**Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**
*Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science*
*e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)*

Derleme Makalesi – Review Article

Geliş Tarihi / Received: 29/08/2025

Kabul Tarihi / Accepted: 12/02/2026

Yayın Tarihi / Published: 31/05/2026

# Kabuklu Yumurtada Isıl Olmayan İşleme ve Muhafaza Teknikleri: Güncel Yaklaşımlar ve Gelecek Perspektifler

# Non-Thermal Processing and Preservation Techniques for Shell Eggs: Current Approaches and Future Perspectives

Muhammed Yüceer[1*], Rukiye Mavuş[2], Ecem Işik[3]

[1*]Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale Teknik Bilimler MYO, Gıda İşleme Bölümü, Çanakkale, Türkiye / myuceer@comu.edu.tr/ https://orcid.org/0000-0001-6709-1347

[2] Gemak Gıda Endüstri Makinaları ve Tic. A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Ankara, Türkiye / rukiyemavus@gemak.com.tr/ https://orcid.org/0000-0003-1829-2059

[3] Gemak Gıda Endüstri Makinaları ve Tic. A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Ankara, Türkiye / ecemisik@gemak.com.tr/ https://orcid.org/0009-0000-5232-0821

**Etik Beyan:** Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.

**Yapay Zeka Etik Beyanı:** Yazar bu makalenin hazırlanma sürecinin hiç bir aşamasında yapay zekadan faydalanılmadığını; bu konuda tüm sorumluluğun kendisine(kendilerine) ait olduğunu beyan etmektedir.

**Çıkar Çatışması:** Çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

**Finansman:** Bu araştırmayı desteklemek için dış fon kullanılmamıştır.

**Lisans:** CC BY-NC 4.0

**Ethical Statement:** It is declared that scientific and ethical principles were followed during the preparation of this study and that all studies used are stated in the bibliography.

**Artificial Intelligence Ethical Statement:** The author declares that artificial intelligence was not utilized at any stage of the preparation process of this article and accepts full responsibility in this regard.

**Conflicts of Interest:** The author(s) has no conflict of interest to declare.

**Grant Support:** The author(s) acknowledge that they received no external funding to support this research.

**License:** CC BY-NC 4.0

# Kabuklu Yumurtada Isıl Olmayan İşleme ve Muhafaza Teknikleri: Güncel Yaklaşımlar ve Gelecek Perspektifler

**ÖZ**

Yumurta, yüksek biyolojik değere sahip proteinleri ve fonksiyonel özellikleri nedeniyle dünya genelinde en çok tüketilen hayvansal gıdalardan biridir. Ancak kabuklu yumurtalar, özellikle *Salmonella Enteritidis* gibi patojenlerle ilişkili gıda kaynaklı salgınlarda önemli bir risk faktörü oluşturmaktadır. Bundan dolayı geleneksel ısıl pastörizasyon yöntemleri, gıda güvenliğini sağlamada etkili olmakla birlikte, yumurtanın fonksiyonel ve duyusal özelliklerinde kayıplara yol açmaktadır. Son yıllarda ise kabuklu yumurtaların yüzey dezenfeksiyonu ve raf ömrünün uzatılmasına yönelik olarak ısıl olmayan teknolojilerin kullanımı giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu kapsamda ultraviyole ışınlama, ozonlama, soğuk plazma, yüksek hidrostatik basınç, darbeli elektrik alan, ultrasonik uygulamalar ve elektrolize su gibi yenilikçi yöntemler üzerine yürütülen araştırmalar umut verici sonuçlar ortaya koymaktadır. Bu derlemede ise söz konusu tekniklerin mekanizmaları, avantaj ve dezavantajları ile literatürdeki uygulama örnekleri tartışılmakta; ayrıca yöntemlerin endüstriyel potansiyelleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Bunun yanı sıra, mevcut bulgular ışığında geleceğe yönelik araştırma alanları ve olası gelişim perspektifleri sunulmaktadır.

***Anahtar Kelimeler- Yumurta, Isıl olmayan teknolojiler, Yüzey dezenfeksiyonu, Gıda güvenliği, Mikrobiyal inaktivasyon***

**Öne Çıkanlar**

- Araştırmanın temel tezi, geleneksel ısıl pastörizasyon yöntemlerinin yerine kabuklu yumurtalar için yeni ısıl olmayan teknolojilerin kullanımını ele almaktadır.
- Yenilikçi yöntemler hem mikrobiyal inaktivasyon sağlama hem de yumurtanın fonksiyonel ve duyusal özelliklerini koruma potansiyeline sahiptir
- Isıl olmayan teknolojiler, gıda güvenliği ve temiz etiket trendine uyum sağlama, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik gibi avantajlar sunmaktadır.

# Non-Thermal Processing and Preservation Techniques for Shell Eggs: Current Approaches and Future Perspectives

**ABSTRACT**

Eggs are one of the most widely consumed animal-based foods worldwide due to their proteins of high biological value and functional properties. However, shell eggs pose a significant risk factor in foodborne outbreaks associated with pathogens such as *Salmonella Enteritidis*. Although traditional thermal pasteurization methods are effective in ensuring food safety, they may lead to losses in the functional and sensory properties of eggs. In recent years, the use of non-thermal technologies for surface disinfection and shelf-life extension of shell eggs has gained increasing attention. In this context, research on innovative methods such as ultraviolet irradiation, ozonation, cold plasma, high hydrostatic pressure, pulsed electric fields, ultrasonic applications& electrolyzed water has yielded promising results. This review discusses the mechanisms, advantages& limitations of these techniques, along with examples of their application in the literature. It also provides a comparative assessment of their industrial potential. Furthermore, future research needs and possible development perspectives are presented in light of current findings.

***Keywords- Eggs, Non-thermal technologies, Surface disinfection, Food safety, Microbial inactivation***

**Highlights**

- The main thesis of this review addresses the use of new non-thermal technologies for shell eggs as an alternative to traditional thermal pasteurization methods.
- Innovative methods have the potential to achieve microbial inactivation while preserving the functional and sensory properties of eggs.
- Non-thermal technologies offer advantages such as alignment with food safety and clean-label trends, energy efficiency& environmental sustainability.

## I. GİRİŞ

Yumurta, yüksek kaliteli protein fraksiyonları, temel amino asitler, vitaminler ve mineraller açısından zengin yapısı nedeniyle insan beslenmesinde önemli bir yere sahiptir. Literatürde yumurtanın biyolojik değerinin yüksek olması, sindirilebilirliğinin iyi olması ve referans protein olarak kabul edilen kompozisyonu hem çocuklar hem de yetişkinler için değerli bir besin kaynağı olduğunu göstermektedir [1, 2]. Sarı ve beyaz kısmın farklı besinsel özellikler sunması, yumurtanın günlük tüketimde geniş kullanım alanı bulmasının temel nedenlerinden biridir [3, 4].

Yumurta endüstrisi yalnızca kabuklu yumurta üretimi ile sınırlı olmayıp, sıvı bütün yumurta, yumurta akı, yumurta sarısı ve kurutulmuş yumurta ürünlerini kapsayan geniş bir ticari portföy sunmaktadır. Bu ürünler, işleme kolaylığı, fonksiyonel özellikleri ve raf ömrü avantajları sayesinde farklı gıda sektörlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Özellikle bağlayıcı, jel oluşturma emülsifiye etme ve köpük oluşturma özellikleri, endüstride yumurtanın vazgeçilmez bir bileşen olarak yer almasına katkı sağlamaktadır [5-8]. Ticari pazarın büyümesi, yumurtanın fonksiyonel özelliklerine dayalı yeni ürün geliştirme ve işleme teknolojilerine olan ilgiyi artırmaktadır [9, 10]. Öte yandan yumurta, besinsel açıdan değerli olmasına rağmen mikrobiyolojik riskler açısından oldukça hassas bir gıdadır. Özellikle kabuk yüzeyine çevresel kaynaklar veya üretim koşulları yoluyla bulaşan patojenler, hem endüstri hem de tüketici sağlığı açısından önemli bir risk oluşturmaktadır. *Salmonella enterica* Serovar Enteritidis, yumurta ile ilişkili en kritik patojenlerden biri olup kontaminasyon döngüsü literatürde kapsamlı biçimde açıklanmıştır [11, 12]. Bu nedenle, yumurtanın güvenli işlenmesi için kullanılan mevcut proseslerin etkinliği ve sınırları önem taşımaktadır.

Geleneksel ısıl pastörizasyon yöntemleri, mikrobiyal inaktivasyon için uzun yıllardır kullanılmakla birlikte, sıcaklık-zaman kombinasyonlarının ürün fonksiyonelliğini ve duyusal özellikleri olumsuz etkileyebilmesi, sektörün daha yenilikçi yaklaşımlara yönelmesine neden olmuştur. Isıl işlemin neden olduğu kalite kayıplarını azaltmak, protein fonksiyonelliğini korumak ve daha düşük enerji gereksinimi ile daha etkili mikrobiyal kontrol sağlamak amacıyla son yıllarda ısıl olmayan teknolojilere yönelik ilgi artmaktadır. UV-C ışınlama, ozon uygulamaları, soğuk plazma ve yüksek hidrostatik basınç gibi yöntemlerin yumurta işleme süreçlerinde potansiyel kullanım alanları, literatürde giderek daha fazla vurgulanmaktadır [13, 14].

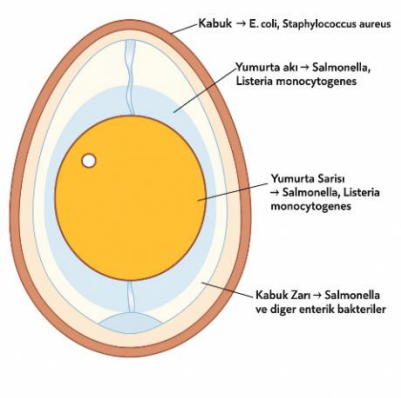
Bu derlemenin amacı, kabuklu yumurtalarda gıda güvenliğini artırmaya yönelik mevcut ve yeni proses yaklaşımlarını değerlendirmek; ısıl olmayan teknolojilerin avantajlarını, sınırlılıklarını ve uygulama potansiyellerini güncel literatüre dayalı olarak kapsamlı bir şekilde incelemektir. Bu derleme kapsamında literatür taraması Web of Science (WoS) ve Scopus veri tabanlarında gerçekleştirilmiştir. Aramalar, çalışmanın anahtar kavramlarını kapsayan kombinasyonlar (yumurta, ısıl olmayan teknolojiler, yüzey dezenfeksiyonu, gıda güvenliği, mikrobiyal inaktivasyon) kullanılarak yapılmıştır.

### *A. Kabuklu Yumurtada Mikrobiyolojik Güvenlik Sorunları*

Yumurta, yüksek besin değerine sahip olmasına rağmen mikrobiyolojik açıdan oldukça hassas bir gıda olarak kabul edilmektedir. Kabuk yüzeyi doğal kutikula tabakası ile belirli bir koruma sağlasa da; üretim, toplama, taşıma ve depolama aşamalarında çeşitli patojenlerle kontaminasyona açıktır (Şekil 1). Özellikle *Salmonella enterica* Serovar Enteritidis, yumurtalarda en sık karşılaşılan ve halk sağlığı açısından en kritik patojen olup, hem kabuk yüzeyinde hayatta kalabilmekte hem de kabuk gözeneklerinden içeri geçerek yumurta akı ve sarısına ulaşabilmektedir. Avrupa Birliği ve EFSA raporları, Salmonelloz vakalarının önemli bir bölümünün çiğ veya yetersiz pişirilmiş yumurta ve yumurta ürünleri ile ilişkili olduğunu göstermektedir [15, 16]. Bunun yanında *Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Listeria monocytogenes* ve *Campylobacter spp.* gibi patojenlerin hem çiftlik koşullarında hem de işleme hattı boyunca kabuğa ve iç ortama bulaşabildiği bilinmektedir. Ayrıca son yıllarda yapılan çalışmalar, uygun olmayan depolama koşullarında *Aspergillus spp.* gibi küflerin yumurta üzerinde çoğalabildiğini ortaya koymakta ve mantar kontaminasyonunun da göz ardı edilmemesi gereken bir risk olduğunu göstermektedir.

