

COMU Journal of Marine Sciences and Fisheries

Journal Home-Page: <http://jmsf.dergi.comu.edu.tr> Online Submission: <http://dergipark.org.tr/jmsf>



REVIEW

Non-Thermal Processing Techniques for Extending Shelf-Life of Fresh Fish

Serpil Aday

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Biga Meslek Yüksekokulu, Çanakkale, Türkiye

<https://orcid.org/0000-0002-2896-1191>

Received: 01.09.2025 / Accepted: 08.10.2025 / Published online: 22.12.2025

Keywords:

Fish preservation
High pressure processing
Cold plasma
Pulsed electric field
Irradiation
Active packaging
Ultrasound

Abstract: The seafood sector has substantial obstacles in maintaining product quality and prolonging shelf-life to satisfy consumer expectations for fresh, healthy, and nutritious fish. Traditionally used cold storage or freezing techniques extend the shelf life of fish to a certain extent, but they are insufficient because they cannot stop microbial, enzymatic, and oxidative deterioration to the desired level. Therefore, to guarantee safety and maintain the quality of fish, various non-thermal approaches have been used and are undergoing constant development in recent years. This review describes the principles and antimicrobial effects of new non-thermal food processing technologies such as high-pressure processing (HPP), cold plasma (CP), pulsed electric field (PEF), irradiation, active packaging (AP), and ultrasound. It discusses the principles and antimicrobial mechanisms of action of these new non-thermal food processing technologies and specifically addresses their applications in various fish species in terms of microbial inactivation and physicochemical properties. Furthermore, the benefits along with the drawbacks of these technologies are also examined.

Anahtar kelimeler:

Balık muhafazası
Yüksek basınç işlemi
Soğuk plazma
Darbeli elektrik alan
Işınlama
Aktif ambalajlama
Ultras ses

Taze Balığın Raf Ömrünü Uzatmak için Termal Olmayan İşleme Teknikleri

Öz: Deniz ürünleri sektörü, müşterilerin taze, sağlıklı ve besleyici balık beklentilerini karşılamak için ürün kalitesini korumak ve raf ömrünü uzatmak konusunda önemli engellerle karşı karşıyadır. Geleneksel olarak kullanılan soğuk depolama veya dondurma teknikleri, balığın raf ömrünü belirli ölçüde uzatsa da mikrobiyal, enzimatik ve oksidatif bozulmaları istenilen düzeyde durduramadığı için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, balığın kalitesini korumak ve gıda güvenliğini sağlamak için çeşitli termal olmayan yaklaşımlar kullanılmakta ve son yıllarda sürekli olarak geliştirilmektedir. Bu derlemede, yüksek basınçlı işleme (YBİ), soğuk plazma (SP), darbeli elektrik alan (DEA), ışınlama, aktif ambalajlama (AA) ve ultras ses gibi yeni termal olmayan gıda işleme teknolojilerinin prensipleri ve antimikrobiyal etki mekanizmaları açıklanmakta ve özellikle mikrobiyal inaktivasyon ve fizikokimyasal özellikler açısından çeşitli balık türlerinde bu teknolojilerin uygulamalarından bahsedilmektedir. Ayrıca, bu teknolojilerin avantajları ve dezavantajları da incelenmektedir.

Giriş

Deniz ürünleri endüstrisi, dünya çapında milyonlarca insana gıda, istihdam ve gelir sağlayan küresel ekonominin önemli bir parçasıdır. Deniz ürünleri sektörü, yıllık 200 milyar doların üzerinde satış gerçekleştirmekte ve dünya çapında 56 milyondan fazla kişiye istihdam sağlamaktadır. Ancak deniz ürünleri endüstrisi, büyüme potansiyelini sınırlayan ve sürdürülebilirliğini tehdit eden birçok zorlukla karşı karşıyadır. Su ürünleri endüstrisinin karşılaştığı en önemli zorluklardan biri gıda güvenliğidir (Russo vd., 2024).

Deniz ürünlerinden bir tanesi olan balıklarda görülen bozulmada; depolama süresi ve sıcaklık ürünün nihai kalitesi için çok önemli faktörler olarak görünse de, esas olarak bu ürünlerin kendine özgü bileşimi ve yapısı bozulmayı etkileyen en önemli unsurlardır. Balıkların bozulabilirliğinin ana nedeni, protein olmayan azotlu bileşiklerinin yüksek içeriği ve etin düşük asitliği (pH > 6)

olup, bu koşullar ürünlerin organoleptik özelliklerini etkileyen mikroorganizma gelişimine elverişlidir. Bununla birlikte, bozulma oranı balıkların türüne ve gemideki hijyen koşullarına da bağlıdır (Speranza vd., 2021).

Sonuç olarak, su ürünlerinin bozulması sırasında protein degradasyonu ve lipit oksidasyonu meydana gelmekte; bunlar ürünlerin koku, tat ve tekstüründe değişikliklere neden olan kalite kayıplarına sebep olmaktadır. Bu nedenle balıkların kalitelerini korumak için uygun işleme ve koruma teknikleri gerekmektedir. Kokuşma, yağ oksidasyonu, bakteri çoğalması, enzimatik ve mikrobiyolojik bozulma gibi değişimler geleneksel koruma teknikleri (soğutma, dondurma, kimyasal uygulama, termal işlemler vb.) ile yeterince önlenememektedir (Rabiepour vd., 2024). Balıklarda raf ömrünü uzatmak amacıyla geleneksel bir yöntem olarak kullanılan termal işlem tasarlamak zorlu bir iştir çünkü

*Corresponding author: serpiladay@gmail.com

mikroorganizmaları ve enzimleri inaktive etmek için gereken ısı miktarı, ürünlerde kuru yapı ve pullanma gibi istenmeyen değişikliklere neden olabilmektedir (Rosnes vd., 2011). Ayrıca uygulanan ısı işlemi; aşırı ısınma sonucu gıdalarda besin değerinin düşmesi veya olumsuz duysal özelliklerin ortaya çıkması gibi istenmeyen değişikliklere de yol açabilmektedir (Olatunde ve Benjakul, 2018). Bu nedenle; günümüzde tüketicilerin, görünüş ve lezzet açısından üstün özelliklere sahip, yüksek besin değerli ve uzun raf ömürlü ürünlere olan ilgisinin artması, geleneksel termal yöntemlerin alternatifini veya ikamesi olarak yeni termal olmayan gıda işleme teknolojilerinin geliştirilmesini teşvik etmektedir (Zhao vd., 2019). Yeni muhafaza teknikleri; mikrobiyal bozulmayı etkili bir şekilde önleyerek ürünün raf ömrünü uzatmaktadır. Ürünün kalite ve besin değerlerinde, tekstür ve lezzetinde ise sınırlı derecede olumsuz değişiklikler meydana getirmektedir (Ali vd., 2022). Genellikle önemli ölçüde besin kaybına neden olan geleneksel termal işleme yöntemlerinin aksine, yüksek basınçlı işleme (YBİ), soğuk plazma (SP), darbeli elektrik alan (DEA), ışınlama, aktif ambalajlama (AA) ve ultrases gibi teknolojiler raf ömrünü uzatmanın yanı sıra, deniz ürünlerinin besin değerini korumaya da yardımcı olmaktadır.

