



The Synthesis, Functions and Mechanisms of Action of the Silver Nanoparticles and Their Uses in the Processing and Preservation of Meat and Meat Products

Gülüz Akyüz^{1,a}, Şule Bıyık^{2,b}, Hilal Soyocak^{3,c}, Müberra Andaç^{4,d}, Sadettin Turhan^{3,e,*}

¹Department of Nanoscience and Nanotechnology, Institute of Graduate Studies, Ondokuz Mayıs University, 55200 Samsun, Türkiye

²Department of Food Engineering, Institute of Graduate Studies, Ondokuz Mayıs University, 55200 Samsun, Türkiye

³Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, Ondokuz Mayıs University, 55200 Samsun, Türkiye

⁴Department of Chemistry, Faculty of Science, Ondokuz Mayıs University, 55200 Samsun, Türkiye

*Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>Review Article</i></p> <p>Received : 12-04-2023 Accepted : 15-09-2023</p> <p>Keywords: Silver nanoparticles Food packaging Food preservation Antimicrobial activity Toxicity</p>	<p>Nanoparticles are organic and inorganic structures ranging in size from 1-100 nm. They are a part of our daily life and attract great attention in various fields such as agriculture, environment, and medicine. Silver nanoparticles (AgNPs) are among the metal nanoparticles that have been the most widely researched and used for their optical, electrical, and antimicrobial properties. Today, in advanced food technology applications, nanoparticles and additives containing nanoparticles are used to improve the nutritional content of foods and to increase the stability of food components or final food products by extending their shelf life. Thanks to their unique properties, AgNPs are regarded as leaders in the fight against pathogenic microbial activity, solving current problems in the food industry. AgNPs have a strong effect on slowing the antimicrobial activities of antibiotic-resistant bacteria as well as being active against a broad spectrum of pathogenic bacteria. In this review, the physical, chemical, and biological methods used in the production of silver nanoparticles, the functions and mechanisms of action of the particles, and the use of AgNPs as a preservative in meat and meat products and their new generation packaging systems are explained in detail.</p>

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 11(9): 1768-1783, 2023

Gümüş Nanoparçacıkların Sentezi, Fonksiyonları, Etki Mekanizmaları ve Et ve Et Ürünlerinin İşlenmesinde ve Muhafazasında Kullanımları

MAKALE BİLGİSİ	ÖZ
<p><i>Derleme Makalesi</i></p> <p>Geliş : 12-04-2023 Kabul : 15-09-2023</p> <p>Anahtar Kelimeler: Gümüş nanoparçacıklar Gıda paketleme Gıda muhafaza Antimikrobiyal aktivite Toksosite</p>	<p>Boyutları 1-100 nm arasında değişen organik ve inorganik yapılar olan nanoparçacıklar, günlük hayatımızın bir parçası olup, tarım, çevre ve tıp gibi alanlarda büyük ilgi görmektedir. Metal nanoparçacıklar arasında optik, elektriksel ve antimikrobiyal özelliklere sahip olan gümüş nanoparçacıklar (AgNP'ler) en fazla araştırılan ve kullanılan parçacıklardır. Günümüzde ileri gıda teknolojisi uygulamalarında, gıdaların besin içeriğini geliştirmek ve raf ömrünü uzatarak gıda bileşenlerinin veya nihai gıda ürününün stabilitesini artırmak amacıyla nanoparçacık ve nanoparçacık içerikli katkı maddelerinden yararlanılmaktadır. AgNP'ler, benzersiz özellikleri sayesinde patojenik mikrobiyal aktiviteye karşı mücadelede ve gıda endüstrisinde mevcut problemlerin çözümünde lider olarak görülmektedir. AgNP'ler, geniş bir patojenik bakteri spektrumunun yanı sıra antibiyotiğe dirençli bakterilerin antimikrobiyal aktivitelerini yavaşlatma konusunda da güçlü bir etkiye sahiptir. Bu derlemede, gümüş nanoparçacıkların üretiminde kullanılan fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler, parçacıkların fonksiyonları ve etki mekanizmaları, gümüş nanoparçacıkların et ve et ürünlerinde ve onların yeni nesil paketleme sistemlerinde koruyucu olarak kullanımı ayrıntılı olarak sunulmaktadır.</p>

^a gulz.akyuz@hotmail.com

^b <https://orcid.org/0000-0002-3522-9716>

^b sulebiyik.24.61@gmail.com

^b <https://orcid.org/0000-0003-2406-6111>

^c hilal.tombuloglu@omu.edu.tr

^d <https://orcid.org/0000-0002-9754-3962>

^d mandac@omu.edu.tr

^d <https://orcid.org/0000-0001-7262-9762>

^e sturhan@omu.edu.tr

^e <https://orcid.org/0000-0002-3510-4382>



Giriş

Boyutları 1 ile 100 nm arasında değişen organik ve inorganik yapılar olan nanoparçacıklar, günlük hayatımızın bir parçası olup tarım, çevre ve tıp gibi alanlarda çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Metalik nanoparçacıklar, büyük yüzey alanı/hacim oranı gibi benzersiz özelliklere sahip olup, hücrel zarlarla bağlantı kurma yeteneğindedirler. Metalik nanoparçacıklar arasında, gümüş nanoparçacıklar (AgNP'ler), farklı boyut, şekil ve antimikrobiyal özellikleri nedeniyle en fazla araştırılan ve kullanılan nanoparçacıklardır (Lakhan ve ark., 2020).

AgNP'ler yenilikçi ve gelecek vadeden özelliklere sahiptir. Günümüzde ileri gıda teknolojisi uygulamalarında; gıdaların tadını, aromasını ve/veya yapısını bozmadan, besin içeriğini geliştirmek ve raf ömrünü uzatmak, gıda bileşenlerinin veya son ürünün kararlılığını artırmak amacıyla kullanılmaktadırlar. Ayrıca sahip oldukları eşsiz özelliklerden dolayı tıp, farmakoloji, sensörler, gıda paketleme, tarım, kozmetik, tekstil ve kataliz alanlarında da oldukça önemli görülmektedirler (Kumar ve ark., 2021; Nie ve ark., 2023). AgNP'ler, geniş spektrumlu antimikrobiyal özellikleri nedeniyle gıda ambalajlama çalışmalarında en çok kabul gören metalik nanoparçacıklardır. AgNP nanokompozitler, topaklanmayı önleyen ve AgNP'lerin düzgün dağılımına yardımcı olan bazı yüzey modifikasyon teknikleriyle polimer matrisine katılmaktadır. Yüzey modifikasyon teknikleri polar olmayan polimer matrislerine ilavede yardımcı olmaktadır. AgNP'ler, geleneksel olarak kullanılan polimerlerde genel olarak antimikrobiyal özellikleri geliştirmek için kullanılırken, biyolojik olarak parçalanabilen polimerlerde, antimikrobiyal etkinin yanı sıra mekanik özellikleri iyileştirmek için de kullanılmaktadırlar (Akhila ve Badwaik, 2022).

Günümüzde mikrobiyal kontaminasyonun neden olduğu gıda güvenliği problemi, gıda endüstrisi için çözülmesi zor olan önemli sorunlardan biridir. Kırmızı et, kanatlı etleri ve su ürünlerinin işlenmesi ve muhafazasında bu sorun daha da önemlidir. Zira, bu ürünler yüksek su aktiviteleri, uygun pH değerleri ve zengin besin içerikleri nedeniyle mikrobiyal kontaminasyona ve gelişmeye karşı oldukça hassastırlar. Gelişen mikroorganizmalar et ve et ürünlerinin renk, yapı, tat ve görünümünde istenmeyen birçok değişikliğe yol açmaktadır. Mikrobiyal gelişme, sadece istenmeyen değişikliklere değil, bazen gıda kaynaklı hastalıklara da neden olabilmektedir. Bu nedenle, sıcaklık kontrolü, vakum veya modifiye atmosfer ambalajlama, aktif ambalajlama, laktik asit bakterileri uygulama, organik asitler, antioksidanlar, ışınlama ve sıcak su uygulamaları dahil, mikrobiyal gelişmeyi engellemek ve bakteriyel aktiviteyi geciktirmek için çeşitli tekniklerden yararlanılmaktadır (Hong ve ark., 2021).

AgNP içeren aktif ambalaj uygulamalarının et ve et ürünlerinde bozucu ve/veya patojen mikroorganizma gelişimini önlemede yararlı etkiler göstererek tazeliği koruduğu, raf ömrünü uzattığı ve gıda güvenliğini sağlamada etkili olduğu birçok çalışmada rapor edilmiştir (Mahdi ve ark., 2012; Morsy ve ark., 2014; Kavakebi ve ark., 2021; Patino ve ark., 2022). Bununla birlikte toksikolojik ve çevresel etkilerinin tam olarak ortaya konulamaması ve depolama ve taşıma aşamalarında ambalajdan gıdaya geç etme olasılığının bulunması

tüketicilerde bazı endişeler oluşturmaktadır (Simbine ve ark., 2019; Lamri ve ark., 2021). Bu derlemede, AgNP'lerin üretiminde kullanılan fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler, parçacıkların fonksiyonları ve antimikrobiyal etki mekanizmaları, et ve et ürünlerinde ve onların yeni nesil paketleme sistemlerinde koruyucu olarak kullanımları ve toksisiteleri üzerine yapılan çalışmalar ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

Gümüş Nanoparçacıkların Sentez Yöntemleri

AgNP'ler, yüksek yüzey alanı/hacim oranına ve 100 nm'den daha küçük boyuta sahip özel bir metalik gümüş formudur. Nanoteknolojinin gelişmesi, özellikle de AgNP'lerin sentez yöntemlerinin geliştirilmesinde kaydedilen ilerlemeler, bunların çeşitli tüketici ürünlerine girişini popüler hale getirmiş ve gıda, tekstil, inşaat, sağlık, kozmetik, ilaç ve diğer bazı sanayi dallarının dikkatini çekmiştir (Pulit-Prociak ve Banach, 2016).

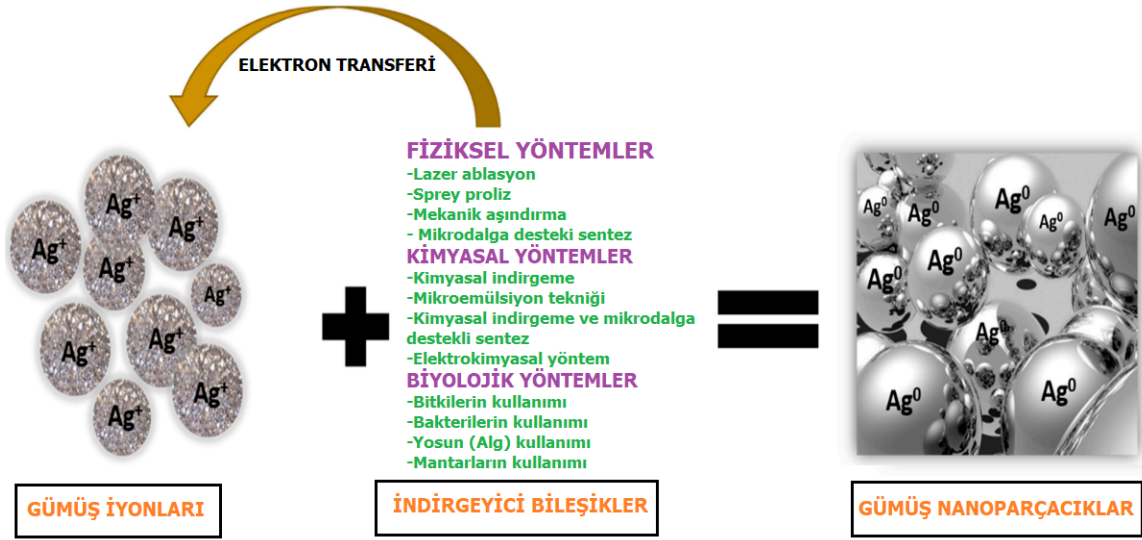
AgNP'lerin sentezi için temel olarak fiziksel, kimyasal ve biyolojik olmak üzere üç farklı yöntem kullanılmaktadır (Şekil 1). Bununla birlikte AgNP'leri sentezlemek için en genel yöntemler fiziksel ve kimyasal yaklaşımlardır. Her yöntemin proses karmaşıklığı, parçacık boyutu dağılımı, stabilite, uygulamalar ve maliyet açısından bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır (Islam ve ark., 2021). Yüksek maliyet ve toksik ara maddelerin kullanımı, fiziksel ve kimyasal yöntemlerle ilgili dezavantajlar olarak tanımlanmıştır (Abdulazeem ve ark., 2021; Roy, 2021). Bu dezavantajların giderilmesi için biyolojik yaklaşımlar uygulanabilir bir alternatif olarak değerlendirilmiş ve nanomalzemelerin bitkiler ve mikroorganizmalar tarafından sentezi için biyolojik sentez yöntemi benimsenmiştir (Abdulazeem ve ark., 2021; Bergal ve ark., 2022).