Yumurta üzerinde patojen varlığı ve hayatta kalma süresi, hem kabuğun fiziksel özellikleri hem de çevresel koşullarla yakından ilişkilidir. Kalsiyum karbonat yapısındaki kabuk başlangıçta bir bariyer görevi görse de, kutikula tabakasının zamanla zayıflaması patojen penetrasyonunu kolaylaştırmaktadır. Literatürde *Salmonella*'nın nemli ve yüksek sıcaklığın olduğu koşullarda kabuk gözeneklerinden iç ortama daha hızlı geçebildiği; *E. coli* ve *Campylobacter spp.* gibi bakterilerin ise dışkı kalıntısı veya organik madde varlığında kabuk yüzeyinde daha uzun süre canlı kalabildiği bildirilmektedir. Ayrıca bazı suşların biyofilm oluşturma kapasitesi, temizlik ve sanitasyon uygulamalarının etkinliğini azaltarak patojenlerin kabuk yüzeyine daha kuvvetli tutunmasına yol açmaktadır. Bu bulgular, üretim hijyeni kadar depolama sıcaklığı, bağıl nem ve taşıma koşullarının da mikrobiyal yük üzerinde belirleyici faktörler olduğunu ortaya koymaktadır [17-20].

Sonuç olarak, kabuklu yumurtalarda mikrobiyal bulaşma hem üretim sırasında gerçekleşen vertikal (dikey) bulaşma hem de çevresel kaynaklı horizontal bulaşma yoluyla ortaya çıkan çok yönlü bir sorundur. Bu durum tavuğun genital kanalında bulunan patojenlerin yumurta oluşumu sırasında iç kısımlara geçmesiyle meydana gelmektedir. Horizontal (yatay) bulaşma ise kabuğun dışkı, altlık, ekipman yüzeyleri veya çevresel faktörlerle temas etmesi sonucu gerçekleşmektedir. Depolama sıcaklığı, nem düzeyi ve yetersiz hijyen uygulamaları, patojenlerin hem kabuk yüzeyinde hem de yumurta iç ortamında daha uzun süre hayatta kalmasına zemin hazırlamaktadır. Bu nedenle, yumurtanın çiftlikten tüketiciye ulaşana kadar tüm süreç boyunca etkin kontrol stratejilerinin uygulanması gıda güvenliği açısından kritik önem taşımaktadır [17].




**Şekil 1.** Yumurtanın Farklı Kısımlarında Patojen Mikroorganizmaların Konumları [17].

### *B. Geleneksel Isıl Pastörizasyon Yöntemlerinin Sınırlılıkları*

Kabuklu yumurtalarda mikrobiyal güvenliği artırmak amacıyla uzun yıllardır geleneksel ısıl pastörizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde hedef, belirli sıcaklık–zaman kombinasyonları uygulanarak patojenlerin inaktive edilmesidir. Örneğin, 57°C olarak uygulanan standart pastörizasyon protokolü, özellikle *Salmonella* gibi türlerinin azaltılmasında yaygın şekilde tercih edilmektedir. Ancak geleneksel ısıl işlemler, yumurta bileşenlerinin ısıl duyarlılığı nedeniyle bazı sınırlamalara sahiptir. İlk olarak, uzun süreli yüksek sıcaklık uygulamaları protein denatürasyonuna yol açarak yumurta akının köpürme ve emülsifiye edici fonksiyonlarını kaybetmesine neden olmakta; aynı zamanda renk, doku ve tat gibi duyusal niteliklerde bozulmalara yol açabilmektedir [15, 14, 16].

İkinci olarak, belirli patojen ve spor türlerinin ısıl direnci nedeniyle her zaman yeterli dezenfeksiyon sağlanamayabilir. Örneğin, *Salmonella enterica* yüksek ısıya kısmen dirençlidir ve bazı örneklerde ısıya dayanıklı alt türler canlı kalabildiği rapor edilmiştir. Ayrıca, standart pastörizasyon parametrelerinin aşırı zaman ve maliyet gerektirmesi endüstriyel ölçekte uygulamaları zorlaştırmaktadır [21].

Üçüncü olarak, işlem sürecinin optimizasyonunda güçlükler söz konusudur. Isıl işlemin yumurta içindeki sıcaklık dağılımını homojen biçimde sağlaması kolay değildir. Özellikle yumurta sarısının merkezine kadar ısının iletilmesi gerekirken, bu süre ve sıcaklık kombinasyonları enerji tüketimini ve üretim maliyetini artırmaktadır [21].

Özetle, geleneksel pastörizasyon mikrobiyal kontaminasyonu azaltmada etkili olsa da yumurtanın fonksiyonel ve duyusal kalitesinde kayıplara yol açabilmekte, maliyetleri artırmakta ve bazı patojenler için sınırlı etkinlik gösterebilmektedir.

### *C. Isıl Olmayan Yöntemlerin Ortaya Çıkış Nedenleri*

Geleneksel ısıl pastörizasyon yöntemleri, uzun yıllardır yumurta ve diğer gıda ürünlerinde mikrobiyal güvenliği sağlamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemler, ürünlerin besin değerinde ve duyusal özelliklerinde kayıplara yol açması nedeniyle önemli sınırlılıklar taşımaktadır. Bu sınırlamalar hem endüstrinin

hem de araştırmacıların dikkatini "ısıl olmayan" yeni teknolojilere yöneltmiştir [8, 22, 23]. Böylelikle Isıl olmayan yöntemlerin geliştirilme ve yaygınlaşma nedenleri şu başlıklar altında özetlenebilir:

***D. Besin Değerini ve Fonksiyonel Özellikleri Koruma:***

Yüksek sıcaklık uygulamaları proteinlerin denatürasyonuna, vitaminlerin parçalanmasına ve duyusal kalite kayıplarına yol açmaktadır. Özellikle yumurta ürünlerinde köpürme, emülsifiye etme ve jel oluşturma gibi fonksiyonel özelliklerin korunması endüstri için kritik öneme sahiptir. Bundan dolayı ısıl olmayan teknolojiler mikrobiyal inaktivasyonu sağlarken protein yapısına daha az zarar verir. Böylece hem ürünün fonksiyonel özellikleri hem de biyolojik değeri korunmuş olur. Bu durum ise yumurtanın fonksiyonel kullanımının özellikle fırıncılık, mayonez üretimi ve işlenmiş gıda sanayinde sürdürülebilir olmasını sağlamaktadır.

***E. Tüketici Beklentisi ve Temiz Etiket Eğilimi:***

Günümüzde tüketiciler daha az işlenmiş, taze görünümlü, katkısız ve "doğal" ürünlere yönelmektedir. Isıl işlemler, yumurta ürünlerinde renk değişimine, pişmiş tat oluşumuna ve kıvam kayıplarına yol açarak bu beklentilere ters düşmektedir. Isıl olmayan yöntemler ise daha taze algısı yaratır ve duyusal özelliklerin korunmasını destekler. Ayrıca koruyucu katkı maddelerine duyulan ihtiyacı azaltarak "clean label" (temiz etiket) trendine uyum sağlar. Bu durum, özellikle Avrupa ve Kuzey Amerika pazarlarında ürün tercihinde belirleyici bir faktör haline gelmiştir [20].

***F. Enerji Verimliliği ve Çevresel Sürdürülebilirlik:***

Klasik pastörizasyon ve sterilizasyon işlemleri, uzun süreli ısıtma nedeniyle yüksek enerji tüketir ve karbon ayak izini artırır. Buna karşılık, Darbeli Elektrik Alan (PEF-Pulsed Electric Field) ve Yüksek Hidrostatik Basınç (HHP-High Hydrostatic Pressure) gibi ısıl olmayan teknolojiler daha kısa işlem süreleriyle çalışır, enerji verimliliği sağlar ve sürdürülebilir üretim hedefleriyle uyumludur. Gıda endüstrisinde ise enerji maliyetlerinin ve çevresel baskıların artması, bu teknolojilere olan ilgiyi hızlandırmaktadır. Böylelikle ısıl olmayan yöntemler yalnızca ürün kalitesi açısından değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik açıdan da cazip hale gelmiştir [21].

***G. Yasal Düzenlemeler ve Endüstriyel Uygulama Gereklilikleri:***

Kabuklu yumurtalarda *Salmonella* başta olmak üzere çeşitli patojenlerin oluşturduğu gıda güvenliği riski, uluslararası otoritelerin ürün kalitesini korurken mikrobiyal inaktivasyonu artıran alternatif yöntemlere yönelmesine neden olmuştur. Bu kapsamda ABD Gıda ve İlaç Dairesi (FDA-U.S.Food and Drug Administration), ABD Tarım Bakanlığı (USDA-U.S. Department of Agriculture) ve Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA-European Food safety Authority), geleneksel pastörizasyon yöntemlerinin sınırlılıklarını kabul ederek ısıl olmayan teknolojilere ilişkin bilimsel araştırmaları desteklemekte ve endüstriyel uygulanabilirliğini incelemektedir. FDA ve USDA, özellikle sıvı yumurtalarda *Salmonella* inaktivasyonu için UV-C ışınlama, elektrolize su ve ozonlama gibi tekniklerin pilot ölçekte uygulanmasına izin vermiş; bu yöntemlerin düşük işlem sıcaklıklarında etkili olabilmesi nedeniyle hassas ürünlerde potansiyel taşıdığını vurgulamıştır. Avrupa Birliği'nde ise EFSA, ozonun dezenfeksiyon amaçlı kullanımını "güvenli ancak proses parametrelerine bağlı olarak etkisi değişken" şeklinde değerlendirmekte; UV teknolojisinin ise yumurta kabuğu yüzeyinde etkili bir antimikrobiyal yöntem olarak kullanılabileceğini belirtmektedir. Ayrıca son yıllarda HHP uygulamaları, özellikle sıvı yumurtanın pastörizasyonunda Avrupa ve ABD'de çeşitli pilot tesislerde denenmeye başlanmış ve mikrobiyal güvenliği artırırken ürünün viskozite ve fonksiyonel özelliklerini daha iyi koruduğu rapor edilmiştir. Türkiye'de ise ozonlama ve elektrolize su uygulamaları, özellikle kabuklu yumurta yüzey dezenfeksiyonunda ticari ölçekte kullanılmaya başlamış olup, bazı büyük üreticiler bu yöntemleri konvansiyonel yıkama sistemlerine entegre etmiştir. HHP ve UV teknolojileri ise henüz yaygınlaşmamış olmakla birlikte, akademik araştırmalar ve pilot ölçekli çalışmalar artış göstermekte; yakın gelecekte mevzuat uyumunun sağlanmasıyla sanayi uygulamalarının genişlemesi beklenmektedir [24, 25].

***Ğ. Kabuklu Yumurtada Mikrobiyal Riskler ve Mevcut Uygulamalar***

Kabuklu yumurtalar, yüksek besin değerleri ve geniş tüketim alanları nedeniyle insan beslenmesinde kritik bir gıda maddesidir. Ancak kabuk yapısının gözenekli doğası ve üretim-dağıtım zinciri boyunca karşılaşabileceği çevresel koşullar, yumurtaları mikrobiyal kontaminasyona karşı hassas hale getirmektedir. Özellikle *Salmonella enterica* Serovar Enteritidis, kabuklu yumurtalarla ilişkilendirilen en önemli patojenlerden biri olarak gıda güvenliği açısından ciddi risk oluşturmaktadır [21]. Bu riskleri azaltmak amacıyla farklı ülkelerde çeşitli kontrol ve dekontaminasyon uygulamaları geliştirilmiştir. Örneğin; ABD'de yumurta kabuklarının yıkanması ve dezenfeksiyonu yasal bir zorunlulukken, Avrupa'da yumurtaların yıkanmadan satışı tercih edilmektedir. Böylelikle her iki yaklaşım da kabuk yüzeyindeki mikrobiyal yükü azaltmayı amaçlamakta; ancak kabuk yüzeyindeki doğal bariyer tabakası (kutikula), depolama koşulları ve hijyen uygulamaları gibi faktörler nihai mikrobiyal güvenliği belirleyici olmaktadır. Bunun yanında UV ışınlama, ozon, organik asitler ve yeni nesil

ısıl olmayan yöntemler gibi alternatif uygulamalar da son yıllarda araştırılmakta ve sınırlı ölçekte endüstriye entegre edilmektedir [21].