Bu derlemenin amacı, taze balık depolaması için termal olmayan koruma tekniklerinden olan yüksek basınçlı işleme, soğuk plazma, darbeli elektrik alan, ışınlama, aktif ambalajlama ve ultrases teknolojilerinin kapsamlı bir analizini sunmak, bunların antimikrobiyal etki mekanizmalarını incelemek, raf ömrü ve fizikokimyasal özellikler üzerindeki etkinliğini ortaya koyarak bu teknolojilerin yaratabileceği olumsuzlukları irdelemektir.

Yüksek basınçlı işleme

Prensip

YBİ gıda işleme sistemi, işlenen gıdalarda minimum fiziksel ve kimyasal değişikliklere yol açan üç ilkeye (Le Chatelier ilkesi, mikroskobik düzenleme ilkesi ve izostatik ilke) dayanmaktadır. İşlem sırasında, numunelerin tüm yönlerine eşit olarak dağıtılan tutarlı bir basınç sağlanması nedeniyle; basınç moleküler bağlanma veya konfigürasyon üzerinde hiçbir etkiye sahip olmamaktadır. Sonuç olarak, basınç kaldırıldığında ürün orijinal şekline geri dönmektedir (Bharatbhai ve Shyni, 2024). YBİ işlemi üç işlem parametresi ile karakterize edilmektedir: sıcaklık (T), basınç (P) ve maruz kalma süresi (t). Aroma bileşikleri, vitaminler ve mineraller gibi düşük moleküler ağırlıklı moleküller, kovalent bağların çok düşük sıkıştırılabilirliği nedeniyle YBİ'den nadiren etkilenmektedir. Öte yandan, proteinler ve nişasta gibi makromoleküller, YBİ sırasında termal işlemlerle benzer şekilde doğal yapılarını değiştirebilmektedirler (Castrica vd., 2021). Termal pastörizasyona alternatif olarak başlangıçta benimsenen endüstriyel YBİ prosedürü, ortam sıcaklığında ve 550–600 MPa basınçta kısa bir işleme süresi (3-10 dk) gerektirmektedir. Bununla birlikte, adyabatik ısıtma ve YBİ işlemi sırasında meydana gelen sıcaklık artışı nedeniyle, işlenen ürünlerde sıcaklık artışının neden olabileceği potansiyel kalite bozulmasını önlemek için

basınç ileten sıvının (yani su) 4–8 °C aralığında tutulduğu bir işlem uygulanmaktadır (Tsevdou vd., 2023).

Antimikrobiyal etki mekanizması

Genel olarak, YBİ işlemi mikroorganizmaları hücre duvarındaki ve hücre zarlarındaki değişimler yoluyla inaktive etmektedir. Basınç işlemi hücre zarlarında hasara neden olarak hücre geçirgenliğini bozmakta ve ozmotik tepkimeye neden olmaktadır. Ayrıca hücre içi pH'ı koruma yeteneğini de devre dışı bırakmaktadır. 100 MPa'ya kadar olan basınç, zar proteininde konformasyonel değişikliğe ve zara bağlı enzimin işlevini kaybetmesini sağlamaktadır. 100-220 MPa basınçlarda, protein alt birimlerinde ayrışma ve konformasyonel değişiklikler meydana gelmektedir. 220 MPa veya daha yüksek basınçta, protein açılması ve arayüz proteininin ayrılması nedeniyle zar yapısı tahrip olup parçalanmaktadır. Bunlar hücre içi materyalin sızmasına ve çekirdeğin yıkımına yol açmaktadır (Romulo, 2021).

Taze balıklarla ilgili olarak, YBİ işleminin farklı balık türlerinin fizikokimyasal ve mikrobiyal özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ismaiel vd. (2025) tarafından sardalyeler üzerinde yapılan çalışmada YBİ; 400 MPa ve 600 MPa olarak iki basınç seviyesiyle, her basınç seviyesi için dört farklı uygulama süresinde (1; 2,5; 5; 10 dk) test edilmiştir. Basınç ve uygulama sürelerinin artırılması, depolama sırasında sertlik ve çignenebilirlik seviyelerinin artmasına neden olmuştur. YBİ numunelerinin uçucu bileşen profili, depolama sonunda yalnızca uçucu oksidasyon bileşikleri (heksanal ve 2,4-heksadienal) geliştiren kontrol numunelerine kıyasla önemli ölçüde farklı bulunmuştur. Zura-Bravo vd. (2023) tarafından Şili uskumrusu üzerinde yapılan çalışmada 450 MPa ve 550 MPa'da 3 dakika süreyle uygulanan YBİ işlemi sonucunda, pH, toplam uçucu bazik azot, trimetilamin, renk ve tekstür parametreleri işlenmemiş ve işlenmiş numuneler arasında önemli değişiklikler gösterirken, su tutma kapasitesi ise etkilenmemiştir. Avrupa Levrek filetolarında, Tsevdou vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada örnekler (100–400 MPa; 3–25 °C; 5–10 dakika) YBİ işlemine tabi tutulduktan sonra değerlendirilmiştir. Buna göre 100 MPa basınç uygulandığında 0 °C'de 1–5 gün raf ömrü uzatımı elde edilmiş, daha yüksek basınçlarda ise, uygulanan basınç ve sıcaklığa bağlı olarak filetoların raf ömründe 5 kata kadar artış sağlanmıştır. Vakumlu paketleme ile birlikte yüksek basınçlı işlem, filetoların raf ömrünün uzatılmasında ek bir etki göstermiş ve aerobik olarak depolanan ürünlere kıyasla raf ömrünü 4-12 gün uzatmıştır. Ayrıca, yüksek basınçlı işlem, depolama süresi boyunca lipit oksidasyonunu önlemiş ve ikincil lipit oksidasyon ürünlerinin oluşmadığını göstermiştir. Levrekteki proteolitik enzimler üzerine (Chéret vd., 2005) yapılan çalışmada 500 MPa'ya kadar yüksek basınçlı işleme, katepsin B, H ve L'nin aktivitesini artırırken, katepsin D'nin aktivitesi 300 MPa'ya kadar artmış, 300 MPa'nın üzerindeki basınçlarda ise azalmıştır. Kalpain aktivitesi ile ilgili olarak, yüksek basınçlı işleme aktivitede bir azalmaya yol açmış ve 400 MPa'nın üzerinde sıfır değeri almıştır.

Olumsuzluklar ve zorluklar

Balıklarda kullanılan YBİ işlemi bazı durumlarda olumlu sonuçlara yol açarken, bazı durumlarda ise olumsuzluklar yaratmaktadır. Bu olumsuzluklar; YBİ işleminden sonra balık kasının renginin değişmesi ve daha beyaz hale gelmesi (pişmiş görünüm), protein denatürasyonunun artması, yapısal kas proteinlerinin parçalanması neticesinde besin değerinin kaybı ile tekstür ve su tutma kapasitesindeki değişimler olarak sıralanabilmektedir (Cioca vd., 2018).

Soğuk plazma

Prensip

Plazma, maddenin benzersiz bir hali olarak, elektronlar, pozitif ve negatif yüklü iyonlar, moleküllerin temel veya uyarılmış halleri, serbest radikaller, nötr atomlar, ağır parçacıklar, UV-görünür ışık fotonları, ısı ve elektromanyetik radyasyonların karmaşık bir karışımını içermektedir. Plazma, bileşen türlerinin yoğunluğu, sıcaklığı ve enerji seviyelerine göre iki sınıfa ayrılmakta olup; termal plazmada, tüm kimyasal türler, iyonlar ve elektronlar tam olarak termodinamik dengede bulunmaktadır. Soğuk plazma ise; büyük parçacıkların genellikle oda sıcaklığında olduğu ve serbest elektronların iyonlaştırıcı çarpışmalar ve bağ kırılmaları için yeterli kinetik enerjiye sahip olduğu denge dışı bir durumda meydana gelmektedir (Kaur vd., 2024).