Fiziksel Yöntemler

Fiziksel sentez, genel olarak AgNP'lerin çeşitli fiziksel kuvvetler kullanılarak yığın malzemelerden nanoyapılara dönüştürülmesini ifade etmektedir (Naganthran ve ark., 2022). Fiziksel işlemlerde, metalik katı gümüş, önce geleneksel ısıtma veya elektrik ark deşarjı ile bir fırında buharlaştırılmakta ve daha sonra nanoparçacık olarak yoğunlaştırılmaktadır (Natsuki, 2015). AgNP'ler; fiziksel olarak buharlaşma-yoğunlaştırma (Almatroudi, 2020), lazer ablasyon, mekanik aşındırma, mikrodalga destekli sentez (Barani ve Mahltig, 2022) ve gümüş bileşiklerinin termal bozunması ile sentezlenebilir. AgNP'ler, elektromanyetik radyasyon kullanılarak fotokimyasal yöntemlerle de üretilebilir (Pichardo ve ark., 2015). Bununla birlikte AgNP'lerin sentezinde kullanılan en önemli fiziksel yöntemler lazer ablasyon (Naddeo ve ark., 2015) ve sprey piroliz (termal ayrışma) yöntemleridir (Naganthran ve ark., 2022).

Kimyasal Yöntemler

Kimyasal işlemler AgNP üretmek için kullanılan yaygın yöntemlerdendir. Sentez ortamı organik veya sulu çözücü olabilir. Kimyasal sentez, çevreye potansiyel olarak zararlı olabilecek toksik ve tehlikeli kimyasalların kullanımını içermektedir.



Şekil 1. Gümüş nanoparçacıkların sentez yöntemleri (Dash ve ark., 2022)
Figure 1. Methods for synthesizing silver nanoparticles (Dash et al., 2022)

Sentezde kullanılan kimyasallar yanıcı olabilir ve biyolojik olarak parçalanamaz. Bu toksik kimyasallar nanoparçacıklar üzerinde tutunabilir ve tıbbi uygulamalarda kullanıldığında toksik ve olumsuz etkilere yol açabilir (Gudikandula ve Maringanti, 2016).

AgNP'lerin kimyasal sentezinde metal öncüsü, indirgeyici ve stabilize edici maddeler olmak üzere genellikle üç ana bileşen kullanılmaktadır. AgNP'ler genel olarak gümüş nitrat ($AgNO_3$), gümüş perklorat ($AgClO_4$) ve gümüş tetrafloroborat ($AgBF_4$) gibi gümüş tuzlarının indirgenmesiyle sentezlenirler (Lee ve Jun, 2019). Kimyasal sentezde yaygın olarak kullanılan indirgeyici kimyasallara örnek olarak, etilen glikol ($C_2H_6O_2$), etanol (C_2H_5OH), glikoz ($C_6H_{12}O_6$), sodyum borhidür ($NaBH_4$), hidrazin (N_2H_4), sodyum sitrat ($C_6H_5Na_3O_7$), sodyum askorbat ($C_6H_7NaO_6$) ve sodyum tiyosülfat ($Na_2S_2O_3$) verilebilir (Lee ve Jun, 2019; Almatroudi, 2020).

AgNP'lerin kimyasal sentezi sırasında dar parçacık boyutu dağılımına sahip küçük küresel AgNP'ler üretmek için parçacık büyümesini kontrol etmek bu yöntemin ana zorluklarından biridir. Sentezde nanoparçacıkların agregasyonunu önleyerek gümüşün nanoformunu stabilize etmek için stabilize edici ajan kullanmak da esastır. Polivinil piroolidon (PVP), polivinil alkol (PVA), polietilen glikol (PEG), polisakaritler, kitosan ve glukonik asit yaygın olarak kullanılan maddelerdir (Almatroudi, 2020). Sentezlenen AgNP'lerin boyutu ve şekli; pH, reaksiyon süresi gibi reaksiyon koşulları, ayrıca kullanılan gümüş tuzları, indirgeyici ajanlar ve stabilize edici kimyasallar ile kontrol edilebilir (Islam ve ark., 2021). Kimyasal sentez; kimyasal indirgeme, mikroemülsiyon tekniği, mikrodalga destekli sentez ve elektrokimyasal yöntemi içermektedir (Naganthran ve ark., 2022).

Biyolojik Yöntemler

Son yıllarda, AgNP'lerin üretiminde çevre dostu süreçleri geliştirmek amacıyla toksik kimyasallar kullanmayan sentez yöntemleri geliştirilmektedir. Bu yöntemler, çevresel ve toksik kimyasalları içermeyen, kimyasal ve fiziksel üretim araçlarıyla ilgili diğer sorunları ortadan kaldıran, çevre dostu bir yöntem olan biyolojik

yöntemlerdir. Biyolojik yöntem sadece daha basit ve düşük maliyetli olmakla kalmaz, aynı zamanda reaksiyona girmemiş sentetik kimyasallardan kaynaklanan toksisitenin ortadan kaldırılması ve bertaraf edilmesi nedeniyle daha düşük çevresel etkiye sahiptir ve birçok araştırmacı tarafından başarıyla kullanılmaktadır (Rajoriya ve ark., 2021; Bergal ve ark., 2022). Bu yöntemler kimyasal ve fiziksel yöntemlere alternatif olarak mikroorganizmaların ve bitki kaynaklarının kullanımını içermektedir. Proteinler, karbonhidratlar, antioksidan maddeler, mikroorganizmalar, bitki veya bitki özütü kullanılarak AgNP'ler sentezlenmektedir (Almatroudi, 2020; Bandekar ve ark., 2020). Biyolojik yöntemlerde temel mekanizma enzimatik ve enzimatik olmayan indirgeme şeklindedir. Bu yöntemde, özellikle bitkisel sistemlerin kullanılması en çevre dostu yöntem olarak kabul edilmektedir. Diğer süreçlerle karşılaştırıldığında, özellikle çevresel açıdan yarar sağlamaktadır (Jain ve ark., 2021; Dutta ve ark., 2022).

Biyolojik sentez yöntemi ile tek adımda sentezlenen AgNP'ler yüksek derecede stabilite, çeşitlilik ve farklı boyutlara sahiptir. Gümüş nanoparçacıkların biyolojik üretiminde organizmalardan elde edilen ekstraktlar, AgNP sentezinde indirgeyici ve stabilize edici ajanlar olarak işlev görebilirler. Ag iyonlarının indirgenmesi, ekstraktlarda bulunabilen enzimler, proteinler, polisakarit, amino asit ve vitaminler gibi biyomoleküller tarafından kolaylaştırılır ve bu biyomoleküller biyolojik olarak parçalanabilirler (Lee ve Jun, 2019; Almatroudi, 2020).

Biyolojik üretim yöntemleri bitki kaynaklarının (Akintelu ve ark., 2020; İjz ve ark., 2021; Bergal ve ark., 2022) yanı sıra mantar (Casagrande ve de Lima, 2019), bakteri (Saeed ve ark., 2020), maya (Casagrande ve de Lima, 2019) ve alg (Chaudhary ve ark., 2020) gibi canlı organizmaların kullanımını da içermektedir. Mikroorganizmalara ve bitkilere dayalı nanoparçacık üretim yöntemleri güvenli, ekonomik ve kimyasal senteze göre çevreye nispeten daha az zararlıdır. Bu kaynakların kullanımı ile sentez, nanoparçacıkları tıbbi uygulamalar için çok popüler hale getirmiştir (Almatroudi, 2020; Islam ve ark., 2021; Roy, 2021; Naganthran ve ark., 2022).

Bitki özütleri kullanılarak AgNP'lerin biyolojik indirgenmesi, çevre dostu veya yeşil sentez olarak adlandırılmaktadır (Vega-Baudrit ve ark., 2019; Abdulazeem ve ark., 2021; Crisan ve ark., 2021). Bitkileri bir AgNP sentezleyicisi olarak kullanan biyolojik sentez yöntemi, diğer biyolojik yöntemlerden daha üstündür. Diğer biyolojik kaynaklara kıyasla bitkiler bol olduğu için sentez yöntemi basitlik, hızlı sentez, toksisite olmaması, toplam maliyette azalma gibi avantajlara sahiptir. Ek olarak, mikroorganizmaların kullanıldığı biyolojik sentezle karşılaştırıldığında, AgNP'leri sentezlemek için bitkilerin kullanılması izolasyon ve kültür ortamı maliyetlerini ve çevresel kontaminasyonu azaltmaktadır (Akintelu ve ark., 2020; Garg ve ark., 2020; Jain ve ark., 2021; Ijaz ve ark., 2021). Bitkilerden nanoparçacık sentezi, bitkilerde indirgenmeden sorumlu olan ve nanoparçacık sentezi için stabilize edici ajan olarak görev yapan çeşitli biyomoleküllerin varlığı nedeniyle mikroorganizmaya göre özel bir avantaj sağlamaktadır (Kanimozhi ve ark., 2022).

Bitki özleri, Ag⁺ iyonlarının indirgenmesi ve stabilizasyonunda rol oynayan, çevre dostu ve tıbbi değerlere sahip polisakaritler, tanenler, alkaloidler, flavonoidler, amino asitler, vitaminler, polifenoller, terpenoidler ve saponinler gibi biyomoleküller içermektedir. AgNP'ler yapraklar, gövdeler, kökler, tohumlar ve lateks dahil olmak üzere bitki özlerinden sentezlenebilir. Bitki yaprağı, hücre dışı AgNP'lerin sentezinde tüm bitkiye kıyasla tercih edilmektedir. Bitkiler tarafından üretilen AgNP'lerin şekli ve boyutu, bitki ekstraktının hacmi, ekstraksiyon çözücüsü, ekstraksiyon süresi ve sıcaklığı, gümüş konsantrasyonu, reaksiyon süresi ve sıcaklığı ve ortam pH'sı ile belirlenir. Reaksiyon karışımının pH değerini artırarak, küçük ve tek tip boyutlu parçacıklar üretilebilir (Bandekar ve ark., 2020; Ijaz ve ark., 2021; Bergal ve ark., 2022).