### *H. Yumurtanın Kabuk Yapısı ve Gözenekli Doğası:*

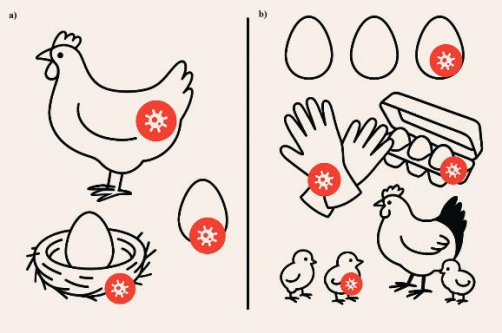
Yumurta kabuğu, büyük ölçüde kalsiyum karbonattan oluşan sert ve mineralize bir yapıya sahiptir. Ortalama 0,3–0,4 mm kalınlığında olan bu tabaka, yumurtayı fiziksel hasarlara karşı korurken aynı zamanda gaz değişimine de izin verir. Kabuğun en kritik özelliği de yüzeyinde yer alan 7.000–17.000 arasında değişen gözenek yapısıdır. Bu gözenekler, embriyonik gelişim süresince oksijen ($O_2$) ve karbondioksit ($CO_2$) difüzyonunu sağlarken; aynı zamanda dış ortamdan mikroorganizmaların geçişine de zemin hazırlayabilmektedir [21, 26, 27].

Kabuk gözenekleri (por) ise yalnızca büyüklük ve sayılarıyla değil, aynı zamanda üzerlerini kaplayan kutikula tabakası ile de önemlidir. Kutikula, organik madde ve proteinlerden oluşan ince bir kaplama olup mikroorganizmaların yumurta içine geçişini sınırlandıran ilk savunma hattıdır. Ancak, bu tabaka zaman içerisinde (ortalama 1 hafta), yıkandığında, mekanik işlem sırasında zarar gördüğünde veya depolama koşulları uygunsuz olduğunda etkinliğini kaybedebilir. Bu durum, özellikle *Salmonella enterica* Serovar Enteritidis gibi patojenlerin yumurta içine daha kolay nüfuz etmesine yol açmaktadır. Buna ek olarak, yumurtanın yüzeyinde bulunan mikro çatlaklar ve yıkama sonrası ortaya çıkabilen kutikula hasarı, kontaminasyon riskini artıran faktörler arasında yer almaktadır. Nem, sıcaklık ve depolama koşulları da mikroorganizmaların yumurta içine geçişini etkileyen faktörler kritik parametrelerdir. Örneğin, yüksek nem ve sıcaklık koşullarında kabuk geçirgenliği artmakta, bu da mikrobiyal büyümeyi kolaylaştırmaktadır [20].

### *I. Mikrobiyal Kontaminasyon Kaynakları:*

Kabuklu yumurtalarda mikrobiyal kontaminasyon hem dikey hem de yatay yollarla meydana gelebilmektedir. Dikey bulaşma, patojenlerin (özellikle *Salmonella enterica* Serovar Enteritidis) yumurtanın oluşum sürecinde ovaryum veya ovidukt dokularından doğrudan albümene ya da kabuk zarına geçmesiyle ortaya çıkar. Yumurta henüz kabukla kaplanmadan gerçekleşen bu durum, mikrobiyal yükün içeriğe taşınmasına neden olmakta ve gıda güvenliği açısından en kritik risklerden birini oluşturmaktadır [17, 21]. Yatay bulaşma ise yumurtanın çevresel temasları sonucunda gelişir. Tavuk dışkısı, yataklık materyali, folluk yüzeyleri, taşıma kasaları, işleme sırasında kullanılan ekipman ve işçi eldivenleri kontaminasyonun başlıca kaynakları arasında yer almaktadır. Ayrıca, yumurta yüzeyinde oluşan mikro çatlaklar ile yetersiz kutikula tabakası, mikroorganizmaların kabuk gözeneklerinden iç kısımlara geçişini kolaylaştırmaktadır. Depolama sürecinde sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörler de bu geçişi hızlandırmakta ve mikroorganizmaların kabuk yüzeyinde çoğalmasına zemin hazırlamaktadır [17]. Dolayısıyla kontaminasyonun önlenmesinde yalnızca üretim aşamasında alınan biyogüvenlik tedbirleri değil, aynı zamanda hasat sonrası uygulanan hijyenik işlemler (yıkama, kaplama, dezenfeksiyon, uygun ambalajlama) de kritik önem taşımaktadır. Bununla birlikte, konvansiyonel yöntemlerin sınırlılıkları nedeniyle son yıllarda UV ışınlama, ozon, soğuk plazma ve PEF gibi ısıl olmayan teknolojiler, yumurtalarda mikrobiyal kontaminasyonun kontrolünde alternatif çözümler olarak öne çıkmaktadır [21].

Literatür çalışmaları incelendiğinde, yumurtaların Şekil 2'de gösterildiği üzere, mikroorganizmanın yumurta ile nasıl temas ettiğine bağlı olarak iki şekilde patojenlerle kontamine olabileceği görülmektedir. Dikey iletim sırasında yumurta, tavuğun üreme sistemindeki oluşumu sırasında patojenle kontamine olmaktadır; bu durumda yumurta sarısı, albümin ve kabuk zarları gibi bileşenler için risk oluşmaktadır. Dikey geçişte en sık gözlenen mikroorganizma Salmonella *enterica* Serovar Enteritidis'tir. Yatay iletimde ise yumurtalar yumurtladıktan sonra dışkı, toz, folluk materyali, yem, ekipman veya insan teması gibi mikroorganizma açısından zengin yüzeylerle temas ederek kontamine olabilmektedir. Bununla birlikte, yumurtaların *Salmonella* ile kontaminasyonu konusundaki en önemli zorluklardan biri, *Salmonella Enteritidis*'in tavuklarda belirgin hastalık semptomları oluşturmadan yumurtalara geçiş yapabilmesidir. Ayrıca, yumurtaların mikrobiyal kalitesini etkileyen diğer faktörler; barınak sistemi, tavuk suşu/genotipi, hayvanın yaşı, mevsimsel değişiklikler ve depolama sıcaklığıdır [14].




**Şekil 2.** Kabuklu yumurtalarda mikrobiyal kontaminasyon kaynakları (a) dikey iletim ve (b) yatay iletim [14].

***J. Konvansiyonel Uygulamalar:***

Kabuklu yumurtalarda mikrobiyal kontaminasyonu azaltmak amacıyla uzun yıllardır çeşitli konvansiyonel yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerin başında yumurta yıkama işlemi gelmektedir. Yıkama işlemi sırasında deterjan ve dezenfektan içeren çözeltiler kullanılarak kabuk yüzeyindeki organik materyallerin, dışkının ve mikroorganizmaların uzaklaştırılması hedeflenmektedir. Özellikle alkali deterjanlar ve klor bazlı dezenfektanların, yüzeydeki patojen yükünü düşürmede etkili olduğu bildirilmektedir. Bununla birlikte, yıkama işleminde kullanılan suyun sıcaklığı ve kalitesi de kritik parametrelerdir. Literatürde, 40–50°C sıcaklıkta su ve uygun dezenfektan kombinasyonunun kabuk yüzeyinde bakterilerin iç kısımlara geçişini azalttığı; ancak daha yüksek sıcaklıkların kabuk yüzeyinde mikro çatlaklara yol açarak kontaminasyon riskini artırabileceği belirtilmektedir [28-31].

Yıkama sırasında dikkate alınması gereken bir diğer önemli unsur ise kullanılan kimyasal dezenfektanların seçimidir. Konvansiyonel yöntemlerde yaygın olarak tercih edilen dezenfektanlar arasında klor, kuaterner amonyum bileşikleri, iyot bazlı dezenfektanlar, perasetik asit ve hidrojen peroksit bulunmaktadır. Klor bazlı uygulamalar patojenleri hızlı bir şekilde inaktive etmesine rağmen, kalıntı bırakma riski ve tüketici güvenliği endişeleri nedeniyle tartışmalı hale gelmiştir [32]. Buna karşılık, perasetik asit ve hidrojen peroksit gibi ajanlar daha çevre dostu ve kalıntı riski düşük seçenekler olarak öne çıkmaktadır [33, 34]. Ayrıca, bazı çalışmalar asetik asit ve sitrik asit gibi organik asit çözeltileriyle yapılan uygulamaların da kabuk yüzeyinde *Salmonella* spp. gibi patojenleri baskıladığını ortaya koymuştur [21].

Yıkama sonrası kurutma ve soğuk depolama da konvansiyonel yöntemler arasında yer almaktadır. Hızlı kurutma, kabuk yüzeyinde nemin kalmasını önleyerek mikroorganizmaların çoğalmasını engellerken; düşük sıcaklıklarda depolama mikrobiyal gelişimi yavaşlatmaktadır [35]. Bununla birlikte, yapılan çalışmalar bu yöntemlerin tek başına kontaminasyonu tam olarak engelleyemediğini, yalnızca sınırlı düzeyde kontrol sağladığını göstermektedir.

Sonuç olarak, konvansiyonel yöntemler yumurta yüzeyindeki mikrobiyal yükü azaltmada önemli rol oynamaktadır; ancak %100 güvenlik sağlayamamaları, kimyasal kalıntı riski ve tüketici beklentileri bu yöntemlerin sınırlılıklarını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, son yıllarda ısıl olmayan yenilikçi teknikler (örneğin UV ışınlama, ozon ve soğuk plazma uygulamaları) kabuklu yumurtalarda mikrobiyal kontaminasyonun kontrolünde umut verici alternatifler olarak gündeme gelmiştir [14, 21].

***K. Isıl Olmayan İşleme Teknikleri***

Geleneksel ısıl işlemlerin yumurtanın fonksiyonel ve duyusal özelliklerinde kayıplara yol açabilmesi, son yıllarda ısıl olmayan işleme yöntemlerine olan ilgiyi artırmıştır. Bu teknolojiler, yalnızca mikrobiyal güvenliği sağlamakla kalmayıp aynı zamanda yumurtanın besin öğeleri ve fonksiyonel bileşenlerini koruma avantajı da sunmaktadır. Dahası, işlem sırasında düşük enerji tüketimi sağlamaları ve çevresel sürdürülebilirliği desteklemeleri nedeniyle gıda endüstrisinde önemli bir alternatif haline gelmektedirler [36]. Bu teknolojiler ise aşağıda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

***L. Yüksek Hidrostatik Basınç Teknolojisi:***

Yüksek hidrostatik basınç (HHP-High Hydrostatic Pressure)**,** gıda işleme alanında en yaygın incelenen ısıl olmayan yöntemlerden biridir. Bu teknikte ürün, 100–600 MPa arası basınca saniyeler ile dakikalar arasında değişen sürelerle maruz bırakılmaktadır. Uygulama sırasında sıcaklık artışı minimal düzeyde gerçekleştiği için, protein denatürasyonu veya vitamin kaybı gibi ısıl işlemlerde görülen olumsuzluklar büyük ölçüde önlenmektedir [37, 38].

Literatürde, HHP'nin özellikle yumurta ürünlerinde *Salmonella enterica* Serovar Enteritidis ve *Listeria monocytogenes* gibi patojenlerde ≥5 log azalma sağlayabildiği rapor edilmiştir [30]. Ayrıca, HHP uygulamalarının albüminin köpürme kapasitesini ve lizozim gibi antimikrobiyal proteinlerin aktivitesini koruduğu, dolayısıyla yumurtanın fonksiyonel özelliklerinin muhafaza edildiği gösterilmiştir [39]. Bunun yanında, kombinasyon teknikleri de dikkate değerdir; örneğin nisin + ultrases + HHP uygulamaları, mikrobiyal inaktivasyonu artırırken ürünün duyusal kalitesinde belirgin bir değişime yol açmamıştır [40].

Endüstriyel ölçekte değerlendirildiğinde ise, Japonya ve Avrupa'da HHP'nin yumurta pastörizasyonunda pilot uygulamalara alındığı bilinmektedir. Ancak yüksek ekipman maliyetleri ve sürekli üretim hatlarına entegrasyon zorlukları, bu teknolojinin yaygınlaşmasını sınırlayan başlıca faktörlerdir [21].

***M. Darbeli Elektrik Alanı Teknolojisi:***

Darbeli elektrik alan (PEF-Pulsed Electric Field)**,** gıdaların kısa süreli yüksek voltaj darbelerine (20–80 kV/cm) maruz bırakılması esasına dayanmaktadır. Bu işlem sırasında oluşan elektrik alanı, mikroorganizmaların hücre membranlarında elektroporasyon meydana getirerek hücre ölümüne yol açmaktadır. Dolayısıyla, PEF'in en

önemli avantajı, milisaniyeler içinde uygulanabilmesi ve bu sayede besin öğelerinin ve duyusal özelliklerin korunabilmesidir [36]. Sonuç olarak**,** PEF'in endüstriyel ölçekte kullanımı özellikle kabuklu yumurtada henüz sınırlı olmakla birlikte Avrupa'da bazı yumurta işleme tesislerinde pilot denemeler yapılmakta ve sıvı yumurta üzerinde birçok yayın bulunmaktadır. Bu bağlamda, PEF teknolojisi özellikle enerji verimliliği, temiz etiket beklentisi ve besin değerini koruma hedefleri doğrultusunda öne çıkan alternatif yöntemlerden biri olarak değerlendirilmektedir [21, 41, 42].