Antimikrobiyal etki mekanizması

Soğuk plazma, belirgin bakterisidal etkileri nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Reaktif azot türleri (RNS), membrandan difüze olmadan ve subsellüler pH'ı önemli ölçüde değiştirmeden önce hücrenin yüzeyine yapışmaktadır. Bu pH değişimi, hücrenin aktiviteyi, enzim aktivitesini, reaksiyon hızını ve proteinlerin stabilitesini, ayrıca DNA ve RNA yapısını etkilemektedir. Ayrıca uygulama sırasında hücreler önemli ölçüde geçirgenlik gösterir, bu da hücre içi sızıntıya ve ölüme neden olmaktadır (Subrahmanyam vd., 2024).

Çeşitli balık türlerinde uygulanan SP işleminin, ürünlerin mikrobiyal ve fiziksel-kimyasal özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ulusoy vd. (2024) tarafından atmosferik soğuk plazmanın (20 kHz sinüzoidal frekanslı 30 kV yüksek voltaj kullanılarak üretilen) levreklerin kalitesi üzerine etkisinin incelendiği çalışmada; örnekler 1 dakika (SP1) veya 7 dakika (SP7) süreyle işlenmiş ve ardından 2 ± 1 °C'de saklanmıştır. Sonuçlara göre, plazma ile işlenmiş levreklerin duyu puanları ve mikrobiyal kalitesi kontrol ürünlerine göre daha iyi korunmuştur. Kontrol örnekleri, plazma ile işlenmiş gruplara göre daha yüksek TMA-N ve TBARS değerlerine sahip bulunmuştur. Tosun vd. (2024) tarafından yapılan araştırmada; levrekleri kontamine edebilen *Salmonella enteritidis* ve *Listeria monocytogenes* bakterileri üzerine atmosferik soğuk plazmanın etkinliği değerlendirilmiştir. Soğuk plazma, inoküle levrek üzerine 2 ila 18 dakika süreyle uygulanmış ve 18 dakikada *S. enteritidis* için maksimum 1,43 log CFU/g ve *L. monocytogenes* için 0,80 log CFU/g azalma sağlanmıştır. Plazma uygulamasının,

balığın rengini, tekstürünü veya su aktivitesini önemli ölçüde değiştirmediği saptanmıştır. Spanou vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, düşük geçirgenlikli ambalajlarda taze çipura (*Sparus aurata*) filetolarına, sıklık ve işlem süresi bakımından farklılık gösteren dört paket içi soğuk plazma işlemi uygulanmıştır. Sonuçlara göre tüm SP işlemleri, balık filetolarındaki mikroorganizmaların, özellikle TMC, TPC ve *Pseudomonas spp.* türlerinin üremesini etkili bir şekilde engellemiş ve 16 günlük depolamadan sonra kontrol örneklerine kıyasla sırasıyla 1,49; 1,24 ve 1,43 log CFU/g'lık maksimum azalma sağlamıştır. SP uygulaması, balık filetolarının renk ve tekstür parametrelerini etkilememiş ve SP ile işlenmiş numunelerde TVB-N üretimi azalmıştır.

Olumsuzluklar ve zorluklar

SP teknolojisi, gıda muhafazası için umut verici olsa da, taze balıklar üzerinde birkaç olumsuz etkiye sahip olabilmektedir. Lipid oksidasyonu ile ilişkili olan aldehitlerin, ketonların ve alkollerin içeriğini artırması ve böylece balığın lezzet profilini değiştirebilmesi, pigmentlerin oksidasyonu ile renk değişikliklerinin yaşanması, yoğun protein ağındaki depolanan maksimum su miktarının azalması, protein oksidasyonunun bir göstergesi olan karbonil oluşumunda hızlanma, plazma işlemi sırasında hidrojen iyonlarının ayrışması sonucu oluşan asit nedeniyle pH değerinin düşmesi, SP işleminin olumsuzlukları olarak gösterilebilmektedir (Rathod vd., 2021).

Darbeleri elektrik alan

Prensip

DEA teknolojisinin kullanılması, bir ürünü mikro saniyelerden birkaç milisaniyeye kadar süren 10 ile 80 kV/cm arasında değişen bir yoğunlukta kısa ama güçlü elektrik darbeleriyle maruz bırakmayı içermektedir. Bu yöntemin etkinliği, ürünün, "işlem aralığı" olarak adlandırılan belirli bir mesafeye ayarlanmış iki elektrot arasında sıkıştırılırken aldığı darbe miktarına bağlıdır. Bunu sağlamak için, elektrik alanı, üstel olarak zayıflayan dalgalar, bipolar dalgalar ve salınım darbeleri dahil olmak üzere çeşitli formatlarda uygulanmaktadır (Ganjeh vd., 2024).

Antimikrobiyal etki mekanizması

Mikroorganizmalar üzerindeki etkisi; dış elektrik alanlarının hücre zarındaki fosfolipid moleküllerinde ve transmembran proteinlerinde konformasyonel bir değişiklik yaratmasından ve bunun da aynı anda iç zar bileşenlerinin yeniden düzenlenmesine, hidrofilik gözenek oluşumuna ve iyon kanallarının açılmasına yol açmasından kaynaklanmaktadır. Böylece, bazı maddeler gözenekten her iki yönde (içer ve dışa) geçmektedir. Hücre zarı yarı geçirgen bir bariyer olarak işlev gördüğünde, geri dönüşü olmayan bir şekilde hasar görmekte, normal fizyolojik ve metabolik hücre fonksiyonları etkilenmekte, bu da ozmotik basınca, ozmolarite dengesizliğine ve buna bağlı olarak hücre ölümüne yol açmaktadır (Zheng vd., 2024).

DEA işleminin balık türleri arasında mikrobiyal aktivite ve fiziksel-kimyasal kaliteye olan etkileri araştırma konusu olmuştur. Wang vd. (2022) tarafından tatlı su çipurası kalitesine aşırı düşük frekanslı darbeleri elektrik alanının (ADF-DEA) etkisinin incelendiği çalışmada, DEA grubundaki TVB-N değeri ve toplam mikroorganizma sayısının depolama sırasında uluslararası standartlar içinde olduğu ve bu grubun raf ömrünün kontrol grubuna kıyasla 1-2 gün uzadığı belirtilmiştir. Ayrıca, ADF-DEA işlemi; kontrol grubuna kıyasla renk değişikliğinin az olması, dokunun yavaş yumuşaması, protein oksidasyonu ve denatürasyonunun az olması, endojen enzim aktivitesinin düşük olması ve mikro yapının daha sıkı olmasını sağlamıştır. Abad vd. (2023) tarafından berlam balık kalitesi üzerine DEA işleminin etkisini (3 kV/cm'de 50 kJ/Kg'lık 30 µs'lik darbeler) incelemek için yapılan çalışmada, DEA işlemi uygulanan balıkların dondurulmuş örneklerle göre su tutma kapasitesinin ve renk değerlerinin daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda DEA işleminin berlam balıklarında bulunan *Anisakis* parazitinin neredeyse %100'ünü etkisiz hale getirdiği de vurgulanmıştır. Lee vd. (2024) tarafından somon balığının aşırı soğutulması sırasında salınımlı manyetik alanların (SMA) ve darbeleri elektrik alanlarının (DEA) birlikte kullanılarak buz kristali oluşumu üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmada; DEA +SMA işlemi uygulanan balıklarda, soğutulmuş ve dondurulmuş örneklerle kıyasla daha düşük damlama kaybı ve tekstür parçalanmasına sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca uygulamanın mikrobiyal aktiviteyi diğer gruplara kıyasla daha aza düşürdüğü tespit edilmiştir.