Gümüş Nanoparçacıkların Fonksiyonları

Son yıllarda AgNP'ler, antimikrobiyal etkinlikleri nedeniyle özellikle sağlık alanında kateter (Pino-Ramos ve ark., 2021), stent (Li ve ark., 2022a), yapay kalp kapakçıkları, cerrahi aletler (Angelina ve ark., 2019) ve kontakt lensler (Meretoudi ve ark., 2021) gibi çeşitli biyomedikal ürünlerin bileşenlerinde antimikrobiyal kaplamalar olarak bulunmaktadır. Ayrıca, yaraların tedavisinde hidrojel olarak potansiyel kullanımları da mevcuttur (Matar ve Andac, 2021; Huang ve ark., 2022; Rodriguez-Acosta ve ark., 2022). Bunun yanı sıra; diş

hekimliğindeki alaşımlarda (Pipattanachat ve ark., 2021), reçinelerde (Takamiya ve ark., 2021) ve protezler ve kaplamalarda (Fernandez ve ark., 2021; Gaviria ve ark., 2021) bulunmaları, uzun süreli ağız hijyenini desteklemektedir. Tekstil endüstrisinde; antimikrobiyal kumaşlar oluşturmak için malzemeye eklenerek dayanıklılık, parlak renk performans ve dezenfeksiyon gibi benzersiz özellikler kazandırılır (Ahmed ve Ogulata, 2021). Kozmetik ürünlerinde (Ong ve Nyam, 2022), dezenfekte edici spreylere (An ve Nguyen, 2022) ve böcek ilaçlarında (Bapat ve ark., 2022) kullanımları öne çıkmaktadır. Çizelge 1'de AgNP katkılı, antimikrobiyal özellik gösteren ticari ürünler ve firmaları listelenmiştir. AgNP'ler, kimyasal ve fiziksel özellikleri sayesinde biyosensörlerin geliştirilmesi gibi çeşitli yüksek teknoloji uygulamaları için de tercih edilmektedir (Krishnaraj ve ark., 2022; Li ve ark., 2022b). Gıda endüstrisinde; mikotoksin, pestisit kalıntısı, antibiyotik ve gıda patojenleri tespitinde biyosensörlerle ilgili araştırmalar yapılmaktadır. Örneğin, ambalajlardaki nanosensörler sayesinde tartrazine (E 102), cochineal red (E 124) ve sunset yellow (E 110) gibi sentetik gıda katkı maddelerinin tespiti mümkün olmaktadır (Pushparaj ve ark., 2022).

AgNP'lerin gıda ambalajlarındaki kullanımı son yıllarda büyük ölçüde artmıştır. AgNP esaslı gıda ambalajları (i) gaz bariyeri gibi özellikleri desteklemek için nanoparçacığın polimer matrisine karıştırıldığı "nanokompozit ambalaj" ve (ii) antimikrobiyal ajan olarak gıdanın daha iyi korunmasını sağlamak için doğrudan gıda veya çevre ile etkileşime girdiği "aktif ambalaj" olmak üzere iki farklı kategoriye ayrılmaktadır. AgNP'ler, güçlü antimikrobiyal özelliklere sahip olduklarından çoğunlukla "aktif ambalaj" olarak kullanılmaktadır. Bakteriler, mayalar, küfler ve virüsler dahil çok çeşitli patojen mikroorganizmalara karşı oldukça etkilidirler. AgNP'ler, mikroorganizmalar ile daha iyi temas sağlayabilen son derece geniş yüzey alanları sayesinde metalik gümüşe kıyasla daha güçlü antimikrobiyal özellikler göstermektedir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda düşük uçuculuk ve iyi bir kararlılık sergilemektedirler. Farklı stratejiler aracılığıyla polimerler ve stabilize edici maddeler (sitratlar ve uzun zincirli alkoller) gibi farklı matrislerde barındırılabilir, kaplanabilir, emilebilir veya sentez süreçlerine doğrudan dahil edilebilirler (Carbone ve ark., 2016). AgNP'lerin bozunmayan polimerik yapılar ya da biyobozunur doğal polimerlerle beraber kaplama materyali olarak kullanıldığı bazı çalışmalar Çizelge 2'de özetlenmiştir.

Çizelge 1. Gümüş nano parçacık bazlı antimikrobiyal ambalaj üreten firmalar ve ürünleri (Ashfaq ve ark., 2022)

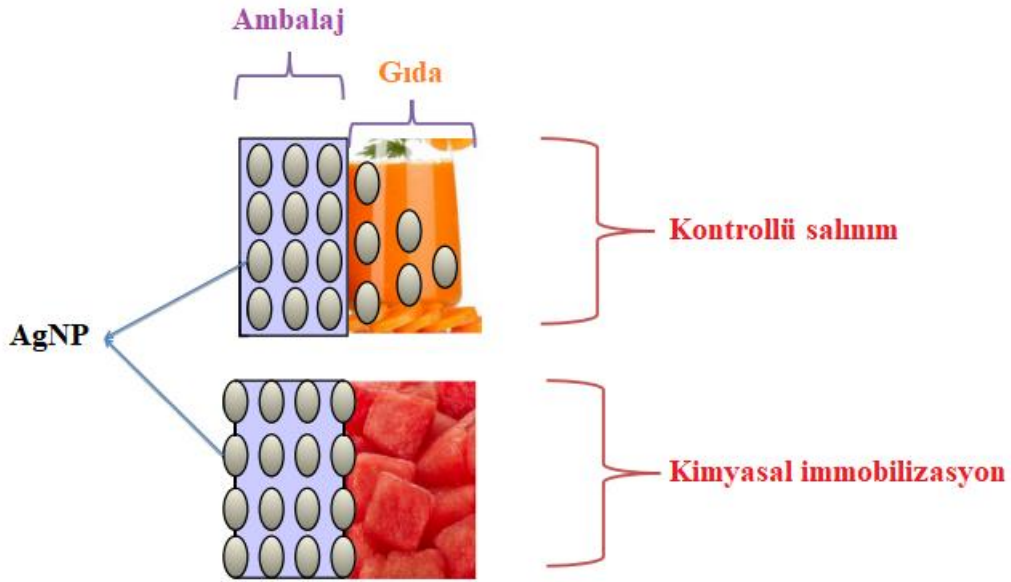
Table 1. Companies producing silver nanoparticle-based antimicrobial package and their products (Ashfaq et al., 2022)

Firma adı	Materyal	Etkinlik
Sharper Image Company, USA	Polipropilen-AgNP	Meyve, sebze, ekmek, peynir, çorba, soslar ve et ürünleri için uzun raf ömrü
Dai Dong Tien Corporation, Vietnam	Polipropilen-kopolyester-AgNP	Kötü koku ve patojen gelişimini engelleme
Dong Yang Chemical Co. Ltd., Güney Kore	Kopolyester-AgNP	Konteyner yüzeyinde bakteri, virüs veya mantar üremesini engelleme
Fine Polymer, Inc., Güney Kore	Polietilen-AgNP	Gıdaları daha taze ve daha uzun süre saklama
Baby dream Co., Ltd., Güney Kore	Polietersülfon-polipropilen-AgNP	Biberonlar ve kupalar için dezenfeksiyon
Cixi Mingxin Plastic & Rubber Factory, Çin	Polipropilen-silikon-AgNP	Antibiyotik ve antibakteriyel etkinlik

Çizelge 2. Gümüş nanoparçacık katkılı antimikrobiyal ajanlar ve gıda uygulamaları

Table 2. Antimicrobial agents with silver nanoparticles and food applications

Nanosistem	Uygulama	Mikroorganizma	Kaynak
Kitosan-AgNP	Kiraz	<i>E. coli</i> , <i>S. cerevisiae</i> , <i>P. citrinum</i>	Liang ve ark., 2019
Pullulan-AgNP-Uçucu yağ	Et ve kümes hayvanları ürünleri	<i>S. aureus</i> , <i>L. monocytogenes</i> , <i>E. coli</i> , <i>S. typhimurium</i>	Morsy ve ark., 2014
Sodyum aljinat-AgNP	Armut, havuç	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>	Fayaz ve ark., 2009
Nişasta-AgNP	-	<i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , <i>Candida albicans</i>	Abreu ve ark., 2015
Bal-AgNP	-	<i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>B. cereus</i> , <i>S. aureus</i>	Matar ve ark., 2023
Zeytin-Yeşil çay-AgNP	-	<i>E. coli</i> , <i>P. Aeruginosa</i> , <i>S. aureus</i> , <i>B. cereus</i>	Bergal ve ark., 2022
Kitosan-Uçucu yağ-AgNP	Çilek	<i>L. monocytogenes</i> , <i>S. enterica</i> , <i>E. coli</i> , <i>Aspergillus niger</i>	Shankar ve ark., 2021
Kitosan-Jelatin-AgNP	Havuç dilimi	<i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , <i>S. mutans</i> , <i>P. aeruginosa</i>	Ediyilyam ve ark., 2021
Siyah (Java) eriği-AgNP	-	<i>S. aureus</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>E. coli</i>	Chakravarty ve ark., 2022
Keklik otu-AgNP	-	<i>S. agalactiae</i> , <i>A. hydrophila</i> , <i>V. alginolyticus</i> , <i>A. flavus</i> , <i>F. moniliforme C. albicans</i>	Ghetas ve ark., 2022



Şekil 2. Gümüş nanoparçacıkların gıda ambalajında çalışması (Ahmad ve ark., 2021)
Figure 2. The working of silver nanoparticles in the food package (Ahmad et al., 2021)

AgNP'lerin bir ambalajlama polimerindeki en önemli fonksiyonu, ambalajın antimikrobiyal ve/veya mekanik özelliklerine katkı sağlamasıdır. AgNP içeren ambalajların mikroorganizmalara karşı iki farklı yolla etki gösterdiği bilinmektedir. Bunlar; (i) gıda ile temas ettikten sonra AgNP'lerden Ag^+ iyonlarının gıda matrisine yavaşça salınımı ve (ii) ambalaj yüzeyinde bulunan AgNP'lerin gıda matrisine salınmadan etki göstermesi şeklinde olmaktadır (Şekil 2). Antimikrobiyal maddelerin migrasyonu; süre, sıcaklık, migrasyon konsantrasyonu, polimer tipi ve gıdadaki çözünürlüğe bağlı olarak Fick'in difüzyon yasasına göre gerçekleşmektedir (Ahmad ve ark., 2021).

AgNP'lerin gıda ambalajlarında antimikrobiyal ajan olarak kullanılması bir teknoloji olmasına rağmen, gıdalara ve içeceklere geçen Ag^+ iyonlarının vücuda alınması tüketicilerde ve gıda güvenliği yetkililerinde endişe oluşturmakta ve ihtiyatlı davranmalarına yol açmaktadır.

Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA) mevzuatı, ambalajdan gümüş geçişinin üst sınırını suda 0,05 mg/L, gıdalarda ise 0,05 mg/kg olarak belirlemiştir (Carbone ve ark., 2016; Ahmad ve ark., 2021). Bu durum, antimikrobiyal etkinliğin sağlanması amacıyla gerçekleştirilen uygulamalarda gümüş migrasyonunun belirlenmesinin ve mevzuata uygun olmasının gerekliliğini göstermektedir.