***N. Soğuk Plazma Teknolojisi:***

Soğuk plazma (CP-Cold Plasma)**,** atmosfer basıncında üretilen iyonize gazların mikrobiyal hücrelerle etkileşimine dayanan bir teknolojidir. Bu sistemde plazma bileşiminde yer alan reaktif oksijen ve azot türleri, serbest radikaller ve ultraviyole fotonları mikroorganizmaların hücre duvarlarına zarar vererek ölümüne neden olmaktadır [43, 44].

Nitekim literatür çalışmaları incelendiğinde**,** CP uygulamasının kabuklu yumurtalarda *Salmonella enterica* yükünü 120 saniye içerisinde 7 log'dan fazla azaltabildiğini ve aynı zamanda Haugh birimi, albümin viskozitesi ve pH gibi iç kalite parametrelerinde herhangi bir değişikliğe yol açmadığını göstermiştir. Farklı gaz ortamlarında (örneğin azot veya argon bazlı plazma) yapılan uygulamaların mikrobiyal inaktivasyonu daha da artırdığını rapor etmiştir [43, 45-47].

Endüstriyel ölçekte değerlendirildiğinde ise, CP'nin en büyük avantajı düşük enerji tüketimi ve kimyasal kalıntı bırakmamasıdır. Bununla birlikte**,** plazma jeneratörlerinin maliyeti ve proses parametrelerinin standardizasyonundaki zorluklar, bu teknolojinin yaygın kullanımını sınırlandırmaktadır [36, 48-54].

***O. Ozonlama Teknolojisi:***

Ozonlama, güçlü oksidatif kapasitesi sayesinde kabuklu yumurtalarda yüzey kontaminasyonunu azaltmak için son yıllarda öne çıkan ısıl olmayan yöntemlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Bu yöntemde ozon, mikroorganizmaların hücre zarında lipit peroksidasyonu oluşturarak ve DNA'ya zarar vererek hızlı bir şekilde inaktivasyona yol açmaktadır [36]. Literatürde yer alan çalışmalar, ozonun *Escherichia coli* ve *Salmonella enterica* Serovar Enteritidis gibi patojenlerde birkaç log düzeyinde azalma sağladığını göstermektedir [35-37, 55-57]. Ayrıca, ozonun yüksek oksidatif gücü, kimyasal kalıntı bırakmaması ve çevre dostu yapısı nedeniyle endüstriyel sanitasyon uygulamalarına uygun bir alternatif olduğu vurgulanmaktadır [21]. Bunun yanında, kuluçkahanelerde yapılan uygulamalarda ozonun formaldehit ve klor bazlı dezenfektanlara benzer etkinlik gösterdiği ve yumurta iç kalite parametreleri (örneğin albümin viskozitesi ve Haugh birimi) üzerinde olumsuz bir etki oluşturmadığı ortaya konmuştur [58].

Yüceer and Caner [59] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada taze tavuk yumurtalarının depolama süresince kalite özellikleri üzerine farklı işlemlerin etkilerini araştırmayı amaçlamış ve inceleme kapsamında yumurtalara ozon (6 ppm/4 dak), ultrases (450 W/4 dak) uygulanmış ve ayrıca şellak ve lizozim-kitosan solüsyonu ile kaplamalar yapılmıştır. Altı hafta süreyle oda sıcaklığında saklanan yumurtaların iç kalite parametreleri (ağırlık kaybı, albümin viskozitesi, Haugh birimi, sarı indeks, toplam çözünebilen maddeler, albumen ve yumurta sarısı pH değerleri) izlenmiştir. Ayrıca toplam mezofilik aerobik bakteri sayımı, Fourier dönüşümlü yakın kızılötesi (FT-NIR) spektral görüntüsü ve yumurta kabuğu kırılma dayanımı da izlenmiştir. Ozon ve ultrason işlemlerinin bakteri kalitesini korumaya yardımcı olduğu, ancak kabuk dayanımı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Kaplamalı yumurtalar en yüksek dayanım değerine (şellak: 3,63 ± 0,54 kgf; L-C: 3,56 ± 0,54 kgf) sahipken, ultrasonla işlem görmüş yumurtalar en düşük dayanım değerine (3,13 ± 0,78 kgf) sahip olduğu belirlenmiştir. FT-NIR ölçümü, tüm işlemlerin depolama boyunca emilim bantlarında azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Genel olarak, incelenen işlemler arasında, kaplamalar yumurta kabuğu kırılmasında daha yüksek dayanımla raf ömrünü uzatmak açısından potansiyele sahip iken, ozon ve ultrason ise sadece mikrobiyal kaliteyi korumaya ve raf ömrünü uzatmaya yardımcı olduğu tespit edilmiştir. Kontrol grubuna göre, şellak kaplama, iç kalite özelliklerini en iyi şekilde koruyarak Haugh birimi ve düşük ağırlık kaybında depolama stabilitesini arttırmıştır. Ozon ve ultrason işlemleri de raf ömrünü artırmaya yardımcı olmuş ancak şellak kaplama kadar etkili olmamıştır. Bu bulgular, kaplama ve fiziksel işlemlerin taze yumurta kalitesinin korunmasında potansiyel olarak kullanılabileceğini göstermektedir [59, 60]. Sonuç olarak ozonun etkinliği, uygulama süresi, gaz konsantrasyonu ve ortam nemi gibi faktörlere bağlı olarak değişmekte; ayrıca yüksek konsantrasyonlarda kabuk bütünlüğü ve kutikula tabakası üzerinde olumsuz etkiler görülebilmektedir [21, 36]. Bu durumda endüstriyel ölçekte etkin ve güvenli bir kullanım için optimum parametrelerin belirlenmesi kritik önem taşımaktadır [58-62].

***Ö. Darbeli Işık Teknolojisi:***

Darbeli ışık (PL-Pulsed Light), geniş spektrumlu ve yüksek enerjili ışık darbeleri kullanarak mikroorganizmaların DNA yapısını bozma ve hücre zarlarını parçalama prensibine dayanan bir teknolojidir. Bu yöntem, özellikle kabuklu yumurtaların yüzey dezenfeksiyonunda hızlı ve kalıntısız bir çözüm sunmasıyla öne çıkmaktadır [63]. Literatürde incelendiğinde ise, PL uygulamalarının kabuk yüzeyinde *Salmonella* ve *E. coli*

popülasyonlarını 3–4 log seviyesinde azalttığı ve bu süreçte ürünün duyusal özelliklerini koruduğu bildirilmiştir [36]. Benzer şekilde, PL'nin hem sofralık hem de kuluçka yumurtalarında mikrobiyal yükü düşürdüğü; ancak embriyo gelişimi ve civciv canlılığı üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığı da ortaya konmuştur [64]. Ayrıca, yumurtanın yüzeyinin tam olarak döndürülerek ışığa maruz bırakılmasının PL'nin etkinliğini artırdığı başka bir çalışmada rapor edilmiştir [64]. Daha güncel çalışmalarda ise, PL'nin soğuk plazma ve kitosan gibi doğal antimikrobiyal kaplamalarla kombine edildiğinde mikrobiyal yükü %99 oranında azalttığı ve buna rağmen ürün kalitesini koruduğu gösterilmiştir [65]. Bununla birlikte, PL'nin etkinliğinin yüzey gölgelenmesi olan bölgelerde azaldığı ve yüksek enerji yoğunluklarında kabuk yüzeyinde lokal ısınma ile mikro çatlak riskine yol açabileceği de belirtilmektedir [42, 63, 66, 67]. Sonuç olarak, endüstriyel açıdan değerlendirildiğinde PL, kısa işlem süresi ve kalıntısız yapısı sayesinde avantajlı bir teknoloji olarak görülmektedir; ancak maliyet, ekipman altyapısı ve standardizasyon gereklilikleri dikkate alındığında daha fazla optimizasyona ihtiyaç duyulduğu vurgulanmaktadır [14].

### *P. Ultrases Teknolojisi:*

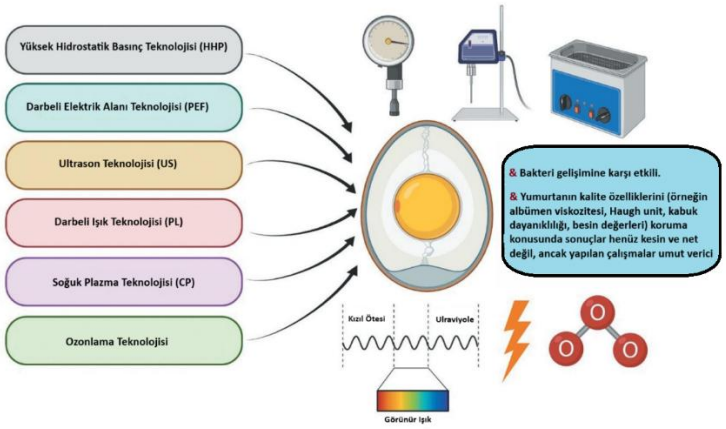
Ultrason/ultrases (Ultrasound-Sonication) teknolojisi, sıvı ortamlarda kavitasyon etkisiyle mikroorganizmaların hücre zarını parçalayarak inaktivasyona yol açan bir yöntemdir. Tek başına uygulandığında etkisi sınırlı olmakla birlikte, özellikle kombine tekniklerde tamamlayıcı bir rol oynamaktadır [21, 60, 68]. Nitekim literatürde yer alan çalışmalar da bu durumu desteklemektedir. Örneğin, Ribeiro, Casal, Lopes da Silva and Saraiva [69], ultrasonun nisin ve yüksek hidrostatik basınç ile birlikte kullanıldığında sıvı yumurta ürünlerinde *Salmonella* inaktivasyonunu belirgin şekilde artırdığını, ayrıca ürünün fiziksel ve kimyasal özelliklerini koruduğunu bildirmiştir. Ultrasonikasyon (90 W 3,5 dakika), termosonikasyon (52 °C, 90 W 3,5 dakika) ve pastörizasyon (57,5 °C, 25 dakika) işlemlerinin taze yumurtaların kalite özellikleri (HU-Haugh birimi, YI-yumurta sarısı indeksi, kuru madde, pH, köpük stabilitesi ve relatif köpük kapasitesi) ve kabuk mukavemeti üzerindeki etkileri depolama süresi boyunca değerlendirilmiştir. İşlem görmemiş grup ile işlem görmüş yumurtalar arasında HU değerlerinde önemli farklılıklar 10. günden itibaren gözlemlenmeye başlanmıştır. Önemli farklılıklar, hem işlenmemiş grupta (47,95) hem de ultrasonikasyon (55,56), termosonikasyon (63,64) ve pastörizasyon (73,28) ile işlenmiş yumurtalarda HU'da bulunmuştur ve en yüksek HU değeri 30. günde pastörize yumurtalarda bulunmuştur. Termosonikasyon işlemlerinin, işlenmemiş gruba kıyasla daha yüksek YI değerlerini koruduğu ve değerler arasında önemli farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Ultrasonikasyon, termosonikasyon ve pastörizasyon, yumurtaların depolama stabilitesini artırmak için etkili teknolojiler olarak değerlendirilmektedir. Kavitasyon ve sıcaklık, yumurta kabuğunun mikro yapısı üzerinde olumsuz etkilere sahip olup, termosonikasyon ve sonikasyon, taze yumurtaların fonksiyonel özelliklerini geliştirmek için uygulanabilen yeni işleme yöntemidir [70]. Yapılan çalışmalar ultrasonun özellikle kombine teknolojilerde kritik bir katkı sağlayabileceğini göstermektedir [59, 70-75]. Sonuç olarak, endüstriyel açıdan ultrasonun en önemli avantajları düşük enerji gereksinimi ve kimyasal madde kullanımına ihtiyaç duymamasıdır. Ancak, tek başına uygulandığında yeterli düzeyde güvenlik sağlamaması, bu yöntemin daha çok kombine sistemlerde kullanılmasına neden olmaktadır [21, 36, 59, 60, 68, 70, 76-80].

