNER GIDA HİJYENİ VE TEKNOLOJİSİ

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com