Gümüş Nanoparçacıkların Etki Mekanizmaları

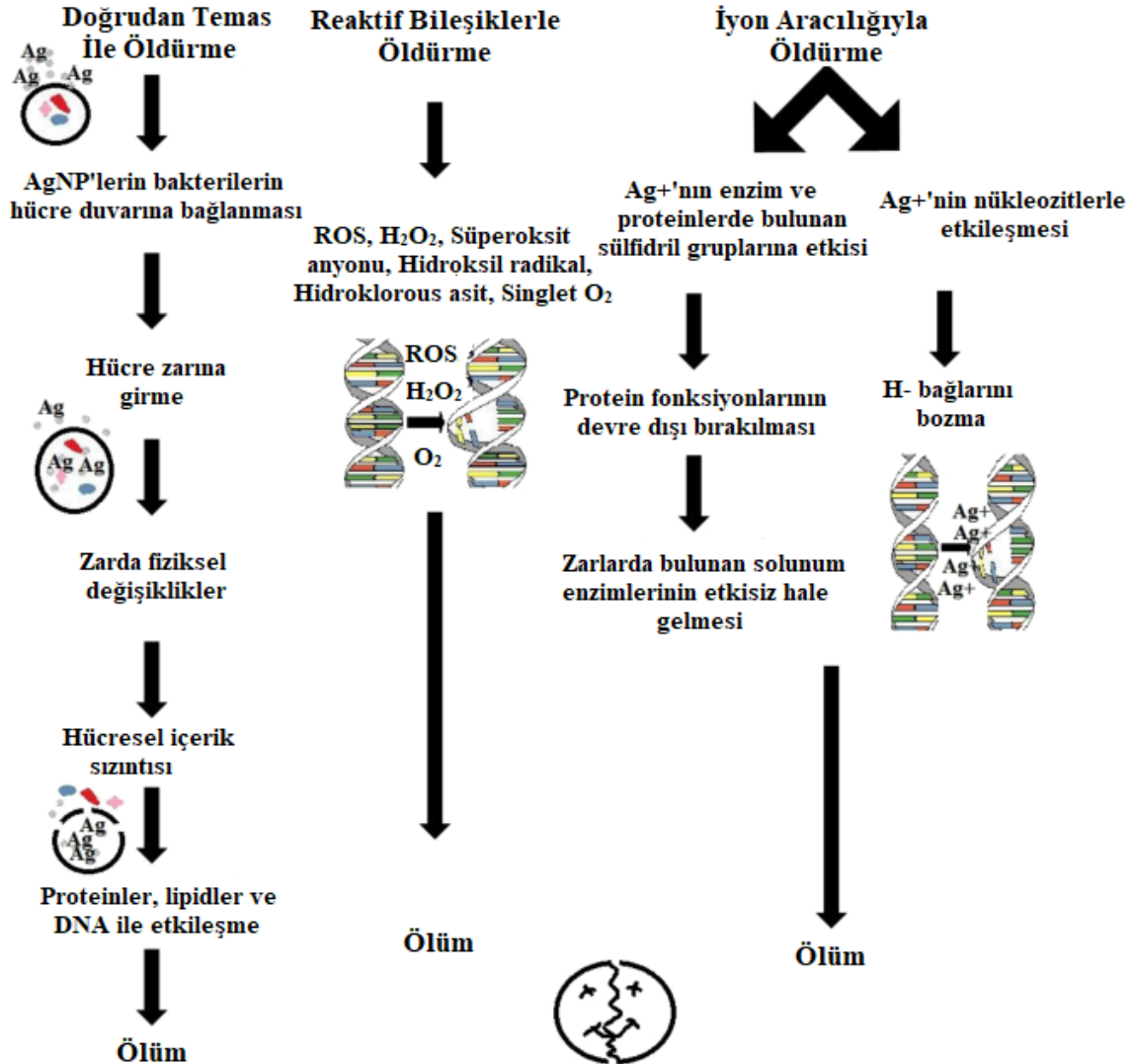
AgNP'lerin güçlü antimikrobiyal ajanlar olmaları çeşitli endüstri ürünlerinde kullanılmalarını yaygınlaştırmaktadır. Polimerik matrislere eklenmeleri ile antimikrobiyal etkinlik artmakta, ürün kalitesi ve raf ömrü iyileşmektedir. AgNP'ler, mikroorganizmalar ile daha iyi temas sağlayabilen son derece geniş yüzey alanları sayesinde metalik gümüşe kıyasla daha güçlü

antimikrobiyal özellik göstermektedir (Carbone ve ark., 2016). Antimikrobiyal etki mekanizmaları henüz tam olarak anlaşılammakla birlikte, araştırmacılar büyük yüzey/hacim oranı ve parçacık şekline bağlı olarak nanoparçacık boyutunun neden olduğu hücre morfolojisi ve yapısındaki değişikliklerle ilgili olabilecek olası mekanizmalar üzerine teoriler geliştirmiştir (Şekil 3) (Ahmad ve ark., 2021; De Silva ve ark., 2021).

Doğrudan temas ile öldürme teorisine göre; AgNP'ler bakteri hücreleriyle doğrudan etkileşime girerek hücre zarı bütünlüğünün bozulmasına ve hücre içeriğinin dışarı sızmasına neden olmakta ve sonuçta hücre ölümü gerçekleşmektedir (Ahmad ve ark., 2021; De Silva ve ark., 2021). AgNP'ler hücre duvarına yapışma ve nüfuz etme yeteneğine sahiptir. Nanoparçacığın pozitif yükü, hücre zarının negatif yükü ile elektrostatik olarak etkileşmekte ve böylece oluşan elektrostatik yükler aracılığıyla nanoparçacıkların hücre zarına tutunması kolaylaşmaktadır. Oluşan etkileşim ile bakteri hücresinde sitoplazma büzülmesi ve hücre zarı yırtılması gibi morfolojik değişiklikler meydana gelmektedir. Diğer bir faktör ise, AgNP'lerin hücre duvarında bulunan kükürt

içeren proteinlerle etkileşime girerek hücre duvarında hasara neden olabilmektedir. Küçük boyutlu nanoparçacıklar, geniş yüzey alanı/hacim oranları nedeniyle bakteri hücrelerinin hücre içi yapılarını, büyük boyutlu nanoparçacıklardan daha hızlı etkilemektedir. Bakteriler tarafından alınan nano gümüş; proteinler, lipitler, enzimler ve DNA gibi hücre bileşenleri ile etkileşime girerek işlev bozukluğu ve sonunda bakteri hücresi ölümü gibi ciddi hasarlara yol açabilmektedir. AgNP'ler, bakteri ribozomları ile etkileşime girerek protein sentezini de engelleyebilmektedir (De Silva ve ark., 2021).

Reaktif bileşiklerle öldürme teorisine göre; AgNP'ler, reaktif oksijen türleri (ROS), hidrojen peroksit, süperoksit anyonu, hidroksil radikali, hidrokloröz asit ve tekli (singlet) oksijen gibi değişik reaktif bileşikler üreterek DNA'nın bozulmasına neden olmakta ve sonuçta organizma ölümü gerçekleşmektedir (Owoseni-Fagbenro ve ark., 2019; Ahmad ve ark., 2021; Sofi ve ark., 2022). AgNP'lerin oksidasyonu sonucu oluşan gümüş iyonları, ROS üretimini katalize etmekte ve oluşan ROS'lar hücrelerin ölümünü indüklemektedir (De Silva ve ark., 2021).



Şekil 3. Gümüş nanoparçacıkların antimikrobiyal etki mekanizmaları (Ahmad ve ark., 2021)

Figure 3. Antimicrobial action mechanisms of silver nanoparticles (Ahmad et al., 2021)

Çizelge 3. Gümüş nanoparçacık içeren film veya kaplamaların et ve et ürünlerinde koruyucu olarak kullanımı üzerine yapılan çalışmaların özeti

Table 3. Summary of studies on the use of films or coatings containing silver nanoparticles as preservatives in meat and meat products

Uygulama şekli	Uygulandığı gıda	Etkisi	Sonuç	Kaynak
Kırmızı et ve ürünleri				
Polietilen + AgNP Poliamid + AgNP	Sığır eti kıyması	Antibakteriyel	<i>E. coli</i> 'nin gelişimini yavaşlatmış, <i>S. aureus</i> 'un gelişimini ise durdurmuştur.	Abbasi ve ark., 2020
Kitosan + AgNP	Sığır eti kıyması	Antibakteriyel ve antioksidan	<i>E. coli</i> ve <i>S. typhimurium</i> bakterilerinin inhibisyonunda etkili olmuş, lipid oksidasyonunu yavaşlatmıştır.	Badawy ve ark., 2019
Karboksi metil selüloz + AgNP Kitosan + AgNP	Sığır eti	Antibakteriyel	AgNP içeren kaplamalar patojen ve bozulma etmeni bakterilerin inhibisyonunu sağlamıştır.	El-Refai ve ark., 2017
Agar + AgNP	Dana bonfile	Antibakteriyel ve antioksidan	<i>L. monocytogenes</i> ve <i>E. coli</i> O157:H7 gelişmesini azaltmış, oksidatif acılaşmayı geciktirmiştir.	Hong ve ark., 2021
Pullulan + AgNP + Kekik ve biberiye uçucu yağları	Sığır eti ürünleri	Antibakteriyel	<i>E. coli</i> O157:H7, <i>S. aureus</i> , <i>S. typhimurium</i> ve <i>L. monocytogenes</i> 'e karşı antimikrobiyal etki göstermiştir.	Morsy ve ark., 2014
Kitosan + AgNP + enkapsüle defne yaprağı yağı	Domuz eti	Antibakteriyel ve antioksidan	<i>E. coli</i> ve <i>S. aureus</i> 'a karşı etki göstermiş, oksidatif acılaşmayı önlemiştir.	Wu ve ark., 2019
Selüloz + AgNP	Sığır eti	Antibakteriyel	Sığır etinin doğal bakteri sayısının kontrol edilmesinde ve <i>E. coli</i> O157:H7'nin inhibisyonunda etkili olmuştur.	Wang ve ark., 2020
AgNP ilaveli ambalaj	Sığır eti kıyması	Antibakteriyel	Daha uzun raf ömrü sağlamıştır.	Mahdi ve ark., 2012
Poliamid + Ag-Zn kristalleri	Sığır eti sosisi	Antibakteriyel ve antioksidan	Mezofilik ve LAB aerobların çoğalmasını yavaşlatmış, oksidatif stabiliteyi artırmıştır.	Patino ve ark., 2022
Kanatlı etleri ve ürünleri				
Pullulan + AgNP + Uçucu yağ	Hindi eti	Antibakteriyel	<i>L. monocytogenes</i> ve <i>S. aureus</i> popülasyonunda azalma sağlamıştır.	Khalaf ve ark., 2013
Pullulan + AgNP + Kekik ve biberiye uçucu yağları	Hindi eti ve sığır eti ürünleri	Antibakteriyel	<i>E. coli</i> O157:H7, <i>S. aureus</i> , <i>S. typhimurium</i> ve <i>L. monocytogenes</i> 'e karşı antimikrobiyal etki göstermiştir.	Morsy ve ark., 2014
LDPE + ZnO + Ag	Tavuk göğüs eti	Antibakteriyel ve antioksidan	<i>Enterobacteriaceae</i> ve mezofilik bakteri gelişimini yavaşlatmış, lipid oksidasyonunu geciktirmiştir.	Panea ve ark., 2014
LDPE + AgNP	Tavuk göğüs filetosu	Antibakteriyel ve antioksidan	Psikrotrofik bakteri, <i>Pseudomonas</i> spp. ve <i>E. coli</i> gelişimini yavaşlatmış, oksidatif stabiliteyi artırmış.	Azlin-Hasim ve ark., 2015
PVC + AgNP	Tavuk göğüs filetosu	Antibakteriyel ve antioksidan	Toplam bakteri ve <i>Pseudomonas</i> spp. gelişimini yavaşlatmış, lipid oksidasyonunu geciktirmiştir.	Azlin-Hasim ve ark., 2016
AgNP	Tavuk sosisi	Antibakteriyel	Laktik asit bakterilerinin gelişimini inhibe etmiştir.	Marchiore ve ark., 2017
LLDPE + Ag-CuNP + tarçın uçucu yağı	Tavuk eti	Antibakteriyel	<i>L. monocytogenes</i> sayısını azaltmış, <i>C. jejuni</i> ve <i>S. Typhimurium</i> 'a karşı tam bir inhibisyon göstermiştir.	Ahmed ve ark., 2018
PVA + CH + AgNP	Tavuk sosisi	Antimikrobiyel	Raf ömrünü uzatmıştır.	Nwabor ve ark., 2020
PVP + AgNP	Tavuk	Antibakteriyel	Toplam bakteri sayısını azaltmış, <i>S. aureus</i> , <i>S. Typhimurium</i> ve <i>E. coli</i> 'ye karşı inhibitör etki göstermiştir.	Zhao ve ark., 2021
HPMC + AgNP	Tavuk filetosu	Antibakteriyel	<i>S. Typhimurium</i> , <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> ve <i>B. cereus</i> sayılarında azalma sağlamış, raf ömrünü uzatmıştır.	Abo-Gabal ve ark., 2022
Pullulan + AgNP	Broiler göğüs eti	Antioksidan	Oksidatif stabiliteyi artırmıştır.	Khan ve ark., 2022
Poliamid + Ag-Zn kristalleri	Tavuk sosisi	Antibakteriyel ve antioksidan	Mezofilik ve LAB aerobların çoğalmasını yavaşlatmış, oksidatif stabiliteyi artırmıştır.	Patino ve ark., 2022
Su ürünleri				
AgNP içeren buz	Kefal balığı	Antibakteriyel	Yüzeydeki patojen mikroorganizma yükünü azaltmıştır. <i>Acinetobacter</i> gelişimini inhibe etmiştir.	Daniel ve ark., 2016
S-AgNP/PVA	Oncorhynchus mykiss filetosu	Antibakteriyel	Raf ömrünü uzatmıştır.	Kavakebi ve ark., 2021

İyon aracılı öldürme teorisine göre; AgNP iyonları, enzimlerin sülfhidril gruplarına müdahale etmekte ve solunum enzimlerini etkisiz hale getirmektedir. Ayrıca bu nanoparçacıklar, nükleik asidin hidrojen bağlarını bozarak da hücreye zarar vermekte ve hücre ölümüne neden olmaktadır (Ahmad ve ark., 2021). AgNP'lerin bakteri solunum zincirine bağlandığı ve sonunda hücre ölümüne yol açan temel fizyolojik süreçleri bozduğu yapılan çalışmalarla ortaya çıkarılmıştır (Owoseni-Fagbenro ve ark., 2019; Sofi ve ark., 2022). Gümüş nanoparçacıkların antimikrobiyal etkisi patojen tipi, ortam sıcaklığı, pH ve kullanılan AgNO₃ konsantrasyonunu da dahil olmak üzere çeşitli parametrelerden büyük ölçüde etkilenmektedir (Bergal ve ark., 2022; Ijaz ve ark., 2022; Sofi ve ark., 2022; Matar ve ark., 2023).