### *R. Alternatif Isıl Olmayan Yaklaşımlar: Elektrolize Su, Basınçlı Karbondioksit ve Doğal Antimikrobiyaller*

Kabuklu yumurtalarda mikrobiyal kontaminasyonun kontrolü için son yıllarda öne çıkan alternatif ısıl olmayan yöntemler arasında elektrolize su, basınçlı karbondioksit ve doğal antimikrobiyaller bulunmaktadır. Elektrolize su, tuz çözeltilerinin elektroliziyle elde edilen ve hipokloröz asit (HOCl) gibi güçlü oksidanlar içeren bir dezenfektan olup, *Salmonella* spp. ve *E. coli* gibi patojenlerde 2–4 log seviyesinde azalma sağlayabilmekte ve kalıcı kimyasal kalıntı bırakmamaktadır [14, 36]. Benzer şekilde, basınçlı karbondioksit uygulamaları hücre zarında çözünerek pH düşüşü oluşturmakta ve membran geçirgenliğini bozarak mikroorganizmaların inaktivasyonunu sağlamaktadır. Bu yöntem sayesinde ise *Salmonella enterica* Serovar Enteritidis yükünde 3–4 log düzeyinde azalma elde edilebilmekte, ayrıca albümin viskozitesi ve Haugh birimi gibi kalite parametrelerinde herhangi bir olumsuz etki görülmemektedir [36]. Bunun yanı sıra, doğal antimikrobiyaller de "temiz etiket" yaklaşımıyla tüketici beklentilerini karşılayan yenilikçi çözümler sunmaktadır. Örneğin kitosan kaplamalarının *Salmonella* yükünü 2–3 log seviyesinde azaltarak raf ömrünü uzattığı, timol ve karvakrol gibi fenolik bileşiklerin ise kabuk yüzeyinde mikrobiyal gelişimi baskıladığı rapor edilmiştir [81, 82]. Sonuç olarak tüm bu yöntemler, kalıntısız yapıları, çevre dostu olmaları ve duyusal özellikler üzerinde minimal etki yaratmaları sayesinde gıda güvenliği açısından umut verici alternatifler olarak öne çıkmaktadır. Bu durumda etkinliğin uygulama parametrelerine bağlı olması ve endüstriyel ölçekte standardizasyon eksiklikleri, daha fazla araştırma ve validasyon çalışmasına duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

Isıl olmayan işleme teknolojilerinin yumurta ürünlerine etkilerini açıklamak için de çalışmada görsel ve tablolar kullanılmıştır**.** Şekil 3'de, yüksek hidrostatik basınç, darbeli elektrik alan, ultrases, darbeli ışık, soğuk plazma ve ozonlama gibi yöntemlerin mikrobiyal inaktivasyon gücü ile fonksiyonel ve besinsel özellikler üzerindeki etkileri görsel olarak sunulmaktadır. Bu şekil, her bir teknolojinin avantajlarını ve sınırlılıklarını karşılaştırmalı biçimde ortaya koyarak endüstriyel uygulamalar açısından yol gösterici bir çerçeve

oluşturmaktadır. Öte yandan, Tablo 1'de söz konusu teknolojilerin yumurta ürünleri üzerindeki etkilerinin özetlendiği sistematik bir değerlendirme yer almakta olup, mikrobiyal güvenlik, fonksiyonel kalite, duyusal özellikler ve endüstriyel uygulanabilirlik bakımından elde edilen sonuçlar bir arada verilmektedir. Dolayısıyla hem Şekil 3 hem de Tablo 1'de, ısıl olmayan yöntemlerin geleneksel pastörizasyonun sınırlılıklarını aşmadaki potansiyelini ortaya koymakta ve gelecekteki araştırmalar için önemli bir referans noktası sunmaktadır [36].




**Şekil 3.** Isıl olmayan teknolojilerin yumurta kalitesine etkileri [36].

**Tablo 1.** Taze ve işlenmiş yumurtada yeni işleme teknolojilerinin etkilerinin özeti [36]

| Teknoloji | Etki |
|---|---|
| **Yüksek Hidrostatik Basınç (HHP)** | Numunede hafif sıcaklık artışı;<br>- Protein denatürasyonuna, doku değişikliklerine ve renk değişikliklerine neden olabilir;<br>- Pastörizasyona benzer şekilde optimize edilmiş koşullarda mikrobiyal inaktivasyon (patojenik ve bozulmaya neden olan mikroorganizmalar);<br>- In vitro alerjeniteyi azaltma kapasitesi sınırlıdır<br>- Doku, renk ve işlevsel özelliklerde düşük etki; |
| **Darbeli Elektrik Alan (PEF)** | - Optimize edilmiş koşullarda pastörizasyona benzer mikrobiyal inaktivasyon (patojen mikroorganizmalar);<br>- Alerjenitenin azaltılması;<br>- In vitro antioksidan ve anti-inflamatuar aktiviteyi artırabilir<br>- İşlevsel özellikleri iyileştirir ve rengi (sıvı bütün yumurta) ve yumurta kabuğunu etkileyebilir; |
| **Ultrason (US)** | - Optimize edilmiş koşullarda pastörizasyona benzer mikrobiyal inaktivasyon (patojen mikroorganizmalar);<br>- In vitro alerjenitenin azaltılması;<br>- In vitro antioksidan aktiviteyi artırabilir<br>- Numunede hafif sıcaklık artışı;<br>- Fonksiyonel özelliklerin korunması (sıvı yumurta ürünleri) ancak rengi etkileyebilir (hafif kahverengileşme); |
| **Darbeli Işık (PL)** | - Optimize edilmiş koşullarda pastörizasyona benzer mikrobiyal inaktivasyon (patojen mikroorganizmalar);<br>- Optimize edilmiş koşullarda alerjenitenin azaltılması<br>- Numunede minimum sıcaklık artışı;<br>- Fonksiyonel özelliklerin ve kalitenin korunması; |
| **Soğuk Plazma (CP)** | - Optimize edilmiş koşullarda pastörizasyona benzer mikrobiyal inaktivasyon (patojen mikroorganizmalar)<br>- Fonksiyonel özelliklerin ve kalitenin korunması; |
| **Ozonlama** | - Mikrobiyal inaktivasyon (patojenik mikroorganizmalar) optimize edilmiş koşullarda 3 log azalma ile sınırlıdır |

### *S. Isıl Olmayan Yöntemlerin Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi*

Isıl olmayan işleme teknikleri, geleneksel pastörizasyonun sınırlılıklarını aşarak hem mikrobiyal güvenliği sağlamakta hem de yumurtanın fonksiyonel ve besinsel özelliklerini korumada önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntemlerin etkinliği, kalite üzerine etkileri, endüstriyel uygulanabilirliği ve tüketici kabulü açısından farklılıklar gösterebilmektedir.

Mikrobiyal inaktivasyon etkinliği değerlendirildiğinde, yüksek hidrostatik basınç, soğuk plazma (CP) ve darbeli elektrik alan uygulamalarının en yüksek log azaltma değerlerini sağladığı görülmektedir. HHP'nin Salmonella Enteritidis ve *Listeria monocytogenes* üzerinde ≥5 log düzeyinde azalma oluşturduğu; CP'nin yalnızca 120 saniyelik bir uygulama ile *Salmonella* yükünü 7 logdan fazla düşürebildiği bildirilmiştir [29, 33]. Benzer şekilde PEF teknolojisi de kısa süreli uygulamalar sonucunda 4–5 log seviyelerinde etkili mikrobiyal inaktivasyon sağlayabilmektedir [83]. Buna karşın ozonlama ve darbeli ışık yöntemleri özellikle kabuk yüzeyinde etkili olmakta ve genellikle 2–4 log düzeyinde azalma elde edilmektedir. Elektrolize su (EW) ve basınçlı karbondioksit ($pCO_2$) uygulamaları da yüzey kontaminasyonunu azaltmada etkili olmakla birlikte, elde edilen sonuçlar kullanılan konsantrasyon, basınç ve işlem süresi gibi parametrelere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [14].

Kalite ve fonksiyonel özellikler açısından değerlendirildiğinde, HHP ve PEF uygulamalarının albüminin köpürme kapasitesi ve lizozim aktivitesi gibi önemli fonksiyonel özellikleri büyük ölçüde koruduğu rapor edilmiştir. CP'nin Haugh birimi, pH ve albümin viskozitesi gibi kalite parametrelerinde belirgin bir değişime yol açmadığı görülmektedir. Ozonlama ve PL doğru parametrelerle uygulandığında ürünün duyusal özelliklerini koruyabilmekte; ancak yüksek doz uygulamalar kabuk bütünlüğünde ve kutikula tabakasında bozulmalara neden olabilmektedir [36]. Doğal antimikrobiyaller—özellikle kitosan kaplamalar ve fenolik bileşikler—mikrobiyal yükü azaltırken raf ömrünü uzatabilmekte, ancak yüksek konsantrasyonlarda tat ve aroma üzerinde istenmeyen değişiklikler oluşturabilmektedir.

Ekonomik ve operasyonel uygulanabilirlik yönü incelendiğinde, yöntemler arasında belirgin maliyet farklılıkları bulunmaktadır. HHP ve CP yüksek yatırım maliyetleri nedeniyle endüstride geniş ölçekli kullanımda sınırlı kalırken; ozonlama ve elektrolize su gibi teknikler düşük maliyetli, çevre dostu ve işletmeye kolay entegre edilebilir olmalarıyla öne çıkmaktadır. PL teknolojisi ise hızlı işlem süresi ve kalıntı bırakmayan yapısı sayesinde sürdürülebilirlik açısından avantajlı bulunmakla birlikte, ekipman maliyeti ve gölgelenme etkisi gibi dezavantajlar içermektedir [14].

Tüketici kabulü ve yasal düzenlemeler açısından bakıldığında, "temiz etiket" yaklaşımı doğrultusunda doğal antimikrobiyaller ve ozonlama gibi yöntemlerin daha fazla kabul gördüğü görülmektedir. Bununla birlikte, pek çok ülkede bu teknolojilerin henüz regülasyonlara tam anlamıyla entegre edilmemiş olması ve standardizasyon eksiklikleri, endüstride geniş ölçekli yaygınlaşmayı sınırlamaktadır. Bu nedenle, farklı teknolojilerin kombine edilmesi ve mevzuat altyapısının güçlendirilmesi, gelecekte endüstriyel uygulamalara geçiş için kritik önem taşımaktadır [14, 36]. Sonuç olarak, ısıl olmayan yöntemlerin karşılaştırmalı değerlendirmesi kapsamında, incelenen teknolojilere ait avantaj ve dezavantajların özetlendiği Tablo 2, her bir tekniğin mikrobiyal inaktivasyon kapasitesini, ürünün besinsel ve fonksiyonel özelliklerine etkilerini ve endüstriyel uygulanabilirliğini sistematik bir biçimde karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.

**Tablo 2.** Isıl Olmayan İşleme Tekniklerin Avantaj ve Dezavantaj Tablosu [41].

| Teknoloji | Avantajlar | Dezavantajlar |
|---|---|---|
| **UV Radyasyonu** | - Kimyasal kullanılmaz<br>- Isıl olmayan yöntem<br>- Gıdanın kalite özelliklerinde az değişim | - Uzun süreli maruziyet çalışanlar için zararlı olabilir<br>- Gölgelenme etkisi etkinliği azaltır<br>- Yüksek ekipman maliyeti |
| **Yüksek Hidrostatik Basınç (HHP)** | - Homojen etki sağlar<br>- Hem sıvı hem katılarda uygulanabilir | - Protein denatürasyonu ve doku değişimi riski |
| **Basınçlı Karbondioksit (HPCD)** | - GRAS kabul edilen gazdır, toksik değildir<br>- Enerji verimliliği yüksektir | - Katı gıdalarda etkinliği sınırlı<br>- Ticari uygulamaları az |
| **Darbeli Elektrik Alan (PEF)** | - Kısa sürede uygulanır<br>- Besin ve duyusal kalite korunur<br>- Enerji tasarruflu | - Köpüren ve iletkenliği düşük gıdalarda uygulanamaz<br>- Endüstriyel uygulama kısıtlı |

| | | |
|---|---|---|
| **Soğuk Plazma (CP)** | - Kimyasal kalıntı bırakmaz<br>- Düşük enerji tüketir<br>- Yüzey dekontaminasyonunda etkilidir | - Ekipman maliyeti yüksek<br>- Parametrelerin standardizasyonu zordur |
| **Ozonlama** | - Güçlü oksidatif kapasite<br>- Kimyasal kalıntı bırakmaz<br>- Çevre dostu | - Yüksek konsantrasyon kabuk veya yüzey yapısına zarar verebilir<br>- Etkinliği koşullara bağlı |
| **Darbeli Işık (PL)** | - Hızlı ve kalıntısız<br>- Yüzey mikroorganizmalarında etkilidir | - Gölgelenme problemi<br>- Yüksek enerji lokal ısınma ve mikro çatlak riski oluşturabilir |
| **Ultrason (US)** | - Düşük enerji ihtiyacı<br>- Kombine uygulamalarda etkili<br>- Kimyasal gerektirmez | - Tek başına etkisi sınırlı<br>- Yüksek yoğunluk kalite değişimine yol açabilir |
| **Elektrolize Su (EW)** | - Düşük maliyetli ve çevre dostu<br>- *Salmonella* ve *E. coli*'de etkin | - Organik madde varlığında etkinliği düşer<br>- Depolamada kararlılığı sınırlıdır |
| **Doğal Antimikrobiyaller** | - Tüketici tarafından kabul görür<br>- "Temiz etiket" yaklaşımına uygundur | - Yüksek konsantrasyonlarda tat/koku değişimi yaratabilir |