Olumsuzluklar ve zorluklar

DEA işleminin olumsuz yönleri ise; elektroporasyon etkisi nedeniyle lipid ve protein oksidasyonunun artması ve bu durumun tekstür ve rengin bozulmasına yol açabilmesidir. Ayrıca DEA kaynaklı oksidasyon, aldehitler, ketonlar ve alkoller oluşumu nedeniyle hoş olmayan kokulara neden olabilmektedir (Xie vd., 2024). DEA yönteminde mikroorganizmaları ortadan kaldırmada en büyük zorluklardan biri, yüksek elektrik alan gücü gereksinimidir. Bu yöntemin pastörizasyon amaçlı kullanımı için gerekli olan yüksek elektrik alan gücü, genellikle elektrotların çok yakın mesafede yerleştirilmesini gerektirir ki bu, katı ürünler için pratik olmamaktadır. Ayrıca mikrobiyal sporlar bu tekniğe karşı önemli ölçüde direnç göstermektedir. Bununla birlikte, yüksek elektrik alan şiddetinde DEA uygulaması, kas liflerinin düzenini bozarak kasların yumuşamasına neden olabilmektedir (Ganjeh vd., 2024).

Işınlama

Prensip

Gıda ışınlama, görünmez dalgalar halinde uzayda veya maddede yayılan ışınlama enerjisinin gıdalardaki mikroorganizmaları öldürmek için uygulandığı bir işlemdir. Bu işlem, önceden paketlenmiş veya dökme gıda maddelerini gama ışınlarına, X ışınlarına veya elektronlara maruz bırakmayı içeren fiziksel bir gıda işleme yöntemi olup; gıda maddeleri genellikle bir radyoizotop

kaynağından gelen gama radyasyonu veya bir elektron hızlandırıcı kullanılarak üretilen elektronlar veya X ışınları ile ışınlanmaktadır. Önerilen koşullar altında gıda ışınlaması, atom çekirdeğinin reaksiyonunu içermemekte ancak çekirdeği çevreleyen elektron bulutu kimyasal bir reaksiyon başlatmaktadır (Arvanitoyannis vd., 2008). Gıdanın ışınlama sırasında absorbe ettiği enerji miktarına "emilen doz" denir. Kullanılan doz, gıdanın türüne ve istenen etkiye göre değişmektedir. Uygulama seviyeleri genel olarak üç kategoriye ayrılabilir: (1) 1 kGy'ye kadar "Düşük" doz, (2) 1-10 kGy 'Orta' doz ve (3) 10 kGy'den fazla "Yüksek" doz (Erkan vd., 2014).

Antimikrobiyal etki mekanizması

Işınlamadaki radyasyonun birinci hedefi, kromozomlarda bulunan DNA'dır. Sitoplazmik membran üzerindeki etkiler, radyasyonun neden olduğu hücre hasarını önemli ölçüde artırmaktadır. Bir DNA molekülüne çarpan radyasyon, moleküler yapısını bozarak hücrelere doğrudan zarar vermektedir. Radyasyon ayrıca, hücrenin çoğunu oluşturan su molekülleri gibi organik moleküller üzerinde dolaylı bir etkiye sahiptir. Sonuç olarak, hidroksil (OH⁻) ve alkoksi (RO₂) gibi eşleşmemiş elektronlu, son derece reaktif serbest radikaller oluşmaktadır. Bu serbest radikaller DNA molekülleriyle etkileşime girerek moleküllerin yapısal bütünlüğüne zarar vermektedir (Edae, 2023).

Araştırmalarda, ışınlama teknolojisinin taze balıkların mikrobiyal güvenliği ve fizikokimyasal yapısı üzerindeki rolü değerlendirilmiştir. Uike vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen ve balık örneklerinin farklı gama ışınlama dozlarına (0,0 kGy, 1,0 kGy, 3,0 kGy ve 5,0 kGy) tabi tutulduktan sonra soğutulmuş koşullarda (4°C) ve dondurulmuş koşullarda (-18°C) saklandığı çalışma; ışınlama ve düşük sıcaklıklarda depolamanın mikrobiyal popülasyonları önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuştur. Işınlanmış numunelerdeki kimyasal kalite göstergeleri, her iki saklama koşulunda da kontrol numunelerine kıyasla belirgin şekilde daha iyi korunmuştur. Sonuç olarak, ışınlama yöntemi balığın raf ömrünü soğutmada 21 güne, dondurucu saklama koşullarında ise 90 güne kadar uzatmıştır. Jeyakumari vd. (2023) tarafından tatlı su çipurasının vakum paketlenerek, elektron ışınlamaya (0 kGy, 2,0 kGy ve 4,0 kGy) tabi tutulduğu çalışmada; ışınlanmış numunede TVB-N içeriğinin kontrol numunesine göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Işınlanmış balıkların kontrol numunesine göre toplam canlı sayısı, *Pseudomonas* sayısı ve *Brochothrix thermosphacta* sayısı açısından daha düşük olduğunu ortaya konmuştur. Mikrobiyal ve duyu özellikler açısından, elektron ışını ile ışınlanmış numunelerin raf ömrünün (doz seviyesine bağlı olarak) 28-38 gün uzadığı, kontrol grubunun raf ömrünün ise sadece 16 gün olduğu tespit edilmiştir. Mohamed vd. (2023) tarafından farklı balık türlerinde gama ışınlamasının etkisinin değerlendirildiği çalışmada; kontrol örneklerinde patojenik bakteri sayıları oldukça yüksekken, ışınlanmış örneklerde ise patojenik bakteri sayıları doza bağlı olarak azalmış ve 5 kGy dozunda ışınlama, aerobik canlı sayısının tespit edilemeyecek düzeye inmesine yol açmıştır. Bununla birlikte, gama

ışınlanması sonucunda özellikle karbonhidratlar, proteinler ve lipitler düşük ve orta dozda radyasyondan önemli ölçüde etkilenmemiştir.

Olumsuzluklar ve Zorluklar

Balık muhafazasında ışınlama yöntemi raf ömrünü uzatma ve mikroorganizmaları azaltmada etkili olsa da bazı olumsuz etkiler de ortaya çıkabilmektedir. Su varlığında proteinler radyasyon enerjisinin büyük bir kısmını absorbe ederek protein denatürasyonuna yol açabilmektedir. Radyolitik ürünler miyoglobinin oksidasyonuna neden olarak renk bozulmasına veya istenmeyen koku/tat bileşenleri oluşturabilmektedir. Oksijen varlığında gerçekleşen ışınlama ootoksidasyonu artırabilmektedir. Işınlamada doz seviyesinin artmasıyla birlikte tiamin kaybı artabilmektedir (Venugopal vd., 1999).