Gümüş Nanoparçacıkların Et ve Et Ürünlerinde Kullanımları

İnorganik ve organik nanoparçacıklar renk ve aroma geliştirici ve nutrasötik gıda taşıyıcıları olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ayrıca sahip oldukları antimikrobiyal özellik sayesinde koruyucu gıda ambalaj materyali olarak da kullanım potansiyelleri mevcuttur (Lamri ve ark., 2021). AgNP'ler, ilave edildikleri ambalaj materyalinin özelliklerini geliştirebilir, ayrıca aktif veya akıllı ambalajlama olarak da kullanılabilirler (Kumar ve ark., 2020). Et teknolojisinde AgNP kullanımı ürünlerin işlenmesi ve depolanması sırasında raf ömrünü uzatmak için yeni bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Lamri ve ark., 2021). Literatürde et ve et ürünlerinin raf ömrünü uzatmak için uygulanan çeşitli yöntemlerle ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak AgNP'lerin koruyucu olarak kullanımı üzerine yapılan çalışmalar sınırlı düzeydedir. Aşağıda, literatürde mevcut bu çalışmalar, ilgili konu başlıkları altında açıklanmış ve ayrıca Çizelge 3'te de özetlenmiştir.

Kırmızı Et ve Ürünleri

Kırmızı etler, bakteri gelişimini teşvik eden bol miktarda besin ögesine ve yüksek su aktivitesine sahip olduklarından düşük sıcaklıklarda muhafaza edilmiş olsalar bile mikrobiyal aktivite ve duyuşal değişiklikler nedeniyle hızlı bir şekilde kalite kaybına uğrarlar (Kuuliala ve ark., 2015). Bu nedenle birçok ülkede, kırmızı etlerde bulunabilecek mikroorganizma sayıları yasal düzenlemelerle sınırlandırılmıştır. Kırmızı etlerde sıklıkla tespit edilen *E. coli* ve *S. aureus* bakterilerinin gelişimi üzerine AgNP'lerin etkisi Abbasi ve ark. (2020) tarafından araştırılmıştır. Polietilen ve poliamid gibi geleneksel kaplama yöntemleri ile nanoparçacık ilaveli kaplamaların etkinliği karşılaştırılmış ve AgNP ilavesinin sığır eti kıymasındaki mikroorganizma gelişimi üzerinde önemli etkisinin olduğu rapor edilmiştir. AgNP'lerin *E. coli*'nin gelişimini önemli ölçüde yavaşlattığı, *S. aureus*'un gelişimini ise tamamen durdurduğu belirlenmiştir.

Badawy ve ark. (2019) tarafından kitosan-gümüş nanoparçacık (Ch-AgNP) uygulamasının kıymanın depolama stabilitesine etkisi araştırılmıştır. Ch-AgNP'nin *E. coli* ve *S. thymurium*'a karşı antimikrobiyal etki gösterdiği belirlenmiş ve *E. coli* ile kontamine edilen kıymalara farklı konsantrasyonlarda Ch-AgNP ilavesinin bakteri inhibisyonunda etkili olduğu bildirilmiştir. Ayrıca

ilave edilen Ch-AgNP'nin depolama süresince antioksidan etkisi incelenmiş ve ürüne ilave edilen AgNP miktarı arttıkça antioksidan aktivitenin de arttığı belirlenmiştir. Lipit oksidasyon ürünü olan ve etlerde bozulmanın tespitinde kullanılan peroksit değeri incelendiğinde Ch-AgNP ilavesinin oksidasyonu yavaşlattığı gözlenmiş ve 100 meq O₂/kg et olarak tavsiye edilen sınır değeri 10 günlük depolama süresince aşmadığı rapor edilmiştir.

Karboksi metil selüloz (CMC) ve kitosan bazlı yenilebilir kaplamalara ferulik asit ve AgNP ilavesinin sığır etinin raf ömrüne etkisinin incelendiği bir çalışmada (El-Refai ve ark., 2017), 12 günlük depolama süresince yapılan mikrobiyal analizler sonucunda AgNP ilavesinin ferulik asit ilaveli kaplamalara göre daha etkili olduğu ve AgNP'lerin antimikrobiyal etkisi sayesinde depolama süresince hem patojen hem de bozulma etmeni bakterilere karşı inhibisyon etkisi gösterdiği belirlenmiştir. İlave olarak, çalışmada CMC ve kitosan ile hazırlanan kaplamaların karşılaştırılması yapılmış ve kitosan bazlı kaplamaların hem AgNP hem de ferulik asit ilavesinde mikrobiyel bozulmaya karşı daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Dana bonfilelerinin mikrobiyal ve fizikokimyasal özelliklerinin iyileştirmesi amacıyla yapılan bir çalışmada, bonfile örnekler %0-2 oranında AgNP ilaveli agar bazlı filmler ile kaplanmıştır. *L. monocytogenes* ve *E. coli* O157:H7 ile kontamine edilen etlerde mikrobiyal gelişimde azalma gözlenmiştir. Ayrıca filmin, oksijen ile direkt teması engellemesi nedeniyle depolama süresince (5 °C'de 15 gün) ürünün rengini koruduğu ve oksidatif acılaşmayı geciktirdiği bildirilmiştir. Böylece araştırmacılar AgNP içeren agar bazlı yenilebilir filmlerin dağıtım ve depolama sırasında ürünün kalitesinin korunması amacıyla kullanılabileceğini rapor etmişlerdir (Hong ve ark., 2021).

Wu ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada, domuz etlerinde AgNP'lerin kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Çalışmada lipozom ile enkapsüle edilen defne yaprağı uçucu yağı ve AgNP'ler kitosan bazlı kaplama hazırlanmasında kullanılmıştır. Kaplama çözeltisi püskürtülen polietilen ambalajlar ile depolanan domuz etlerinde oksidatif acılaşma önlenmiştir. Ayrıca kaplamaların *E. coli* ve *S. aureus*'a karşı da güçlü antimikrobiyal ajan olduğu belirlenmiştir. Böylece hazırlanan kaplama çözeltisinin hem antimikrobiyal hem de antioksidan özelliğe sahip olduğu rapor edilmiştir. Kaplama uygulanan örneklerin raf ömrü 4 °C'de 15 gün olarak belirlenirken, kontrol örneği 9 günde raf ömrünü doldurmuştur.

Çevre dostu antimikrobiyal film hazırlamak amacıyla yapılan bir çalışmada, bakteriyel nanoselülozda sentezlenen AgNP'ler kullanılmış ve sığır etlerinde etkisi incelenmiştir. Hazırlanan filmlerin *E. coli* O157:H7'ye karşı hem besiyeri ortamında hem de ette inhibisyon özelliğine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca sığır etlerinin doğal bakteri sayısının kontrol edilmesinde de etkili olduğu bildirilmiştir. Sonuç olarak hem çevre dostu hem de güçlü antioksidan ve mekanik özelliklere sahip bir ambalaj materyali olarak gıda endüstrisinde kullanımı önerilmiştir (Wang ve ark., 2020).

Papaya ekstraktından sentezlenen AgNP'lerin et örneklerine uygulamasının yapıldığı bir çalışmada, etin kimyasal ve mikrobiyal özellikleri değerlendirilmiştir.

Örnekler %10, 15 ve 20 AgNP içeren çözeltilerde 2, 4 ve 6 saat süreyle bekletilmiş ve 7 gün süreyle depolanmıştır. Tüm kalite parametreleri göz önüne alındığında %10 AgNP içeren çözeltide 4 saatlik bekletme süresinde en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu çözelti ile muamele edilen örneklerin hem duyuşsal genel kabul edilebilirlik puanı hem de kimyasal kompozisyonu ve teknolojik özellikleri uygun bulunmuştur. Çalışma sonunda AgNP çözeltilerinin et endüstrisinde kullanımının avantaj sağlayabileceği, bu yüzden geniş kapsamlı çalışmalar yapılması gerektiği bildirilmiştir (Wasiu Oluwatofarati ve ark., 2018).

Morsy ve ark. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, uçucu yağ ve AgNP içeren pullulan filmlerin *E. coli* O157:H7, *S. aureus*, *S. typhimurium* ve *L. monocytogenes*'e karşı antimikrobiyal etkisi incelenmiştir. Kekik ve biberiye uçucu yağları ve AgNP ile hazırlanan filmlerin incelenen tüm patojenlere karşı inhibisyon etkilerinin olduğu tespit edilmiştir. Taze ve tüketime hazır et ürünleri ile ilişkilendirilen bu patojenlerin gelişmesinin engellenmesi için hazırlanan film çözeltilerinin kullanım potansiyeline sahip olduğu ve filmlerin vakum paketlenmiş etlerde 4 °C'de depolamada kontrol örneği ile karşılaştırıldığında 3 haftalık raf ömrü artışı sağladığı bildirilmiştir.

Normal aerobik paketleme koşulları altında et ve et ürünlerinin raf ömrü bakteriyel gelişme nedeniyle sınırlı olmaktadır. Buzdolabı (3±1 °C) koşullarında depolanan kıyılmış sığır etlerinin raf ömrünü uzatmak için AgNP'lerin kullanılması konusunda yapılan başka bir çalışmada 2 tip paketleme işlemi uygulanmıştır. AgNP ilave edilmiş tabak ve geleneksel paketleme işlemi yapılan kıymalarda 14 günlük depolama süresince toplam bakteri, *E. coli* ve *S. aureus* sayısı belirlenmiştir. Her iki ambalajlama yönteminde de benzer kabul edilebilir değerler elde edilmesine rağmen AgNP ilaveli paketler ile ambalajlanan örneklerin raf ömrü daha uzun bulunmuştur. Ayrıca AgNP'nin antimikrobiyal etkisi ince kıyılmış etlerde, kalın kıyılmış etlere göre daha yüksek bulunmuştur. Kıyılmış etlerde kaliteyi geliştirmek ve geleneksel ambalajlamaya göre raf ömrünü uzatmak için AgNP ilavesinin etkili olduğu bildirilmiştir. Ayrıca nanoparçacık kullanımının vakum altında, modifiye atmosferde paketleme veya dondurma işlemi ile kombine edildiği zaman daha etkili olabileceği belirtilmiştir (Mahdi ve ark., 2012).