### *Ş. Gelecek Perspektifler*

Isıl olmayan işleme teknikleri, yumurta ürünlerinde gıda güvenliğini sağlarken aynı zamanda duyusal ve fonksiyonel özelliklerin korunmasında önemli fırsatlar sunmaktadır. Ancak bu teknolojilerin tam anlamıyla endüstriyel ölçekte uygulanabilmesi için çeşitli araştırma, optimizasyon ve regülasyon ihtiyaçları devam etmektedir. Gelecek perspektifler kapsamında, hibrit uygulamalar, ölçeklenebilirlik, tüketici kabulü, besin öğelerinin korunumu ve akıllı sistemlerle entegrasyon gibi konular ön plana çıkmaktadır [9]. Türkiye'deki yerel yumurta endüstrisi ve ileri işleme ve hijyen teknolojilerine adaptasyonunda en önemli engeller, yüksek başlangıç yatırım maliyetleri ve özellikle otomasyon sistemlerinin gerektirdiği sürekli enerji ihtiyacının yarattığı finansal yüklerdir. Ayrıca, mevcut kümes altyapılarının bu modern teknolojilere entegrasyonu için gereken teknik uzmanlık eksikliği (uzman kalifiye personel) ve döviz kuruna bağlı ekipman fiyatları, küçük ve orta ölçekli üreticilerin adaptasyon sürecini zorlaştırmaktadır. Ayrıca küçük ve orta ölçekli işletmelerde finansmana erişim güçlüğü ve mevcut altyapının yeni sistemlerle uyumsuzluğu, teknolojik dönüşüm sürecini yavaşlatabilmektedir. Bu nedenle, kamu destekleri ve sektöre yönelik teşvik mekanizmaları adaptasyonun hızlandırılmasında kritik rol oynamaktadır.

### *T. Endüstriyel Ölçeklenebilirlik ve Ekonomik Uygulanabilirlik*

Isıl olmayan işleme tekniklerinin gıda güvenliği ve kalite koruma açısından sunduğu avantajlar oldukça umut verici olsa da, bu yöntemlerin geniş çaplı endüstriyel uygulamalara geçişinde hâlâ bazı zorluklar bulunmaktadır. Özellikle yüksek hidrostatik basınç ve soğuk plazma gibi teknolojiler, yüksek yatırım maliyetleri nedeniyle çoğunlukla laboratuvar veya pilot ölçekli çalışmalarla sınırlı kalmaktadır. Nitekim Japonya'da yüksek hidrostatik basınç teknolojisi sıvı yumurta pastörizasyonunda kısmen uygulanmış olsa da, Avrupa'da maliyet ve altyapı sorunları sebebiyle yaygın bir kullanım alanı bulamamıştır. Ayrıca yüksek hidrostatik basınç etkinliğine rağmen yüksek ekipman maliyetlerinin ticari kullanımını engellediğini vurgulamaktadır. Öte yandan darbeli elektrik alan gibi enerji verimliliği yüksek yöntemlerin ise geleneksel pastörizasyona kıyasla az enerji tükettiği rapor edilmiştir. Dolayısıyla gelecekte yapılacak araştırmaların öncelikli hedefi, bu yöntemlerin ekonomik açıdan daha uygulanabilir hale getirilmesi olacaktır [14, 84-87].

### *U. Kombine Teknolojiler ve Sinerjik Yaklaşımlar*

Tek bir ısıl olmayan yöntemin her zaman istenilen mikrobiyal güvenlik seviyesini sağlamaması, araştırmacıları farklı teknolojileri bir arada kullanmaya yöneltmektedir. Kombine yaklaşımlar sayesinde hem mikrobiyal güvenlik artırılmakta hem de duyusal ve besinsel kalite daha iyi korunabilmektedir. Ultrasesin yüksek hidrostatik basınç ile uygulanmasının sıvı yumurta ürünlerinde *Salmonella* inaktivasyonunu önemli ölçüde artırdığını, aynı zamanda ürünün fizikokimyasal özelliklerinde (örneğin albümin viskozitesi, pH ve köpürme kapasitesi) kayda değer bir değişime olmadığı bildirmiştir. Benzer şekilde nisin gibi doğal antimikrobiyallerin HHP veya PEF ile birlikte uygulanmasının tek başına yapılan uygulamalara göre daha güçlü bir mikrobiyal kontrol sağladığını rapor edilmiştir [88]. Sonuç olarak bulgular, gelecekte kombine teknolojilerin gıda endüstrisinde daha fazla öne çıkacağını ve ticari olarak daha uygulanabilir hale geleceğini göstermektedir.

### *Ü. Besin Öğelerinin ve Fonksiyonel Özelliklerin Korunması*

Yumurtanın protein yapısı ve biyolojik değerinin korunması, endüstride en kritik konulardan biridir. Isıl işlemler genellikle protein denatürasyonuna, vitamin kayıplarına ve fonksiyonel özelliklerin bozulmasına neden olmaktadır. Buna karşılık, ısıl olmayan yöntemlerin en önemli avantajı bu özellikleri büyük ölçüde koruyabilmeleridir. Nitekim yüksek hidrostatik basınç uygulamalarının albüminin köpürme kapasitesini muhafaza ettiğini rapor etmiştir. Ayrıca, soğuk plazma uygulamalarında Haugh birimi ve albümin viskozitesi gibi kalite parametrelerinde herhangi bir değişikliğin gözlemlendiğini bildirmişlerdir. Öte yandan, ozonlama ve darbeli ışık gibi bazı yöntemlerde yüksek doz uygulamalarının kabuk bütünlüğü ve kutikula tabakası üzerinde olumsuz etkilere yol açabildiği vurgulanmıştır [36]. Dolayısıyla, gelecekte her yöntemin optimum parametrelerinin belirlenmesi ve fonksiyonel kaliteyi koruyacak işlem koşullarının geliştirilmesi, endüstriyel ölçekte başarılı bir uygulama için kritik öneme sahiptir.

### *V. Tüketici Kabulü ve Düzenleyici Çerçeve*

Tüketici kabulü ve düzenleyici çerçeve açısından baktığımızda, yeni teknolojilerin ticarileşmesinde yalnızca teknik başarı değil, aynı zamanda tüketici kabulü ve yasal düzenlemeler de belirleyici olmaktadır. Özellikle ışınlama gibi yöntemler bilimsel olarak güvenli bulunsa da tüketicilerde olumsuz algıya yol açtığı için yaygınlaşamamıştır. Buna karşılık doğal antimikrobiyaller ve ozonlama gibi yöntemler, "temiz etiket" yaklaşımına uygun olmaları nedeniyle tüketici nezdinde daha fazla kabul görmektedir [58]. Bununla birlikte birçok ülkede bu yöntemler için net regülasyonların bulunmaması, ticari uygulamaları sınırlayan bir faktördür. Gelecekte uluslararası düzenleyici çerçevenin güçlendirilmesi, bu teknolojilerin yaygın kullanımında kilit rol oynayacaktır.

### *Y. Akıllı Sistemler ve Dijital Teknolojilerle Entegrasyon*

Gıda endüstrisinde dijitalleşme ve akıllı sistemlerin yükselişi, ısıl olmayan yöntemlerin gelişimini de önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle hiper spektral görüntüleme, Raman spektroskopisi ve sensör tabanlı kalite kontrol sistemleri ile entegre edilen süreçler, ürün kalitesinin gerçek zamanlı olarak izlenmesine imkân sağlamaktadır. Ayrıca, son yıllarda yapay zekâ ve makine öğrenimi algoritmalarının proses parametrelerinin optimizasyonunda ve mikrobiyal inaktivasyonun öngörülmesinde kullanıldığı çalışmalar giderek artış göstermektedir [89]. Bu gelişmeler, yalnızca ürün güvenliği ve kaliteyi artırmakla kalmamakta, aynı zamanda enerji verimliliği ve operasyonel sürdürülebilirlik açısından da avantaj sağlamaktadır. Dolayısıyla, gelecekte ısıl olmayan işleme tekniklerinin akıllı fabrikalar ve Endüstri 4.0 uygulamalarıyla bütünleşmesi, gıda endüstrisinde devrim niteliğinde yenilikler getirecek bir adım olarak değerlendirilmektedir [21].

## II. SONUÇ

Kabuklu yumurtalarda mikrobiyal kontaminasyonun önlenmesi, gıda güvenliğinin sağlanması ve ürün kalitesinin korunması açısından kritik bir öneme sahiptir. Geleneksel ısıl işlemler her ne kadar güvenilir bir yöntem olarak uzun yıllardır uygulanıyor olsa da, bu yöntemler yumurtanın fonksiyonel ve besinsel özelliklerinde kayıplara yol açabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda yüksek hidrostatik basınç, darbeli elektrik alan, atımlı ışık, soğuk plazma, ozonlama, ultrason, elektrolize su, basınçlı karbondioksit ve doğal antimikrobiyaller gibi ısıl olmayan yöntemler, alternatif teknolojiler olarak ön plana çıkmıştır. Bu yöntemler, mikrobiyal inaktivasyonda yüksek başarı sağlarken yumurtanın protein yapısı, vitamin içeriği ve fonksiyonel özelliklerinin korunmasına da olanak tanımaktadır. Örneğin HHP'nin albüminin köpürme kapasitesini koruduğu, CP'nin Haugh birimi ve albümin viskozitesi gibi kalite parametrelerinde değişikliğe yol açmadığı, PEF'in ise kısa sürede güçlü mikrobiyal azalmalar sağladığı literatürde rapor edilmiştir Buna karşılık, ozonlama ve PL gibi yüzey odaklı yöntemlerin kabuk bütünlüğünde bozulmalara yol açabileceği, doğal antibiyotiklerin ise yüksek konsantrasyonlarda duyusal özelliklerde değişime neden olabileceği belirtilmektedir. Endüstriyel ölçekte uygulanabilirlik konusunda bazı sınırlılıklar devam etmektedir. HHP ve CP gibi teknolojilerin yüksek ekipman maliyetleri, sürekli üretim hatlarına entegrasyondaki zorluklar ve standardizasyon eksiklikleri yaygın kullanımı sınırlamaktadır. Ayrıca, tüketici kabulü ve yasal düzenlemelerdeki belirsizlikler de ticari uygulamaların önünde engel teşkil etmektedir.

Sonuç olarak, kabuklu yumurtalarda ısıl olmayan işleme teknikleri, gıda güvenliği ve kalite koruma hedeflerini birlikte sağlayabilme potansiyeline sahip yenilikçi çözümler olarak öne çıkmakta, ancak yaygın endüstriyel kullanımı için daha fazla araştırma ve düzenleyici çerçeveye ihtiyaç duyulmaktadır.

## KAYNAKLAR

[1] Mine, Y. (2007). Recent advances in egg protein functionality in the food system. *World's Poultry Science Journal*. 58(1): 31-39. https://doi.org/10.1079/WPS20020005.

[2] Abeyrathne, E.D., Lee, H.Y. & Ahn, D.U. (2013). Egg white proteins and their potential use in food processing or as nutraceutical and pharmaceutical agents--a review. *Poultry Science*. 92(12): 3292-9. https://doi.org/10.3382/ps.2013-03391.

[3] Omana, D.A., Wang, J. & Wu, J. (2010). Ovomucin – a glycoprotein with promising potential. *Trends in Food Science & Technology*. 21(9): 455-463. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.07.001.

[4] Liu, Y.F., Oey, I., Bremer, P., Carne, A & Silcock, P. (2019). Modifying the functional properties of egg proteins using novel processing techniques: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.* 18(4): 986-1002. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12464.