Aktif ambalajlama

Prensip

Vakum ambalajlama ve modifiye atmosfer ambalajlama teknolojileri, balıkçılık ürünleri için kullanılan iki koruma teknolojisi olup, mikrobiyal çoğalmayı ve oksidatif reaksiyonları yavaşlatmak için oksijenin uzaklaştırılmasıyla karakterize edilmektedir. Bununla birlikte, gıda muhafazası ile ilgili artan endişeler, ambalajlara yeni bir rol kazandırmıştır (Amaral vd., 2021). Aktif ambalajlama (AA) geliştirilen yeni ambalajlama teknolojilerinden bir tanesidir ancak gıdayı dış ortamdan ayıran inert bir bariyer olmak yerine, kaliteyi korumak ve raf ömrünü uzatmak için gıdalarla doğrudan etkileşime girmektedir. Aslında bu teknoloji, aktif maddelerin veya bileşenlerin ambalaj malzemesine veya ambalajın içine dahil edilmesine dayanmaktadır ve ambalajlanmış gıdaya veya çevresindeki ortama maddeleri salmak veya buradan emmek için tasarlanmıştır (Aday, 2021). Etilen vinil asetat ve biberiye özü, çinko oksit nanopartiküller ve modifiye demir (Fe-MMT) gibi aktif bileşikler mikrobiyal gelişmeyi sınırlamada (Rahmanifarah vd., 2025); demir bazlı aktif bileşenler uçucu bazların oluşumu ve nükleotidlerin bozunmasını azaltmada (Mohan vd., 2009), sitrik asit ve sodyum bikarbonat kullanılarak yapılan CO₂ yayıcılar, tüketicilerin ürünleri daha taze olarak değerlendirmesine (Nanou vd., 2023) katkı sağlamıştır. Bu nedenle aktif ambalajlama teknolojisinin, gıda tedarik zincirinin çeşitli aşamalarında (ambalajlama, depolama ve dağıtım) salınım (N₂, CO₂, etanol) ve/veya giderme (O₂, CO₂, koku) amacıyla kullanıldığı görülmektedir. Gaz tutma veya salınım sağlama durumunda, reaktif bileşikler ya ambalaj malzemesiyle ilişkili ayrı saketlerde/kapsüllerde bulunmakta ya da doğrudan ambalaj malzemesine dahil edilmektedir (Mohan vd., 2010).

Antimikrobiyal etki mekanizması

Aktif ambalajlamada kullanılan antimikrobiyallerin etki mekanizması, kullanılan maddelere göre farklılık göstermektedir. Esansiyel yağlar kullanıldığında içeriğinde bulunan biyoaktif bileşikler, bakteri hücre duvarları ve zarları ile etkileşime girmektedir. Bu etkileşim protonların, iyonların ve hücre içi içeriklerin kaybına yol açarak

sonuçta hücre ölümüne neden olmaktadır. Kitosan kullanımında ise etki; pozitif yüklü amino gruplarının negatif yüklü bakteri yüzeyine elektrostatik bağlanması nedeniyle meydana gelmektedir. Bu etkileşim hücre zarını bozarak hücre içi bileşenlerin sızmasına ve nihai hücre ölümüne yol açmaktadır. Organik asitlerin oluşturduğu antimikrobiyal etki ise, ayrışmamış asit formlarının lipofilik durumundan kaynaklanmaktadır. Bu sayede bakterilerin peptidoglikan tabakasından (Gram pozitif) veya fosfolipid (Gram negatif) zarından bu bileşenler bakterilere kolayca nüfuz edebilmektedir (Kamau vd., 2025).

Çalışmalarda, AA işleminin balıkların mikrobiyal güvenliği ile fiziksel ve kimyasal özelliklerinde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir. Yeni bir hibrit nanokompozit aktif ambalaj ile gökkuşuğu balığı filetoalarının bozulmasını geciktirmek için tasarlanan çalışmada (Rahmanifarah vd., 2025), aktif ambalajlama konsepti etilen vinil asetat ve biberiye özü, çinko oksit nanopartiküller ve modifiye demir (Fe-MMT) gibi aktif bileşiklerle üretilmiştir. Aktif bileşikler içeren filmlerin, tekstür, renk ve kokuyu değiştirmeden balık filetoalarının raf ömrünü altıncı güne kadar uzattığı sonucuna ulaşılmıştır. Ambrosio vd. (2022) tarafından yapılan ve antimikrobiyal peptid 1018K6 ile işlevselleştirilmiş aktif polipropilen bazlı ambalajın, çiğ somon kalitesi üzerine etkisinin değerlendirildiği çalışmada; aktif ambalajın, 7 gün sonra balık filetoalarında hem patojenik hem de spesifik bozulma organizmalarının mikrobiyal gelişimini güçlü bir şekilde engellediğini göstermiştir. Ayrıca somon, depolama sırasında uçucu kimyasal bozulma indekslerine (KBI) göre tazeliğini korumuştur. Mohan vd. (2009) tarafından O₂ tutucu ile paketlenmiş ve paketlenmemiş kolyoz balıklarının kalitesinin değerlendirildiği çalışmada; O₂ tutucular 24 saat içinde paketin içindeki O₂ seviyesini %0,01'in altına düşürmüştür. Paketin içindeki O₂ seviyesinin düşürülmesi, O₂ tutucuların bulunmadığı numunelerde 12 gün olan raf ömrünü 20 güne kadar uzatarak olumlu etkiler yaratmıştır. O₂ tutucuların bulunduğu numunelerde, hava numunelerine kıyasla uçucu bazların (özellikle TVB-N ve TMA-N) oluşumu ve nükleotidlerin bozunması gecikmiştir. De Abreu vd. (2010) tarafından gerçekleştirilen ve somon balığının ticarileştirilmesi için arpa kabuğundan elde edilen doğal antioksidan özleri içeren aktif ambalaj filminin etkisinin incelendiği çalışmada; aktif ambalajın lipit hidrolizini yavaşlatma ve somon etinin oksidatif stabilitesini artırma konusunda etkinliğini göstermiştir. Antioksidanın filme dahil edilme yöntemi, somon örneklerini dondurulmuş depolama sırasında oksidatif süreçlere karşı korumada oldukça etkili olmuştur. Nanou vd. (2023) tarafından CO₂ yayıcı içeren aktif ambalajların çipura kalitesi üzerine etkisinin incelendiği çalışmada; tüketiciler, aktif ambalajlı ürünleri daha taze ve ideal ürüne daha yakın olarak algılamış ve bu ürünleri satın alma niyetleri de daha yüksek olmuştur. Aktif bileşen içermeyen ambalajlarda bozulmayı simgeleyen uçucu bileşen miktarının aktif ambalajlara göre daha yüksek miktarda olduğu tespit edilmiştir. Aktif ambalajlardaki yüksek CO₂ konsantrasyonunun aerobik bakterilerin gelişmesini

geciktirdiği tespit edilmiştir. Opara vd. (2022) tarafından mezgıt üzerine nem tutucu aktif ambalajlama pedlerinin etkinliğinin araştırıldığı çalışmada; örnekler, aktif MA (%40 CO₂ + %30 O₂ + %30 N₂) veya pasif MA (%0,039 CO₂ + %20,95 O₂ + %78 N₂) altında, nem tutucu ile ve nem tutucu olmadan paketlenmiştir. Pasif MAP altında, saklama sıcaklığının artmasıyla birlikte tepe boşluğu O₂ gaz bileşimi sürekli olarak kritik sınırların altına düşmüştür. Benzer şekilde, aktif MAP altında O₂ seviyeleri düşmüş, ancak kritik seviyelere ulaşmamıştır. Nem tutucu pedler kullanıldığında damlama kaybı önemli ölçüde azalmıştır. Sertlik, renk ve pH, 0 °C'lik en düşük sıcaklıkta aktif MAP altında daha iyi şekilde korunmuştur.