Kanatlı Etleri ve Ürünleri

Mikrobiyal bozulma, kanatlı etlerinin raf ömrünü sınırlayan önemli faktörlerden biridir. Bozulma, renk ve koku gibi duyuşsal özellikleri etkileyebilen biyokimyasal değişikliklere yol açmaktadır. Çok sayıda çalışma, bozulmaya neden olan mikroorganizmaların kanatlı etleri üzerindeki zararlı etkilerini bildirmiştir (Thames ve ark., 2022). Bu nedenle kanatlı etlerinde mikrobiyal üremenin önlenmesi veya geciktirilmesi raf ömrünün uzamasına önemli katkı sağlayabilir. Kanatlı etlerinde mikrobiyal bozulmanın AgNP kullanımı ile kontrol edilerek raf ömrünün uzatılması değişik araştırmacılar tarafından çalışılmış ve bu çalışmaların bir kısmında AgNP kullanımının olumlu etkisi belirlenirken, bazı çalışmalarda herhangi bir olumlu etki rapor edilmemiştir.

Khalaf ve ark. (2013) AgNP ve uçucu yağ içeren pullulan filmlerin antimikrobiyal aktivitelerinin kararlılığını ve hindi eti kalitesi üzerine etkilerini

araştırmışlardır. Bu amaçla biberiye uçucu yağı, kekik uçucu yağı, AgNP ve çinko oksit nanoparçacık ilaveli pullulan filmler hazırlamışlar ve bu filmlerle, *S. aureus* ve *L. monocytogenes* kültürleri ile aşılınmış yemeye hazır hindi eti dilimlerini kaplamışlardır. Ardından örnekleri vakumla paketlenip 4 °C'de 2 hafta süreyle depolamışlardır. Çalışma sonunda uçucu yağ ve nanoparçacık içeren pullulan filmlerle kaplanmış örneklerde 24 saat sonunda *L. monocytogenes* popülasyonunda yaklaşık 1 log azalma, *S. aureus* popülasyonunda ise yaklaşık 2-3 log azalma tespit etmişlerdir. Bu sonuçlardan hareketle nanoparçacık ve uçucu yağ ilave edilmiş pullulan filmlerin, gıda sistemlerinde güvenliği ve raf ömrünü artırmada yeni bir alternatif olarak önermişlerdir.

Benzer bir çalışmada, Morsy ve ark. (2014) kanatlı etlerinde gıda kaynaklı patojenleri kontrol etmek amacıyla uçucu yağ ve nanoparçacık ilaveli pullulan filmler kullanmışlardır. Araştırmacılar taze ve işlenmiş hindi etini, yüzeyde yaklaşık 6 log₁₀ kob/cm² olacak şekilde *S. aureus*, *L. monocytogenes*, *E. coli* O157:H7 ve *S. typhimurium* kültürleri ile aşılama yapmışlardır. Aşılama etleri kekik uçucu yağı, biberiye uçucu yağı, AgNP ve ZnO nanoparçacık içeren pullulan filmler ile kaplamışlar ve vakum paketlenerek 4 °C'de 3 hafta depolamışlardır. Depolama boyunca yapılan analizler doğrultusunda uçucu yağ ve nanoparçacık içeren filmlerin taze veya işlenmiş hindi etlerinde gıda kaynaklı patojenlerin gelişimini yavaşlattığını rapor etmişlerdir.

Bir diğer çalışmada, Panaea ve ark. (2014) farklı oranlarda (%5 ve %10) ZnO ve Ag içeren nanokompozit ambalajların tavuk göğüs eti kalitesine etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla tavuk göğüs etlerini MAP (O₂/CO₂/N₂ = %70/%20/%10) ile paketlenmişler ve 4 °C'de, günde 12 saat ışık (583 lux) altında 21 gün süreyle depolamışlardır. Ambalaja eklenen ZnO + Ag nanoparçacıklar, kontrol ambalajına göre daha düşük oksijen tüketimi ve daha düşük mikrobiyal sayı göstermiştir. Lipid oksidasyonu, paketleme türünden bağımsız olarak depolama süresiyle artmış, ancak nanoparçacıklı her iki paketleme türü de genellikle daha düşük lipid oksidasyon değerleri vermiştir. Duyusal özellikler ambalajdan çok az etkilenmiş ve et rengi veya görsel görünüm puanı açısından ambalaj türleri arasında herhangi bir farklılık görülmemiştir. Sonuç olarak, LDPE (düşük yoğunluklu polietilen) ambalaja ZnO + Ag nanoparçacıklarının eklenmesinin antimikrobiyal etkiye sahip olduğu ve migrasyon miktarlarının yasaların izin verdiği sınırlar içinde kaldığı bildirilmiştir.

AgNP/LDPE nanokompozit film ve modifiye atmosfer paketleme kombinasyonunun tavuk göğüs filetoalarının raf ömrü üzerine etkisini araştıran Azlin-Hasim ve ark. (2015), polimer ağırlığının %0,5 ve %1'i oranında AgNP içeren LDPE nanokompozit filmler ile sardıkları tavuk göğüs filetoalarını MAP ile paketlenip 4 °C'de depolamışlardır. Araştırmacılar depolama boyunca yaptıkları analiz sonuçlarına göre AgNP konsantrasyonundan bağımsız olarak Ag/LDPE nanokompozit filmlerin tavuk göğüs filetoalarının raf ömrünü uzattığını ve kontrol filmlerine kıyasla önemli ölçüde oksidatif stabiliteyi artırdığını gözlemlemişlerdir. Bu sonuçlardan hareketle AgNP içeren LDPE nanokompozit filmlerin antimikrobiyal paketleme materyali olarak kullanım potansiyeline sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Aynı araştırmacılar (Azlin-Hasim ve ark., 2016) bir sonraki çalışmalarında, tavuk göğüs filetolarının raf ömrünü uzatmak amacıyla AgNP/PVC (polivinil klorür) nanokompozit filmlerin kullanım potansiyelini araştırmışlardır. Araştırmacılar PVC nanokompozit filmlerin hazırlanmasında %0,5 AgNP kullanmışlar ve AgNP/PVC filmler ile sardıkları tavuk göğüs filetolarını MAP ile paketlenmiş ve 4°C'de 9 gün süreyle depolamışlardır. Depolama süresince PVC kontrol filmleri ile sarılmış filetoların toplam mikroorganizma sayısının daha yüksek olduğunu ve depolamanın 5. gününde 6 log kob/g üst sınırına ulaştığını, AgNP/PVC nanokompozit filmler ile sarılmış tavuk göğüs filetolarının ise depolamanın 6. gününde sınır değere ulaştığını tespit etmişlerdir. AgNP/PVC nanokompozit filmlerle sarılmış tavuk göğüs filetolarında depolamanın 6. gününe kadar *Pseudomonas* spp.'nin gelişiminin daha yavaş olduğunu, kullanılan filmde bağımsız olarak 9 günlük depolama sonunda LAB sayısının 6 log kob/g'ı geçmediğini saptamışlardır. Araştırmacılar AgNP içeren PVC nanokompozit filmlerin tavuk göğüs filetolarının raf ömrünü önemli ölçüde uzattığını ve lipid oksidasyonunu azalttığını rapor etmişlerdir.

Gallocchio ve ark. (2016), nano-gümüş gıda ambalajlarından tavuk etine gümüş salınımı ve bu ambalajların gıda bozulmasına neden olan bakterilerin çoğalmasını sınırlamaya olan katkısını değerlendirmek amacıyla yaptıkları çalışmada, tavuk köftelerini nanoparçacık içeren ve içermeyen ticari torbalarda 5, 12 ve -18°C'de depolamışlardır. Avrupa Birliği mevzuatına uygun koşullar altında gerçekleştirmiş oldukları analizler sonucunda tavuk köftelerinde gümüş bulunmadığını tespit etmişlerdir. Yaptıkları mikrobiyolojik testler (toplam mikroorganizma, *Pseudomonas* spp. ve *Enterobacteriaceae*), sonucunda da AgNP içeren plastik torbalarda veya kontrol torbalarında depolanan köfteler arasında test edilen bakteri sayıları açısından önemli bir fark olmadığını ifade etmişlerdir.

Deus ve ark. (2017), nano gümüş içeren film ile kaplamanın hindi etinin kalitesi üzerindeki etkisini, vakum ve modifiye atmosferde paketlenme ile 12 günlük depolama süresince ve ayrıca *E. coli* ile aşılandıktan sonra değerlendirmişler ve sonuç olarak nano-gümüş kaplamanın hindi etinin kalitesi ve mikrobiyolojik parametreleri üzerinde herhangi bir olumlu etkisinin olmadığını rapor etmişlerdir.

Marchiore ve ark. (2017), AgNP içeren yenilebilir kaplamalardan sosislere Ag salınımını değerlendirdikleri çalışmada, yeşil yöntem ile sentezledikleri AgNP'leri tavuk sosislerine yenilebilir kaplama olarak uygulayıp vakum pakettikten sonra 10±2°C'de depolamışlardır. AgNP'lerin sosislere uygulanması sonucunda laktik asit bakteri sayısı azalmış, ancak oksidasyon hızlanmıştır. Tekstür Profil Analiz (TPA) parametreleri (sertlik, çignenebilirlik, yapışkanlık ve esneklik), 15 günlük depolamadan sonra önemli ölçüde değişmiştir. Sosislerin hazırlama ve pişirme aşamalarında yapılacak basit uygulamalarla AgNP konsantrasyonunun nanogram seviyelerine (5,3 ng AgNPs/g sosis) düşürülebileceği belirlenmiştir. Ayrıca, sosis yüzeyinden iç kısma kayda değer bir AgNP göçü tespit edilmemiştir.

Yapılan bir çalışmada tarçın uçucu yağı (TUY) ve gümüş-bakır nanoparçacıklar ile harmanlanıp, basınçla kalıplanmış biyoaktif lineer düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) filmler tavuk eti paketlenmesinde kullanılmıştır. Örnekler 4 °C'de 21 gün depolanmış ve LLDPE/%4 Ag-Cu/%50 TUY ile paketlenmiş tavuk örneklerinde kontamine edilen *C. jejuni* sayıları 7. günde, *S. typhimurium* sayıları ise 14. günde tespit seviyesinin altına inmiştir (Ahmed ve ark., 2018).

Biswas ve ark. (2019), gıda paketlenme uygulaması için 3D baskı tekniği kullanarak nano silika-karbon-gümüş (%0,5, 1,0 ve 1,5) üçlü hibrit kaynaklı antimikrobiyal kompozit filmler üretmişlerdir. AgNP'leri, AgNO₃ kullanarak pirinç kabuğu pirolizinden elde edilen silika-karbon hibriti varlığında tek adımlı bilyalı öğütme yoluyla sentezlemişlerdir. Üretilen nano silika-karbon-gümüş nanoparçacıkların 10 ila 100 nm arasında olduğunu, nanoparçacık ilavesinin filmlerin termal stabilitesini iyileştirdiğini ve polimer filmin mukavemetinde orta derecede artış sağladığını bildirmişlerdir. Ayrıca, antimikrobiyal çalışma sonucunda filmlerin bakterisidal etkiden ziyade, bakteriyostatik etki gösterdiğini rapor etmişlerdir. Araştırmacılar gümüş salınımını test etmek amacıyla tavuk budu örneklerini %0,5 ve 1,5 gümüş içeren filmler ile paketlenmiş ve 4 °C'de depolamışlar ve depolama sonunda tavuk budu örneklerine gümüş migrasyonu olmadığını bildirmişlerdir.

Nwabor ve ark. (2020), okaliptüs yaprağı ekstraktı kullanarak sentezledikleri AgNP'ler ile polivinil alkol (PVA)-kitosan (CH) nanokompozit filmler üretmişler ve bu filmlerin tavuk sosisinin raf ömrü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. 20 °C'de depolanan örneklerin 3., 7. ve 15. günlerinde yapılan analizlerde filmlerin (1:1 ve 1.5:0.5 PVA-CH/AgNP), depolama süresince raf ömrünü uzatma yönünde olumlu etkiler gösterdiğini ifade etmişlerdir. 15 günlük depolama sonunda kontrol ile karşılaştırıldığında 1:1 PVA-CH/AgNP film ile kaplanan örneklerde herhangi bir bozulma belirtisi tespit etmemişlerdir. Bununla birlikte 7. ve 15. günlerde kaplanmamış ve AgNP içermeyen PVA-CH filmler ile kaplanmış kontrol örneklerinde erken bozulma belirtileri gözlemlenmiştir. Sonuçlar doğrultusunda AgNP içeren filmlerin, gıda ürünlerinin raf ömrünün uzatılması için aktif paketlenme malzemesi olarak kullanılabilirliğini belirtmişlerdir.