[5] Razi, S.M., Fahim, H., Amirabadi, S. & Rashidinejad, A. (2023). An overview of the functional properties of egg white proteins and their application in the food industry. *Food Hydrocolloids.* 135: 108183. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108183.

[6] Marventano, S., Godos, J., Tieri, M., Ghelfi, F., Titta, L., Lafranconi, A., Gambera, A., Alonzo, E., Sciacca, S., Buscemi, S., Ray, S., Del Rio, D., Galvano, F. & Grosso, G. (2020). Egg consumption and human health: an umbrella review of observational studies. *International Journal of Food Sciences and Nutrition.* 71(3): 325-331. https://doi.org/10.1080/09637486.2019.1648388.

[7] Zhang, X., Lv, M., Luo, X., Estill, J., Wang, L., Ren, M., Liu, Y., Feng, Z., Wang, J., Wang, X. & Chen, Y. (2020). Egg consumption and health outcomes: a global evidence mapping based on an overview of systematic reviews. *Annals of Translational Medicine.* 8(21): 1343. https://doi.org/10.21037/atm-20-4243.

[8] Jadhav, H.B., Annapure, U.S. & Deshmukh, R.R. (2021). Non-thermal technologies for food processing. *Frontiers in Nutrition.* 8: 657090. https://doi.org/10.3389/fnut.2021.657090.

[9] Afraz, M.T., Khan, M.R., Roobab, U., Noranizan, M.A., Tiwari, B.K., Rashid, M.T., Inam-ur-Raheem, M., Hashemi, S.M.B. & Aadil, R.M. (2020). Impact of novel processing techniques on the functional properties of egg products and derivatives: A review. *Journal of Food Process Engineering.* 43(12): e13568. https://doi.org/10.1111/jfpe.13568.

[10] Miranda, J.M., Anton, X., Redondo-Valbuena, C., Roca-Saavedra, P., Rodriguez, J.A., Lamas, A., Franco, C.M. & Cepeda, A. (2015). Egg and egg-derived foods: effects on human health and use as functional foods. *Nutrients.* 7(1): 706-29. https://doi.org/10.3390/nu7010706.

[11] Hemeda, S., Abdallh, M., Ibrahim, B. & Ali, E. (2025). Assessment of bacterial contamination, physical quality& internal pH (albumen and yolk) of table eggs in Khartoum North. *Scientific Reports.* 15(1): 39663. https://doi.org/10.1038/s41598-025-23273-8.

[12] Crivei, I.C., Marc, R.A., Rațu, R.N., Mureșan, C.C., Postolache, A.N., Stoica, F., Dumitru Velescu, I. & Albu, A. (2025). Advanced risk and hazard analysis in the egg sorting-packing units industry from supplier selection to delivery in chain stores under global food safety initiative integrated food safety programs. *Heliyon.* 11(4). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42587.

[13] White, S., Jackson-Davis, A., Gordon, K., Morris, K., Dudley, A., Abdallah-Ruiz, A., Allgaier, K., Sharpe, K., Yenduri, A.K., Green, K. & Santos, F. (2025). A review of non-thermal interventions in food processing technologies. *Journal of Food Protection.* 88(6): 100508. https://doi.org/10.1016/j.jfp.2025.100508.

[14] Bermudez-Aguirre, D. and Niemira, B.A. (2023). A review on egg pasteurization and disinfection: Traditional and novel processing technologies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.* 22(2): 756-784. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13088.

[15] Chousalkar, K.K., Khan, S. & McWhorter, A.R. (2021). Microbial quality, safety and storage of eggs. *Current Opinion in Food Science.* 38: 91-95. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.10.022.

[16] EFSA, E. (2024). The european union one health 2023 zoonoses report. *EFSA Journal.* 22(12): e9106. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.9106.

[17] Gantois, I., Ducatelle, R., Pasmans, F., Haesebrouck, F., Gast, R., Humphrey, T.J. & Van Immerseel, F. (2009). Mechanisms of egg contamination by Salmonella Enteritidis. *FEMS Microbiology Reviews.* 33(4): 718-38. https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2008.00161.x.

[18] Mendoza, I.C., Luna, E.O., Pozo, M.D., Vasquez, M.V., Montoya, D.C., Moran, G.C., Romero, L.G., Yepez, X., Salazar, R., Romero-Pena, M. & Leon, J.C. (2022). Conventional and non-conventional disinfection methods to prevent microbial contamination in minimally processed fruits and vegetables. *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie.* 165: 113714. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113714.

[19] El-Sayed, A.S., Ibrahim, H & Farag, M.A. (2022). Detection of potential microbial contaminants and their toxins in fermented dairy products: a comprehensive review. *Food Analytical Methods.* 15(7): 1880-1898. https://doi.org/10.1007/s12161-022-02253-y.

[20] Park, Y.S., Yoo, I.J., Jeon, K.H., Kim, H.K., Chang, E.J & Oh, H.I. (2003). Effects of various eggshell treatments on the egg quality during storage. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences.* 16(8): 1224-1229. https://doi.org/10.5713/AJAS.2003.1224.

[21] Bermudez-Aguirre, D. and Niemira, B.A. (2022). Pasteurization of foods with ultrasound: The present and the future. *Applied Sciences.* 12(20): 10416. https://doi.org/10.3390/app122010416.

[22] Wang, Q., Yang, Y., Li, Z., Jin, H., Shu, D., Jin, Y., Jin, G & Sheng, L. (2024). Research advances on the effects of thermal and non-thermal processing techniques on the physicochemical properties and microbiological control of liquid eggs. *Food Control.* 155: 110106. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110106.

[23] Mahmoud, B.Y., Semida, D.A., Elnesr, S.S., Elwan, H & El-Full, E.A. (2022). Approaches of egg decontamination for sustainable food safety. *Sustainability.* 15(1): 464. https://doi.org/10.3390/su15010464.

[24] Mazurek, J., Holbert, L., Parrish, M.K & Salehi, E. (2005). Raw eggs—lessons learned from an outbreak of Salmonella serotype enteritidis infections associated with meringue pie. *Journal of Public Health Management and Practice.* 11(3): 201-207. https://doi.org/10.1097/00124784-200505000-00004.
[25] Gast, R.K., Regmi, P., Guraya, R., Jones, D.R &erson, K.E & Karcher, D.M. (2019). Contamination of eggs by Salmonella Enteritidis in experimentally infected laying hens of four commercial genetic lines in conventional cages and enriched colony housing. *Poultry Science.* 98(10): 5023-5027. https://doi.org/10.3382/ps/pez222.
[26] Yüceer, M., Temizkan, R & Caner, C. (2012). Fonksiyonel gıda olarak yumurta: Bileşenleri ve fonksiyonel özellikleri. *Akademik Gıda.* 10(4): 70-76.
[27] Yüceer, M. (2019). *Yumurta ve yumurta ürünleri işleme teknolojisi ve uygulamaları* Sidas Medya Ltd.Şti. İzmir, Turkiye.
[28] Choi, B.-G., Min, J.-H & Yoon, K.-S. (2017). Effects of washing and storage temperature on quality and safety of washed shell eggs. *Journal of the East Asian Society of Dietary Life.* 27(1): 78-87. https://doi.org/10.17495/easdl.2017.2.27.1.78.
[29] Kulshreshtha, G., Ward, C., Calvert, N.D., Benavides-Reyes, C., Rodriguez-Navarro, A.B., Diep, T & Hincke, M.T. (2024). Effect of egg washing and hen age on cuticle quality and bacterial adherence in table eggs. *Microorganisms.* 12(10). https://doi.org/10.3390/microorganisms12102027.
[30] Hutchison, M.L., Gittins, J., Walker, A., Moore, A., Burton, C & Sparks, N. (2003). Washing table eggs- a review of the scientific and engineering issues. *World's Poultry Science Journal.* 59(2): 233-248. https://doi.org/10.1079/WPS20030015.
[31] Hudson, L.K., Harrison, M.A., Berrang, M.E & Jones, D.R. (2016). Alternative antimicrobial commercial egg washing procedures. *Journal of Food Protection.* 79(7): 1216-20. https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-15-423.
[32] Davydovych, V., Shevchenko, L., Melnyk, V., Busol, L & Pylypchuk, O. (2025). Quality and safety of chicken eggs after washing and disinfection with a chlorine-containing agent. *Animal Science and Food Technology.* 16(1): 141-157. https://doi.org/10.31548/animal.1.2025.141.
[33] Melo, E.F., Climaco, W.L.S., Triginelli, M.V., Vaz, D.P., de Souza, M.R., Baiao, N.C., Pompeu, M.A & Lara, L.J.C. (2019). An evaluation of alternative methods for sanitizing hatching eggs. *Poultry Science.* 98(6): 2466-2473. https://doi.org/10.3382/ps/pez022.
[34] Al-Ajeeli, M.N. (2013). Development of best practices for shell egg disinfection based upon efficacy and egg quality. Texas A&M University, Yüksek Lisans Tezi. Teksas, ABD.
[35] Grudlewska-Buda, K., Wiktorczyk-Kapischke, N., Wałecka-Zacharska, E., Kwiecińska-Piróg, J., Gryń, G., Skowron, K.J., Korkus, J., Gospodarek-Komkowka, E., Bystroń, J., Budzyńska, A., Kruszewski, S., Paluszak, Z &rzejewska, M., Wilk, M & Skowron, K. (2022). Effect of radiant catalytic ionization and ozonation on Salmonella spp. on eggshells. *Foods.* 11(16): 2452. https://doi.org/10.3390/foods11162452.
[36] Agregán, R., Munekata, P.E.S., Putnik, P., Pateiro, M., Bursać Kovačević, D., Zavadlav, S & Lorenzo, J.M. (2021). The use of novel technologies in egg processing. *Food Reviews International.* 39(5): 2854–2874. https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1980887.
[37] Rodriguez-Romo, L.A. and Yousef, A.E. (2005). Inactivation of Salmonella enterica Serovar Enteritidis on shell eggs by ozone and UV radiation. *Journal of Food Protection.* 68(4): 711-717. https://doi.org/10.4315/0362-028x-68.4.711.
[38] Naderi, N., House, J.D., Pouliot, Y & Doyen, A. (2017). Effects of high hydrostatic pressure processing on hen egg compounds and egg products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.* 16(4): 707-720. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12273.
[39] Buzrul, S. (2021). High hydrostatic pressure applications on liquid whole egg. *World's Poultry Science Journal.* 77(1): 71-90. https://doi.org/10.1080/00439339.2020.1866963.
[40] Huang, E., Mittal, G.S & Griffiths, M.W. (2006). Inactivation of Salmonella Enteritidis in liquid whole egg using combination treatments of pulsed electric field, high pressure and ultrasound. *Biosystems Engineering.* 94(3): 403-413. https://doi.org/10.1016/j.biosystemeng.2006.03.008.
[41] Sampedro, F., Rodrigo, D., Martinez, A., Barbosa-Canovas, G.V & Rodrigo, M. (2006). Review: Application of pulsed electric fields in egg and egg derivatives. *Food Science and Technology International.* 12(5): 397-405. https://doi.org/10.1177/1082013206070430.
[42] Dunn, J. (1996). Pulsed light and pulsed electric field for foods and eggs. *Poultry Science.* 75: 1133-1136. https://doi.org/10.3382/ps.0751133.
[43] Niemira, B.A., Bermudez-Aguirre, D., Sites, J & Ukuku, D.O. (2025). *Cold plasma as a novel food processing technology*, in *Nonthermal Processing Technologies for Food*. p. 597-614.
[44] Akbar, U., Srivastava, S., Dar, A.H., Dash, K.K., Mondol, S.A., Pandey, V.K., Majeed, T & Sidiqi, U.S. (2024). Potential of cold plasma in enhancing egg white protein for sustainable food applications: a comprehensive review. *Sustainable Food Technology.* 2(6): 1631–1651. https://doi.org/10.1039/d4fb00155a.

[45] Abdoli, B., Khoshtaghaza, M.H., Ghomi, H., Torshizi, M.A.K., Mehdizadeh, S.A., Pishkar, G & Dunn, I.C. (2023). Cold atmospheric pressure air plasma jet disinfection of table eggs: Inactivation of Salmonella enterica, cuticle integrity and egg quality. *International Journal of Food Microbiology.* 410: 110474. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110474.

[46] Mandal, R., Singh, A & Pratap Singh, A. (2018). Recent developments in cold plasma decontamination technology in the food industry. *Trends in Food Science & Technology.* 80: 93-103. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.07.014.