Olumsuzluklar ve zorluklar

Aktif paketlenme, gıda muhafazası için önemli faydalar sunarken, dikkate alınması gereken birkaç dezavantaj ve zorluk da sunmaktadır. Oksijen tutucular ambalaj içindeki oksijeni her zaman tamamen uzaklaştıramamakta ve ambalaj filminden nüfuz eden oksijene karşı etkili olamamaktadır. Demir tozu bazlı oksijen tutucuları içeren gıda paketleri, metal dedektörlerinden geçemeyebilmektedir. O₂ tutucular tarafından oksijensiz bir atmosferin oluşturulması, anaerobik mikrobiyal patojenlerin gelişmesini teşvik edebilmektedir. Saket/kapsül biçiminde kullanılan aktif ambalajlama bileşenlerinin yanlışlıkla yiyeceklerle birlikte tüketilme riski bulunmaktadır. Aktif ambalajlamada kullanılacak, antimikrobiyal bileşiğin seçimi, genellikle ambalaj malzemesi ile uyumsuzluğu veya ekstrüzyon işlemleri sırasında bileşiğin ısıya dayanıklı olmayan doğası nedeniyle kısıtlanabilmektedir (Mohan vd., 2009).

Ultrases

Prensip

Ultrases, insan kulağının duyma eşiği olan 20 kHz'yi aşan frekanslı ses dalgası olarak tanımlanmaktadır. Ultrasonik dalgalar; yoğunluğu 1 W/cm²'den fazla olan yüksek güçlü ultrases ve frekansı 100 kHz'den fazla ve yoğunluğu 1 W/cm²'den az olan düşük güçlü ultrases olarak ikiye ayrılmaktadır. Düşük yoğunluklu ultrases olarak da bilinen tanınan ultrases, genellikle kalite kontrol ve işleme aşamalarında analitik bir araç olarak kullanılmaktadır. Yüksek güçlü uygulamalar; emülsifikasyon, köpük giderme, mikro yapı yönetimi ve yağlı ürünlerin tekstürel özelliklerini değiştirmek gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Ek olarak, ultrases bir koruma tekniği olarak da uygulanabilmektedir. Ultrasesin gıdalarda koruyucu olarak etkinliği, mikroorganizmaları ve enzimleri etkisiz hale getirme yeteneğiyle ilişkilendirilmektedir (Bariya vd., 2023).

Antimikrobiyal etki mekanizması

Ultrasesin mekanik etkileri, öncelikle akustik kaviteyona, yani sıvı veya yarı sıvı maddelerde mikroskobik boyuttan daha küçük kabarcıkların hızlı oluşumu, büyümesi ve içe doğru patlamasına bağlıdır. Bu kabarcıklar içe doğru patladığında, lokalize yapısal hasara neden olan son derece güçlü şok dalgaları, mikro jetler ve kesme kuvvetleri açığa çıkarmaktadır (Prempeh vd.,

2025). Geçici kaviteyasyon, 4500–5000 K'ye kadar lokalize sıcak noktalar üretmekte ve 199 MPa üzerindeki basınçlar şok dalgaları ve serbest radikaller üretirken, kararlı kaviteyasyon yüksek kesme kuvveti eşliğinde mikro akış üretmektedir. Tüm bunlar mikroorganizmalarda hücre duvarı ve zarının hasar görmesine katkıda bulunmakta ve hücre ölümüne yol açmaktadır. Yırtılmış ve parçalanmış hücrelerin geri kazanılmasının mümkün olmadığı bildirilmiştir; bu durum, hasarlı hücrelerin uygun çevre koşulları (sıcaklık, pH, su aktivitesi ve besinler) ile karşılaşmaları halinde geri kazanılabildiği diğer bazı tekniklere göre avantajlıdır (Chavan vd., 2022).

Farklı balık türlerinde ultrases uygulamasının kaliteyi belirleyen mikrobiyal ve fizikokimyasal parametreler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Olgun ve Diler (2025) tarafından soğuk depolama sırasında vakumlu paketlenmiş gökkuşuğu alabalığı (*Oncorhynchus mykiss* W.) filetolarının bazı kalite özellikleri üzerinde ultrases uygulamalarının (%30 W/5 dak.; %30 W/15 dak.; %80 W/5 dak. ve %80 W/15 dak.) etkisinin belirlendiği çalışmada; gruplar arasında nem kaybı, pH değerindeki artış ve duyu parametrelerdeki değişiklikler açısından önemli bir fark gözlemlenmiştir. Renk ve tekstür değerlerindeki azalma bir dereceye kadar önlenmiştir. Toplam mezofilik aerobik bakteriler, toplam psikrofilik aerobik bakteriler ve laktik asit bakterileri sayısında en düşük artış (%80 W/5 dakika) grubunda tespit edilirken, *Enterobacteriaceae* ve *Pseudomonas spp.* (%80 W/15 dakika) grubunda tespit edilmiştir. Yüksek yoğunluklu ultrasesin çeşitli balık türlerinin (somon, uskumru, morina ve mezgıt) mikrobiyolojik ve kalite parametreleri üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada (Pedrós-Garrido vd., 2017); örnekler 30 kHz altında 5, 15, 25, 35 ve 45 dakika boyunca işleme tabi tutulmuştur. İşlemden sonra mikrobiyolojik gelişme önemli ölçüde azalmıştır. İşlem öncesi ve sonrası lipid konsantrasyonları arasında anlamlı bir fark görülmemiştir. Somon balığında tiyobarbitürik asit içeriğinde azalma gözlemlenmiştir. Ultrases işlemi sonrasında mezgıtte nem seviyeleri %8 oranında artmıştır. Ugalde-Torres vd. (2024) tarafından, tatlı su çipuralarına 30, 60 ve 90 dakika, yüksek yoğunluklu ultrasesin (%70 genlik, 20 kHz) uygulandığı çalışmada; uygulamalar, TVB-N ve NPN değerlerinin artmasını önlemiş ve mikrobiyal gelişimi geciktirerek raf ömrünü önemli ölçüde uzatmıştır. Öte yandan, filetoların kas yapısı ve renginin korunmasına da yardımcı olmuştur. Ultrases depolama sırasında tekstür ve renk parametresi L de minimum değişikliklere neden olmuş ve depolama sonunda daha iyi bir fiziksel görünüm sağlanmıştır.

Olumsuzluklar ve zorluklar

Deniz ürünleri endüstrisinde ultrasesin uygulanması bazı zorluklar da barındırmaktadır. Ultrasesin etkinliği, deniz ürününün türüne ve başlangıçtaki mikrobiyal yüküne bağlı olarak değişebilmekte ve ürünün tekstür ve renk gibi duyu kalitesine olası olumsuz etkileri konusunda endişeler bulunmaktadır. Ultrasesin sınırlamaları ile ilgili olarak, mikrobiyal inaktivasyonun etkinliği mikroorganizma türü, gıda matrisinin özellikleri ve kullanılan ultrases parametrelerinden etkilenebilmektedir

(Russo vd., 2024). Ayrıca ultrasesin kullanılması, kritik sıcaklık ve basınç koşulları nedeniyle radikallerin oluşmasına neden olabilmekte ve bu da gıda bileşenlerinde değişikliklere yol açmaktadır. Kaviteasyon kabarcıklarının yüzeyinde radikallerin (OH⁻ ve H⁺) birikmesi, radikal zincir reaksiyonlarının başlamasına neden olarak; bozunma ürünlerinin oluşmasına ve nihai üründe çeşitli kalite sorunlarına yol açabilmektedir (Bariya vd., 2023).