İturin A kullanarak sentezledikleri AgNP'lerin gıda paketlerinin antifungal ve antibakteriyel aktivitelerinin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğini araştıran Zhao ve ark. (2021), iturin-AgNP ve polivinil pirolidon (PVP-AgNP) ile stabilize ettikleri AgNP'lerden hazırladıkları kâğıt torbaları tavuk etinin paketlenmesinde kullanmışlardır. 25 °C'de 2 gün inkübasyondan sonra toplam bakteri sayısının kontrolde 10⁹ kob/g'dan, iturin-AgNP torbalarda paketlenenlerde 10⁷ kob/g'a ve PVP-AgNP torbalarda paketlenenlerde 10⁸ kob/g'a düştüğünü tespit etmişlerdir. Ayrıca iturin-AgNP ve PVP-AgNP'lerin inhibitör etkisini belirlemek amacıyla, tavuk etine inoküle ettikleri *S. aureus* ATCC29213, *Salmonella typhimurium* ATCC50551 ve *E. coli* ATCC25922 sayılarını belirlemişler ve bakteriyel büyümenin PVP-AgNP'lere kıyasla, iturin-AgNP'ler tarafından daha büyük ölçüde inhibe edildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, iturin-AgNP içeren kâğıt paketlerden tavuk etine Ag geçişi olmadığını rapor etmişlerdir.

Yapılan bir çalışmada nanoparçacık malzeme ilave edilmiş yenilebilir filmlerle paketlemenin tavuk fileto etinin raf ömrü ve kalitesine etkisi incelenmiştir. Filmler AgNP ve titanyum oksit (TiO₂) nanoparçacıklar ile güçlendirilmiş hidroksipropil metilselüloz (HPMC) ile hazırlanmıştır. Tüm fileto örnekleri 10 °C ve %24 nem içeren soğuk depolama koşulları altında saklanmış ve genel kaliteleri 0, 3, 6 ve 9 günlük depolama süresince mikrobiyolojik ve fizikokimyasal analizlerle değerlendirilmiştir. Sonuçlar, AgNP ve TiO₂NP'ler ile güçlendirilmiş HPMC filmlerin tavuk filetolarında *S. typhimurium*, *E. coli*, *B. cereus* ve *S. aureus* gibi gıda kaynaklı patojenlere karşı aktif olduğunu ve AgNP'lerle güçlendirilmiş HPMC filmlerin, *S. typhimurium*, *E. coli*, *S. aureus* ve *B. cereus*'un mikrobiyal büyümesini sırasıyla yaklaşık 1,7, 1,6, 1,9 ve 2,2 kob/cm² azalttığını göstermiştir. Nanoparçacık içeren HPMC filmlerin, mikrobiyolojik yükleri azaltarak tavuk filetolarının raf ömrünü artırma potansiyeline sahip oldukları belirtilmiştir (Abo-Gabal ve ark., 2022).

Khan ve ark. (2022), kurkumin ve pullulan kaynaklı AgNP içeren pullulan aktif paketlemenin piliç etinin kalitesi ve raf ömrü üzerine etkisini 4±1 °C'de 14 günlük soğuk depolama süresince çalışmışlardır. Çalışma bulgularına göre kurkumin kaynaklı AgNP içeren pullulan film ile paketlenen örneklerin 0. (1,32 mg MDA/kg), 7. (3,04 mg MDA/kg) ve 14. günde (5,53 mg MDA/kg) en düşük malondialdehit (MDA) konsantrasyonuna sahip olduğu ve oksidatif stabilitelelerinin daha iyi korunduğu belirlenmiştir. Kontrol grubu piliçlerin, kurkumin ve pullulan kaynaklı AgNP içeren pullulan filmler ile kaplanan piliçlerden daha yüksek pH, damlama kaybı ve pişirme kaybı sergilediği gözlemlenmiş ve sonuç olarak kurkumin ve pullulan kaynaklı AgNP içeren pullulan ambalajların piliç etlerinin kalitesini ve raf ömrünü uzatmak için bir alternatif olarak değerlendirilebileceği rapor edilmiştir.

Gümüş-çinko kristaller içeren poliamid kompozit kılıfların sığır ve tavuk sosislerinin kalitesine etkisinin incelendiği çalışmada (Patino ve ark. (2022), gümüş-çinko kristal ilavesinin sosislerin pH, a_w, renk, tekstür ve duyuşal özellikleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı, ancak kontrole kıyasla daha düşük TBARS sayısı sergiledikleri rapor edilmiştir. Mikrobiyolojik analiz sonuçlarına göre gümüş-çinko uygulaması mezofilik ve LAB aerobların çoğalmasını yavaşlatmış ancak depolama sırasında raf ömrünü etkilememiştir. Araştırmacılar gümüş-çinko kristali içeren poliamid kılıfların kullanılmasının, tavuk sosisinin herhangi bir depolama sıcaklığında dayanıklılığını etkilemediğini belirlemişlerdir.

Su Ürünleri

Su ürünleri bakteriyel ve enzimatik aktivite nedeniyle kısa raf ömrüne sahiptir. Bu nedenle bakteriyel ve enzimatik bozulmanın önlenmesi veya yavaşlatıldığı uygun koşullarda tutulmaları oldukça önemlidir. AgNP'ler bakterilerin bozulma aktivitelelerini engellemede kullanılabilirlerine rağmen, su ürünlerinde mikrobiyal bozulmanın AgNP kullanımı ile kontrol edilerek raf ömrünün uzatılması çok az sayıda araştırmaya konu olmuştur.

Bu araştırmalardan birinde, Daniel ve ark. (2016), balıkların muhafazası amacıyla AgNP içeren nano buz

kullanımını araştırmışlardır. Bu amaçla, muz midrib (yaprak orta damarı) ekstraktı kullanarak sentezledikleri 20-40 nm boyut aralığındaki AgNP'ler ile nano buz hazırlamışlar ve bunu balıkların muhafazasında kullanmışlardır. Araştırmacılar nano buzda bulunan AgNP'lerin *Mugil cephalus* balığı yüzeyindeki patojen mikroorganizma yükünü azalttığını ve bu sonuçtan hareketle biyosentezlenmiş AgNP'lerle birleştirilmiş antimikrobiyal nano buzun balıklar için nanokoruyucu olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Bir diğer çalışmada, *Satureja rechingeri* ekstraktı kullanılarak sentezlenmiş AgNP'lerden polivinil alkol ile nano gümüş paketleme filmleri (S-AgNP/PVA) hazırlanmış ve bu filmlerin soğuk koşullarda 14 gün süreyle muhafaza edilen *Oncorhynchus mykiss* filetolarının tazeliği üzerine etkisi değerlendirilmiştir. S-AgNP'lerin UV-Vis ve TEM sonuçlarından, S-AgNP'lerin çapının çoğunlukla 55 nm'den daha küçük olduğu ve hazırlanan filmlerden AgNP/Ult.PVA (Ultrason yöntemi) ve S-AgNP/Pho.PVA(Fotokimyasal yöntem)'nin balıkların soğukta muhafazasında bozulmayı 7 güne kadar uzatmak için kullanılabileceği belirlenmiştir (Kavakebi ve ark., 2021).

Gümüş Nanoparçacıkların Toksikolojik Etkileri

AgNP esaslı ambalaj malzemeleri, gıda maddelerinin raf ömrünü, kalitesini ve güvenliğini iyileştirme konusunda bazı önemli katkılar sağlasa da toksikolojik ve çevresel etkilerinin tam olarak ortaya konulamaması tüketicilerde bazı endişeler oluşturmaktadır (Simbine ve ark., 2019; Lamri ve ark., 2021). Bu parçacıkların paketleme sonrası depolama ve taşıma aşamalarında ambalajdan gıdaya göç etme olasılığının bulunması bu endişeleri artırmaktadır (Panea ve ark., 2014; Simbine ve ark., 2019; Ahari ve Lahijani, 2021) (Şekil 4). Diğer bir potansiyel endişe, nanoparçacıkların etin kalitesini, özellikle rengini ve yağın oksidasyonunu etkileyerek tat sorununa neden olabilmeleridir (Simbine ve ark., 2014). Marchiore ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada, 15 günlük depolamadan sonra AgNP ile kaplanmış tavuk sosislerinde kontrol örneklerine göre daha yüksek lipid oksidasyonu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, yeni nano gıda ambalajları tasarlanırken migrasyon testlerinin yapılması gerekmektedir. Avrupa mevzuatları, gıda ambalajlarının üretiminde kullanılabilecek bileşiklerin yanı sıra migrasyon çalışmalarının yapılmasında gereken koşulları düzenlemekte (Panea ve ark., 2014) ve gıda ambalajlarından toplam Ag⁺ iyonları migrasyonunu 10 mg/kg ile sınırlandırmaktadır (Simbine ve ark., 2019). Buna karşılık EFSA bu konuda daha hassas davranmakta ve Ag⁺ iyonlarının ambalaj malzemesinden gıdaya migrasyonu 0,05 mg/kg, suya migrasyonunu ise 0,05 mg/L ile sınırlandırmaktadır (Carbone ve ark., 2016; Ahmad ve ark., 2021). Migrasyon hızı ve miktarı süre, sıcaklık, gıda çeşidi, film/kaplama tipi, pH değeri ve film kalınlığı gibi birçok faktör tarafından etkilenmektedir (Ahari ve Lahijani, 2021).

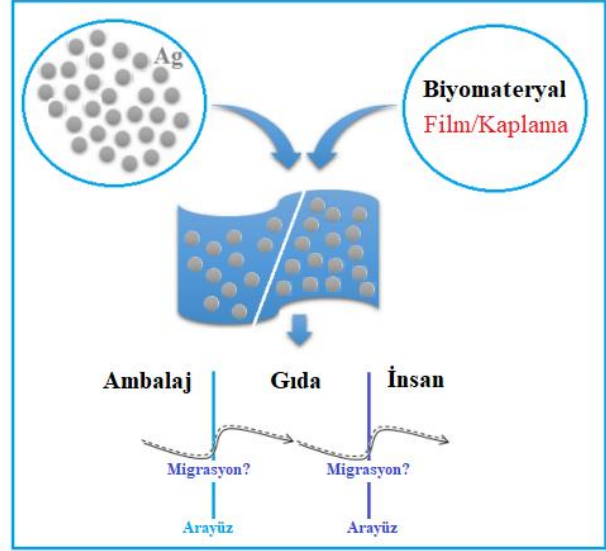
AgNP'lerin sentezi ve paketleme sistemlerine uygulanmaları konusunda çok sayıda çalışma yapılmasına rağmen, gıdalara migrasyonu konusunda nispeten daha az çalışma bulunmaktadır. Birçok araştırmacı AgNP içeren paketleme materyali ile paketlenmiş gıdalarda

nanoparçacık göçüne dair önemli bir kanıt bulamazken (Galocchio ve ark., 2016; Marchiore ve ark., 2017; Biswas ve ark., 2019), diğer bazı araştırmacılar migrasyon olduğu yönünde sonuç bildirmişlerdir. Bu araştırmacılar Cushen ve ark. (2013), polivinil klorür (PVC) nanokompozit ambalajdan tavuk etine Ag⁺ iyonları migrasyonunun 0.03-8.40 mg/kg düzeyinde olduğunu ve bu durumun Avrupa mevzuatlarında yer alan göç ve toksisite limitlerinin altında kaldığını, buna karşılık parçacıkların nano ölçekteki potansiyel zararlı etkileri hakkında hala önemli bir belirsizliğin olduğunu bildirmişlerdir. Li ve ark. (2018), AgNP içeren polilaktik asit film matrisinden Yunan süzme peynirine Ag⁺ iyonları migrasyonunun depolama süresine bağlı olarak arttığını ve 25 günlük depolama süresi sonunda 135,58 µg/kg seviyesine ulaştığını, ancak bu miktarın Avrupa mevzuatları tarafından belirlenen maksimum migrasyon limitinden daha düşük olduğunu rapor etmişlerdir. Bir başka çalışmada, Ag⁺ iyonları migrasyonu polipropilen ve poliolefin içeren ambalajlarda değerlendirilmiş ve migrasyon düzeyinin Avrupa mevzuatları sınırları içinde olduğu bildirilmiştir (Echegoyen ve Nerin 2013).