[47] Niemira, B.A. (2012). Cold plasma decontamination of foods. *Annual Review of Food Science and Technology.* 3: 125-142. https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101132.

[48] Moritz, M., Wiacek, C., Koethe, M & Braun, P.G., (2017). Atmospheric pressure plasma jet treatment of Salmonella Enteritidis inoculated eggshells. *International Journal of Food Microbiology.* 245: 22-28. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.01.004.

[49] Stolz, N., Weihe, T., Stachowiak, J., Braun, P., Schlüter, O & Ehlbeck, J. (2015). *Decontamination of shell eggs by using non-thermal atmospheric pressure plasma*, in *5th International Conference on Biomedical Engineering and Technology (ICBET 2015)*, IACSIT Press: Singapure. p. 81-84.

[50] Wan, Z., Chen, Y., Pankaj, S.K & Keener, K.M. (2017). High voltage atmospheric cold plasma treatment of refrigerated chicken eggs for control of Salmonella Enteritidis contamination on egg shell. *LWT - Food Science and Technology.* 76: 124-130. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.10.051.

[51] Ragni, L., Berardinelli, A., Vannini, L., Montanari, C., Sirri, F., Guerzoni, M.E & Guarnieri, A. (2010). Non-thermal atmospheric gas plasma device for surface decontamination of shell eggs. *Journal of Food Engineering.* 100(1): 125-132. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.036.

[52] Dasan, B.G., Yildirim, T & Boyaci, I.H. (2018). Surface decontamination of eggshells by using non-thermal atmospheric plasma. *International Journal of Food Microbiology.* 266: 267-273. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.12.021.

[53] Movasaghi, M., Heydari, M.M., Schwean-Lardner, K., Kirychuk, S., Thompson, B & Zhang, L. (2025). Investigating cold plasma jet effectiveness for eggshell surface decontamination. *Food Control.* 168: 110928. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110928.

[54] Moritz, M., Wiacek, C., Weihe, T., Ehlbeck, J., Weltmann, K.D & Braun, P.G. (2021). Effect of cold atmospheric pressure plasma treatment of eggshells on the total bacterial count inoculated Salmonella Enteritidis and selected quality parameters. *Plasma Processes and Polymers.* 18(1): 2000061. https://doi.org/10.1002/ppap.202000061.

[55] Perry, J.J. (2010). Ozone based treatments for inactivation of Salmonella enterica Serovar Enteritidis in shell eggs. The Ohio State University, Doktora Tezi. Colombus, Ohio, ABD.

[56] Rodríguez Romo, L.A. (2004). Control of Salmonella enterica Serovar Enteritidis in shell eggs by ozone, ultraviolet radiation& heat. The Ohio State University, Doktora Tezi. Colombus, Ohio, ABD.

[57] Perry, J.J. and Yousef, A.E. (2013). Factors affecting thermal resistance of Salmonella enterica Serovar Enteritidis ODA 99-30581-13 in shell egg contents and use of heat-ozone combinations for egg pasteurization. *Journal of Food Protection.* 76(2): 213-9. https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-12-324.

[58] Souza, L.C., Silva Junior, J.L.d., Rufino, J.P.F., Nazaré, S.C.d & Mendonça, M.A.d.F. (2024). Efficiency of ozone compared to commercial sanitizers for hatching eggs from older breeders. *Acta Scientiarum. Animal Sciences.* 46: e65262. https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v46i1.65262.

[59] Yüceer, M. and Caner, C. (2020). The effects of ozone, ultrasound and coating with shellac and lysozyme–chitosan on fresh egg during storage at ambient temperature. Part II: microbial quality, eggshell breaking strength and FT-NIR spectral analysis. *International Journal of Food Science & Technology.* 55(4): 1629-1636. https://doi.org/10.1111/ijfs.14422.

[60] Yüceer, M. and Caner, C. (2020). The effects of ozone, ultrasound and coating with shellac and lysozyme–chitosan on fresh egg during storage at ambient temperature – part 1: interior quality changes. *International Journal of Food Science & Technology.* 55(1): 259-266. https://doi.org/10.1111/ijfs.14301.

[61] Yuceer, M., Aday, M.S & Caner, C. (2016). Ozone treatment of shell eggs to preserve functional quality and enhance shelf life during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture.* 96(8): 2755-63. https://doi.org/10.1002/jsfa.7440.

[62] Yüceer, M. and Caner, C. (2016). Ozon uygulamasının taze yumurtanın mikrobiyel kalitesi üzerine depolama süresince etkisinin belirlenmesi. *Gıda.* 41(1): 15-22. https://doi.org/10.15237/gida.GD15040.

[63] Lasagabaster, A., Arboleya, J.C & de Marañón, I.M. (2011). Pulsed light technology for surface decontamination of eggs: Impact on Salmonella inactivation and egg quality. *Innovative Food Science and Emerging Technologies.* 12(2): 124-128. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.01.007.

[64] Cassar, J.R., Bright, L.M., Patterson, P.H., Mills, E.W & Demirci, A. (2021). The efficacy of pulsed ultraviolet light processing for table and hatching eggs. *Poultry Science.* 100(3): 100923. https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.12.021.

[65] Obileke, K., Onyeaka, H., Miri, T., Nwabor, O.F., Hart, A., Al-Sharify, Z.T., Al-Najjar, S & Anumudu, C. (2022). Recent advances in radio frequency, pulsed light& cold plasma technologies for food safety. *Journal of Food Process Engineering.* 45(10). https://doi.org/10.1111/jfpe.14138.

[66] Levy, C., Gatt, G., Busnel, M., Chemaly, M., Coignard, M & Valette, M.A. (2009) *Decontamination of egg shells using a pulsed light treatment*, in *World Poultry Science Association (WPSA), Proceedings of the 8th Avian French Research Days, St Malo, France, 25-26 March 2009*, World's Poultry Science Association (WPSA), Beekbergen, Netherlands.

[67] Hierro, E., Manzano, S., Ordonez, J.A., de la Hoz, L & Fernandez, M. (2009). Inactivation of Salmonella enterica Serovar Enteritidis on shell eggs by pulsed light technology. *International Journal of Food Microbiology.* 135(2): 125-30. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.07.034.

[68] Caner, C. and Yüceer, M. (2015). Maintaining functional properties of shell eggs by ultrasound treatment. *Journal of the Science of Food and Agriculture.* 95(14): 2880-91. https://doi.org/10.1002/jsfa.7029.

[69] Ribeiro, A.C., Casal, S., Lopes da Silva, J.A & Saraiva, J.A. (2023). Effects of sequential combination of moderate pressure and ultrasound on subsequent thermal pasteurization of liquid whole egg. *Foods.* 12(13): 2459. https://doi.org/10.3390/foods12132459.

[70] Caner, C., Arslan, P.G & Yüceer, M. (2025). The efficiency of thermosonication, ultrasonication and pasteurization on the storage stability of fresh eggs. *Innovative Food Science & Emerging Technologies.* 102: 103969. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.103969.

[71] Yüceer, M., Yıldırım, G & Caner, C. (2022). The effects of sonication on the stability of eggs during extended storage. *International Journal of Food Science & Technology.* 57(9): 6046-6054. https://doi.org/10.1111/ijfs.15958.

[72] Arzeni, C., Pérez, O.E & Pilosof, A.M.R. (2012). Functionality of egg white proteins as affected by high intensity ultrasound. *Food Hydrocolloids.* 29(2): 308-316. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.03.009.

[73] Sert, D., Aygun, A & Demir, M.K. (2011). Effects of ultrasonic treatment and storage temperature on egg quality. *Poultry Science.* 90(4): 869-75. https://doi.org/10.3382/ps.2010-00799.

[74] Yüceer, M. and Caner, C. (2021). The impact of coatings and novel processing techniques on the functionality of table eggs during extended storage period at ambient temperature. *Journal of Food Processing and Preservation.* 45(3): e15261. https://doi.org/10.1111/jfpp.15261.

[75] Yüceer, M. (2023). Characterization of pasteurized and sonicated whole shell egg and evaluating egg's interior quality during storage period. *Journal of Food Process Engineering.* 46(1): 1-6. https://doi.org/10.1111/jfpe.14194.

[76] Yüceer, M. (2018). Sıvı yumurtada ultrases tekniği kullanımının ürünün bazı fiziksel ve fonksiyonel özellikleri üzerindeki etkisi. *Gıda.* 43(6): 1019-1029. https://doi.org/10.15237/gida.GD18079.

[77] Yüceer, M. and Caner, C. (2018). Ultrasound; a novel and Innovative processing method for egg and egg products preservation. *Journal of Chemical Biology and Pharmaceutical Chemistry.* 1(1:4): 1-3.

[78] Yüceer, M. (2020). Sıvı yumurta sarısının ultrases tekniğiyle işlenmesi ile yapısal özelliklerinin karakterizasyonu ve reolojik davranışının belirlenmesi. *Akademik Gıda.* (18(4)): 402-410. https://doi.org/10.24323/akademik-gida.850921.

[79] Yüceer, M. (2022). Pastörizasyon ve ultrasonikasyon işlemi uygulanan kabuklu yumurta kullanılarak üretilen beze ürünlerinin fiziki-fonksiyonel özelliklerinin belirlenmesi *Catering Guide.* 18(97): 56-59.

[80] Yüceer, M. (2023). Investigation of the effects of reverse osmosis and ultrafiltration treatments on physicochemical, techno-functional& rheological characteristics of liquid egg albumen and prepared meringue cookie batter. *Acta Alimentaria.* 52(2): 317-329. https://doi.org/10.1556/066.2023.00039.

[81] Siroli, L., Glicerina, V., Capelli, F., Patrignani, F., Fiorini, M &risano, V., Minelli, M., Gherardi, M., Lanciotti, R., Colombo, V & Romani, S. (2023). Influence of high-pressure homogenization treatments combined with lysozyme activated packaging on microbiological and technological quality of vegetable smoothie during shelf life. *Food Packaging and Shelf Life.* 37: 101093. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101093.

[82] Rubilar, J.F., Cruz, R.M., Khmelinskii, I & Vieira, M.C. (2013). Effect of antioxidant and optimal antimicrobial mixtures of carvacrol, grape seed extract and chitosan on different spoilage microorganisms and their application as coatings on different food matrices. *International Journal of Food Studies.* 2(1): 22-38. https://doi.org/10.7455/ijfs/2.1.2013.a2.

[83] Sun, S., Wu, X., Hu, B., Guo, M., Zhao, X & Wang, J. (2024). High voltage pulsed electric field: A novel method for killing parasitic eggs on the surface of raisins. *Food Res Int.* 196: 115127. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115127.

[84] Bermúdez-Aguirre, D., Corradini, M.G., Candoğan, K & Barbosa-Cánovas, G.V. (2016). *High pressure processing in combination with high temperature and other preservation factors*, in *High Pressure Processing of Food: Principles, Technology and Applications*, V.M. Balasubramaniam, Barbosa-Cánovas, V.G & Lelieveld, L.M.H., Editors, Springer New York: New York, NY. p. 193-215.

[85] Bermúdez-Aguirre, D., Mobbs, T & Barbosa-Cánovas, G.V. (2011). *Ultrasound applications in food processing*, in *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*,, H. Feng, Editor, Springer Science+Business Media, LLC. p. 65-105.
[86] Yi, B. and Xu, H. (2023). Research and development status of prepared foods in china: A review. *Applied Sciences.* 13(14): 7998. https://doi.org/10.3390/app13147998.
[87] Aganovic, K., Hertel, C., Vogel, R.F., Johne, R., Schluter, O., Schwarzenbolz, U., Jager, H., Holzhauser, T., Bergmair, J., Roth, A., Sevenich, R., Bandick, N., Kulling, S.E., Knorr, D., Engel, K.H & Heinz, V. (2021). Aspects of high hydrostatic pressure food processing: Perspectives on technology and food safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.* 20(4): 3225-3266. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12763.
[88] Nema, P.K., Sehrawat, R., Ravichandran, C., Kaur, B.P., Kumar, A., Tarafdar, A & Aadil, R.M. (2022). Inactivating food microbes by high-pressure processing and combined nonthermal and thermal treatment: A review. *Journal of Food Quality.* 2022: 1-27. https://doi.org/10.1155/2022/5797843.
[89] Mondal, P.P., Galodha, A., Verma, V.K., Singh, V., Show, P.L., Awasthi, M.K., Lall, B., Anees, S., Pollmann, K & Jain, R. (2023). Review on machine learning-based bioprocess optimization, monitoring& control systems. *Bioresource Technology.* 370: 128523. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128523.