Sonuç

Balık ve balık ürünlerinin hızlı bozulabilir doğası, geleneksel soğutma ve dondurma yöntemlerinin tek başına yeterli olmadığını göstermektedir. Bu nedenle, gıda güvenliğini sağlamak ve ürün kalitesini korumak amacıyla geliştirilen termal olmayan işleme teknolojileri, önemli alternatifler olarak öne çıkmaktadır. Her bir yöntemin kendine özgü avantajları ve sınırlılıkları olmakla birlikte, ortak amaç balığın tazeliğini, besin değerini ve raf ömrünü maksimum düzeyde koruyabilmektir. Örneğin, yüksek basınç işlemi protein yapılarında istenmeyen değişikliklere yol açabilse de mikrobiyal inaktivasyonda güçlüdür; soğuk plazma ise etkin mikrobiyal azaltım sağlarken bazı durumlarda lipid oksidasyonunu artırabilmektedir. Aktif ambalajlama, ürünle doğrudan etkileşime girerek raf ömrünü uzatırken, yanlış uygulamalarda yeni riskler de doğurabilmektedir. Sonuç olarak, balık muhafazasında bu teknolojilerin tek başına ya da kombine edilerek kullanılması, geleneksel yöntemlere kıyasla daha uzun raf ömrü ve daha yüksek kalite sunma potansiyeline sahiptir. Gelecekte, bu yöntemlerin endüstriyel ölçekte daha yaygın uygulanabilmesi için teknik maliyetlerin azaltılması ve tüketici kabulünün artırılması kritik önem taşımaktadır.

Çıkar Çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Etik Onay

Bu çalışma için etik kurul iznine gerek yoktur.

Kaynaklar

- Abad, V., Alejandre, M., Hernández-Fernández, E., Raso, J., Cebrián, G., & Álvarez-Lanzarote, I. (2023). Evaluation of pulsed electric fields (PEF) parameters in the inactivation of anisakis larvae in saline solution and hake meat. *Foods*, 12(2), 264.
- Aday, M. S. (2021). Meyve ve sebzelerde aktif ambalajlama teknolojisinin kullanımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (21), 122-130.
- Ali, A., Wei, S., Ali, A., Khan, I., Sun, Q., Xia, Q., Wang, Z., Han, Z., Liu, Y., & Liu, S. (2022). Research progress on nutritional value, preservation and processing of fish—A review. *Foods*, 11(22), 3669.
- Amaral, R. A., Pinto, C. A., Lima, V., Tavares, J., Martins, A. P., Fidalgo, L. G., Silva, A. M., Gil, M. M., Teixeira, P., & Barbosa, J. (2021). Chemical-Based methodologies to extend the shelf life of fresh fish—A review. *Foods*, 10(10), 2300.
- Ambrosio, R. L., Gogliettino, M., Agrillo, B., Proroga, Y. T., Balestrieri, M., Gratio, L., Cristiano, D., Palmieri, G., & Anastasio, A. (2022). An active peptide-based packaging system to improve the freshness and safety of fish products: A case study. *Foods*, 11(3), 338.
- Arvanitoyannis, I. S., Stratakos, A., & Mente, E. (2008). Impact of irradiation on fish and seafood shelf life: a comprehensive review of applications and irradiation detection. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 49(1), 68-112.
- Bariya, A. R., Rathod, N. B., Patel, A. S., Nayak, J. K. B., Ranveer, R. C., Hashem, A., AbdAllah, E. F., Ozogul, F., Jambrak, A. R., & Rocha, J. M. (2023). Recent developments in ultrasound approach for preservation of animal origin foods. *Ultrasonics Sonochemistry*, 101, 106676.
- Bharatbhai, P. S., & Shyni, K. (2024). The effect of high-pressure processing on quality of seafood meat—a review. *Brazilian Journal of Development*, 10(2), e67342-e67342.
- Castrica, M., Pavlovic, R., Balzaretto, C. M., Curone, G., Brecchia, G., Copelotti, E., Panseri, S., Pessina, D., Arnoldi, C., & Chiesa, L. M. (2021). Effect of high-pressure processing on physico-chemical, microbiological and sensory traits in fresh fish fillets (*Salmo salar* and *Pleuronectes platessa*). *Foods*, 10(8), 1775.
- Chavan, P., Sharma, P., Sharma, S. R., Mittal, T. C., & Jaiswal, A. K. (2022). Application of high-intensity ultrasound to improve food processing efficiency: A review. *Foods*, 11(1), 122.
- Chéret, R., Delbarre-Ladrat, C., de Lamballerie-Anton, M., & Verrez-Bagnis, V. (2005). High-pressure effects on the proteolytic enzymes of sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) fillets. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(10), 3969-3973.
- Cioca, A.-A., Dan, S. D., Lupău, V. M., Colobatiu, L. M., & Mihaiu, M. (2018). The effect of high pressure processing on major structural proteins of rainbow trout fish fillets. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Chemia*, 63(4), 129-136.
- De Abreu, D. P., Losada, P. P., Maroto, J., & Cruz, J. (2010). Evaluation of the effectiveness of a new active packaging film containing natural antioxidants (from barley husks) that retard lipid damage in frozen Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Food Research International*, 43(5), 1277-1282.
- Edae, B. (2023). Food irradiation an effective technology for food safety and security. *Food Science & Nutrition Technology*, 8(4).
- Erkan, N., Günlü, A., & Genç, İ. Y. (2014). Alternative seafood preservation technologies: ionizing radiation

- and high pressure processing. *Journal of Fisheries Sciences.com*, 8(3), 238-251.
- Ganjeh, A. M., Pinto, C. A., Casal, S., & Saraiva, J. A. (2024). Potential of electric and pressure-based techniques for the inactivation of microorganisms in fresh fish. *Food Bioscience*, 61, 104537.
- Ismail, L., Nartea, A., Fanesi, B., Lucci, P., Pacetti, D., Jaeger, H., & Schottroff, F. (2025). Effect of High-Pressure Processing on Color, Texture and Volatile Profile During Sardine Refrigeration. *Foods*, 14(2), 329.
- Jeyakumari, A., Murthy, L. N., Visnuvinayagam, S., Sarma, K., Rawat, K., & Khader, S. A. (2023). Effect of electron beam irradiation on the quality of vacuum-packed, chilled-stored tilapia fish chunks. *Indian Journal of Fisheries*, 70(2), 0970-6011.
- Kamau, P. G., Cruz-Romero, M., Alzate, P., Morris, M., & Kerry, J. (2025). Active packaging containing natural antimicrobials as a potential and innovative technology to extend shelf-life of fish products—A review. *Food Packaging and Shelf Life*, 49, 101500.
- Kaur, S., Kumar, Y., Singh, V., Kaur, J., & Panesar, P. S. (2024). Cold plasma technology: Reshaping food preservation and safety. *Food Control*, 163, 110537.
- Lee, D., Tang, J., Lee, S. H., & Jun, S. (2024). Effect of oscillating magnetic fields (OMFs) and pulsed electric fields (PEFs) on supercooling preservation of atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fillets. *Foods*, 13(16), 2525.
- Mohamed, E. F., Hafez, A. E.-S. E., Seadawy, H. G., Elrefai, M. F., Abdallah, K., El Bayomi, R. M., Mansour, A. T., Bendary, M. M., Izmirly, A. M., & Baothman, B. K. (2023). Irradiation as a promising Technology to improve bacteriological and physicochemical quality of fish. *Microorganisms*, 11(5), 1105.
- Mohan, C., Ravishankar, C., & Gopal, T. S. (2010). Active packaging of fishery products: a review. *Fishery Technology*, 47(1), 1-18.
- Mohan, C., Ravishankar, C., Gopal, T. S., & Kumar, K. A. (2009). Nucleotide breakdown products of seer fish (*Scomberomorus commerson*) steaks stored in O₂ scavenger packs during chilled storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 10(2), 272-278.
- Nanou, E., Kotsiri, M., Kogiannou, D., Katsouli, M., & Grigorakis, K. (2023). Consumer perception of freshness and volatile composition of fresh gilthead seabream and seabass in active packaging with and without CO₂-emitting pads. *Foods*, 12(3), 505.
- Olatunde, O. O., & Benjakul, S. (2018). Nonthermal processes for shelf-life extension of seafoods: A revisit. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(4), 892-904.
- Olgun, Ç., & Diler, A. (2025). Effect of Ultrasound Applications on Physico-Chemical, Sensory, and Microbiological Quality of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss* W.). *Acta Aquatica Turcica*, 21(1), 74-88.
- Opara, U. L., Fadiji, T., Caleb, O. J., & Oluwole, A. O. (2022). Effects of modified atmosphere packaging, storage temperature, and absorbent pads on the quality of fresh cape hake fish fillets. *Coatings*, 12(3), 310.
- Pedros-Garrido, S., Condón-Abanto, S., Beltrán, J., Lyng, J., Brunton, N., Bolton, D., & Whyte, P. (2017). Assessment of high intensity ultrasound for surface decontamination of salmon (*S. salar*), mackerel (*S. scombrus*), cod (*G. morhua*) and hake (*M. merluccius*) fillets, and its impact on fish quality. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 64-70.
- Prempeh, N. Y. A., Nunekpeku, X., Murugesan, A., & Li, H. (2025). Ultrasound in the Food Industry: Mechanisms and Applications for Non-Invasive Texture and Quality Analysis. *Foods*, 14(12), 2057.
- Rabiepour, A., Zahmatkesh, F., & Babakhani, A. (2024). Preservation techniques to increase the shelf life of seafood products: An overview. *Journal of Food Engineering and Technology*, 13(1), 1-24.
- Rahmanifarah, K., Mahmoudian, M., & Mahmoudi Eskandarabadi, S. (2025). Fish active packaging with ZnO/Fe-MMT nanoparticles. *Scientific Reports*, 15(1), 3623.
- Rathod, N. B., Ranveer, R. C., Bhagwat, P. K., Ozogul, F., Benjakul, S., Pillai, S., & Annature, U. S. (2021). Cold plasma for the preservation of aquatic food products: An overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(5), 4407-4425.
- Romulo, A. (2021). The impact of high pressure processing treatment on microbial inactivation of seafood—A review. *Food Res*, 5(2), 38-44.
- Rosnes, J. T., Skåra, T., & Skipnes, D. (2011). Recent advances in minimal heat processing of fish: effects on microbiological activity and safety. *Food and bioprocess technology*, 4(6), 833-848.
- Russo, G. L., Langelotti, A. L., Torrieri, E., & Masi, P. (2024). Emerging technologies in seafood processing: An overview of innovations reshaping the aquatic food industry. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(1), e13281.
- Spanou, A., Tzamarias, A. E., Ladakis, D., Koutinas, A., & Tsironi, T. (2024). In-package cold atmospheric plasma processing for shelf-life extension of gilthead seabream (*Sparus aurata*) fillets. *Journal of Food Science*, 89(8), 4714-4729.
- Speranza, B., Racioppo, A., Bevilacqua, A., Buzzo, V., Marigliano, P., Mocerino, E., Scognamiglio, R., Corbo, M. R., Scognamiglio, G., & Sinigaglia, M. (2021). Innovative preservation methods improving the quality

- and safety of fish products: Beneficial effects and limits. *Foods*, 10(11), 2854.
- Subrahmanyam, K., Gul, K., Sehwat, R., Tiwari, B. K., & Sahoo, S. (2024). Cold plasma-mediated inactivation of microorganisms for the shelf-life extension of animal-based foods: Efficiency, mechanism of inactivation, and impact on quality attributes. *Food Control*, 162, 110464.
- Tosun, Ş. Y., Kartal, S., Akan, T., Mol, S., Coşansu, S., Üçok, D., Ulusoy, Ş., Doğruyol, H., & Bostan, K. (2024). Innovative Pathogen Reduction in Exported Sea Bass Through Atmospheric Cold Plasma Technology. *Foods*, 13(20), 3290.
- Tsevdou, M., Dimopoulos, G., Limnaios, A., Semenoglou, I., Tsironi, T., & Taoukis, P. (2023). High pressure processing under mild conditions for bacterial mitigation and shelf life extension of European Sea bass fillets. *Applied Sciences*, 13(6), 3845.
- Ugalde-Torres, A., Ocaño-Higuera, V. M., Ruíz-Cruz, S., Suárez-Jiménez, G. M., Torres-Arreola, W., Montoya-Camacho, N., & Marquez-Rios, E. (2024). The Effect of High Intensity Ultrasound on the Quality and Shelf Life of Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Muscle. *Processes*, 12(7), 1441.
- Uikey, M., Bojayanaik, M., Ganachari, J., Fernandes, D. J., Banavath, S. N., Naik, S. N. C., Dnyanoba, S. C., Alandur, V. S., & Hiriyur, S. (2024). Combined Effect of Gamma Irradiation and Low Temperature Storage on the Microbial and Bio-chemical Quality of Sutchi Cat Fish (*Pangasius hypophthalmus*). *European Journal of Nutrition and Food Safety*, 16(12), 189-201.
- Ulusoy, Ş., Akan, T., Kartal, S., Üçok, D., Tosun, Ş. Y., Doğruyol, H., Coşansu, S., Bostan, K., & Mol, S. (2024). Atmospheric Cold Plasma to Maintain Sea Bass Quality: An Opportunity for International Fish Trade. *Processes*, 12(11), 2318.
- Venugopal, V., Doke, S., & Thomas, P. (1999). Radiation processing to improve the quality of fishery products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 39(5), 391-440.
- Wang, J., Wang, Q., Xu, L., & Sun, D.-W. (2022). Effects of extremely low frequency pulsed electric field (ELF-PEF) on the quality and microstructure of tilapia during cold storage. *LWT*, 169, 113937.
- Xie, Y., Zhang, J., Zhang, P., Regenstein, J. M., Liu, D., & Zhou, P. (2024). Improving the microbiological safety and quality of aquatic products using nonthermal processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(3), e13368.
- Zhao, Y. M., de Alba, M., Sun, D. W., & Tiwari, B. (2019). Principles and recent applications of novel non-thermal processing technologies for the fish industry—A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 59(5), 728-742.
- Zheng, Z., Jin, Y., Zhang, L., Xu, X., & Yang, N. (2024). Inactivation of microorganisms in foods by electric field processing: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, 101109.
- Zura-Bravo, L., Solís, D., Masztalerz, K., Tabilo-Munizaga, G., Pérez-Won, M., & Lemus-Mondaca, R. (2023). High Hydrostatic Pressure Applied to Pre-and PostRigor Jack Mackerel (*Trachurus murphyi*) and the Assessment of Their Physicochemical Properties under Cold Storage.