Nanoparçacıkların toksisitesi; parçacık türü ve büyüklüğü, konsantrasyonu, maruz kalma süresi ve bireyin duyarlılığı gibi değişik faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Genel olarak, proteinler, lipidler, nişasta ve kitosan gibi organik nanoparçacıkların, insan gastrointestinal sisteminde tamamen sindirildikleri ve biyolojik olarak kalıcı olmadıkları için toksik olmadıkları düşünülmektedir. Bununla birlikte geniş yüzey alanı/hacim oranı, nanoparçacıkların sindirimini, biyoyararlanımını ve beslenme özelliklerini etkileyebilmektedir (Ashfaq ve ark., 2022).

Gümüşün hayvanlarda biyolojik bir rolü yoktur ve gıdalar yoluyla alımı 20 ila 80 µg/gün arasında değişmektedir (Ahmad ve ark., 2021). Metaller arasında hayvan hücreleri için en düşük toksisiteye sahiptir ve 10 mg/L'den daha yüksek konsantrasyonlarda toksiktir (Marchiore ve ark., 2017). AgNP'lerin mide-bağırsak kanalının mukus tabakası üzerinde etki gösterdiği ve kan dolaşımına geçebildiği ve bunun sonucunda diğer vücut organlarına ulaşabildiği bildirilmiştir. Gastrointestinal sisteme ek olarak akciğerler, burun mukozası, deri epitel ve konjonktiva yoluyla da alınabilmektedir (Ahmad ve ark., 2021). Vücuda alındıktan sonra karaciğer, böbrekler, testisler ve beyin dahil olmak üzere çeşitli organlarda birikebilir (Simbine ve ark., 2019; Ahmad ve ark., 2021; Ashfaq ve ark., 2022). Garcia ve ark. (2016), 50, 100 ve 200 mg/kg/gün dozlarında oral yolla AgNP maruziyetinin sıçanların farklı dokularında gümüş birikmesine yol açtığını göstermişlerdir. Siqueira ve ark. (2013) farelerde AgNP'lerin akut oral toksisitesini değerlendirdikleri çalışmada, 1 mg/L gümüş konsantrasyonunun karaciğer hücrelerinde dejenerasyona yol açtığını gözlemlemişlerdir. Toksikite durumu, maruz kalma seviyesine ve diğer nanoparçacıklarla olan etkileşime bağlıdır (Lamri ve ark., 2021). Yüksek dozlarda AgNP'ler hepatotoksik, nörotoksik ve genotoksik etkilere neden olabilir. Bununla birlikte, bu tür toksik seviyelerin aktif paketlerden gıdalara geçiş olasılığı oldukça düşüktür (Simbine ve ark., 2019; Ahmad ve ark., 2021; Ashfaq ve ark., 2022). Ancak yine de AgNP'lerin ambalaj filmlerinden gıda maddelerine geçişinin neden olduğu toksisite konusunda büyük

endişeler bulunmaktadır. Ayrıca, yeşil yöntem ile sentezlenen AgNP'lerin diğer yöntemlerle üretilenlerden daha az toksisiteye sahip olduğu bilinmektedir. Bu nedenlerle gelecekteki çalışmalarda yeşil yolla sentezlenen AgNP'lere ağırlık verilmesi ve gıda paketleme filmlerine ilave edilecek AgNP'lerin güvenli dozajının değerlendirilmesi faydalı olacaktır.



Şekil 4. Gümüş nanoparçacıkların ambalajdan gıdaya ve gıdadan insan organlarına migrasyonu (Ahari ve Lahijani, 2021)

Figure 4. Migration of silver nanoparticles from packaging to food and from food to human organs (Ahari and Lahijani, 2021)

Sonuç

Nanoteknolojinin gıda endüstrisinde uygulanması konusunda yapılan çalışmalar umut verici yönde ilerlemektedir. Son yıllarda AgNP'ler katılarak üretilen antimikrobiyal ambalaj malzemelerinin gıda uygulamalarında kullanımı önem kazanmıştır. AgNP'lerin gıda ambalaj malzemelerinde kullanılması, başta gıda maddelerinin raf ömrünü uzatması ve gıda kaynaklı patojenlerin yayılmasını önlemesi dahil olmak üzere birçok fayda sağlamaktadır. Nanoteknoloji sayesinde tüketicilerin kaliteli ürünler tüketmesi yanında katkı maddelerinin zararlı etkilerinden de korunulabilmektedir. Bu nedenle AgNP'lerin gıda endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmasıyla hem gıda güvenliğinin artırılması hem de gıda israfının azaltılması mümkün olabilecektir. AgNP'lerin pek çok avantaja sahip olmasına rağmen kullanımı hakkında bazı endişeler de bulunmaktadır. Bu endişeler, gıda ile temas eden malzemelerdeki AgNP'lerden Ag⁺ iyonlarının salınma ve ambalaj malzemelerinden gıda maddelerine geçme olasılığının bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, nanoparçacıkların gıda ile doğrudan temas eden gıda ambalaj malzemelerinde kullanılması durumunda salınan Ag⁺ iyonları konsantrasyonu ve toksisitenin araştırılması, izin verilen limitlerin ayrıntılı olarak değerlendirilmesi, standart güvenlik yönergelerinin hazırlanması ve düzenlemelerin uygulanması gerekmektedir.

Kaynaklar

- Abbasi M, Ahari H, Tabari M. 2020. Comparative study of polyethylene and polyamide packaging containing silver nanoparticles in reduction of meat products (mince meat) microbial load. *Journal of Food Biosciences and Technology*, 10(1): 87-102.
- Abdulazeem L, Alasadi YF, Al-Mawlah YH, Hadi AM. 2021. A Mini-review: Silver Nanoparticles (AgNPs) as Antimicrobial in Magical Socks. *Journal of Pharmaceutical Research International*, 33(51A): 23-32. doi: 10.9734/JPRI/2021/v33i51A33463
- Abo-Gabal BE, Bahnasawy AH, Khater EG. 2022. Effect of edible films reinforced with nanoparticles on shelf-life and quality of chicken fillets meat during storage. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 39(2): 205-220. doi: 10.21608/mjae.2022.111826.1060
- Abreu AS, Oliveira M, de Sa A, Rodrigues RM, Cerqueira MA, Vicente AA, Machado AV. 2015. Antimicrobial nanostructured starch based films for packaging. *Carbohydrate Polymers*, 129: 127-134. doi: 10.1016/j.carbpol.2015.04.021
- Ahari H, Lahijani LK. 2021. Migration of silver and copper nanoparticles from food coating. *Coatings*, 11: 380. doi: 10.3390/coatings11040380
- Ahmad SS, Yousuf O, Islam RU, Younis K. 2021. Silver nanoparticles as an active packaging ingredient and its toxicity. *Packaging Technology and Science*, 34: 653-663. doi: 10.1002/pts.2603
- Ahmed J, Mulla M, Arfat YA, Bher A, Jacob H, Auras R. 2018. Compression molded LLDPE films loaded with bimetallic (Ag-Cu) nanoparticles and cinnamon essential oil for chicken meat packaging applications. *LWT-Food Science and Technology*, 93: 329-338. Doi: 10.1016/j.lwt.2018.03.051
- Ahmed T, Ogulata RT. 2021. A review on silver nanoparticles - green synthesis, antimicrobial action and application in textiles. *Journal of Natural Fibers*, 19(14): 8463-8484. doi: 10.1080/15440478.2021.1964135
- Akhila V, Badwaik LS. 2022. Recent advancement in improvement of properties of polysaccharides and proteins based packaging film with added nanoparticles: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 203: 515-525. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.01.181
- Akintelu SA, Bo Y, Foloruso AS. 2020. A review on synthesis, optimization, mechanism, characterization, and antibacterial application of silver nanoparticles synthesized from plants. *Journal of Chemistry*, 2020: 3189043. doi: 10.1155/2020/3189043
- Almatroudi A. 2020. Silver nanoparticles: synthesis, characterisation and biomedical applications. *Open Life Sciences*, 15(1): 819-839. doi: 10.1515/biol-2020-0094
- An L, Nguyen H. 2022. Market research and fabrication of low-cost disinfectant spray for pets using silver nanoparticles. *VNUHCM Journal of Science and Technology Development*, 25(1): 2239-2251. doi: 10.32508/stdj.v25i1.3509
- Angelina JTT, Narayani R, Ganesan S, Panicker TMR, Jagadeesan K. 2019. In vitro haemocompatibility and cytocompatibility evaluation of silver thin film-deposited heart valve prosthesis material. *Materials Technology*, 34(8): 471-479. doi: 10.1080/10667857.2019.1578465
- Ashfaq A, Khurshed N, Fatima S, Anjum Z, Younis K. 2022. Application of nanotechnology in food packaging: Pros and cons. *Journal of Agriculture and Food Research*, 7: 100270. doi: 10.1016/j.jafr.2022.100270
- Azlin-Hasim S, Cruz-Romero MC, Morris MA, Cummins E, Kerry JP. 2015. Effects of a combination of antimicrobial silver low density polyethylene nanocomposite films and modified atmosphere packaging on the shelf life of chicken breast fillets. *Food Packaging and Shelf Life*, 4: 26-35. doi: 10.1016/j.fpsl.2015.03.003
- Azlin-Hasim S, Cruz-Romero MC, Morris MA, Padmanabhan SC, Cummins E, Kerry JP. 2016. The potential application of antimicrobial silver polyvinyl chloride nanocomposite films to extend the shelf-life of chicken breast fillets. *Food and Bioprocess Technology*, 9: 1661-1673. doi: 10.1007/s11947-016-1745-7
- Badawy ME, Lotfy TM, Shawir S. 2019. Preparation and antibacterial activity of chitosan-silver nanoparticles for application in preservation of minced meat. *Bulletin of the National Research Centre*, 4: 83. doi: 10.1186/s42269-019-0124-8
- Bandekar SS, Kerur SS, Kore SK, Hegde PG. 2020. Synthesis and antimicrobial activity of plant based silver nanoparticles-A review. *Bioscience Biotechnology Research Communications*, 13(13): 122-130. doi: 10.21786/bbrc/13.13/17
- Bapat MS, Singh H, Shukla SK, Singh PP, Vo DN, Yadav A, Goyal A, Sharma A, Kumar D. 2022. Evaluating green silver nanoparticles as prospective biopesticides: An environmental standpoint. *Chemosphere*, 286(Pt 2): 131761. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131761
- Barani H, Mahltig B. 2022. Microwave-assisted synthesis of silver nanoparticles: Effect of reaction temperature and precursor concentration on fluorescent property. *Journal of Cluster Science*, 33(1): 101-111. doi: 10.1007/s10876-020-01945-x
- Bergal A, Matar GH, Andaç M. 2022. Olive and green tea leaf extracts mediated green synthesis of silver nanoparticles (AgNPs): comparison investigation on characterizations and antibacterial activity. *BioNanoScience*. 12: 307-321. doi: 10.1007/s12668-022-00958-2
- Biswas M C, Tiimob BJ, Abdela W, Jeelani S, Rangari VK. 2019. Nano silica-carbon-silver ternary hybrid induced antimicrobial composite films for food packaging application. *Food Packaging and Shelf Life*, 19: 104-113. doi: 10.1016/j.fpsl.2018.12.003
- Carbone M, Donia DT, Sabbatella G, Antiochia R. 2016. Silver nanoparticles in polymeric matrices for fresh food packaging. *Journal of King Saud University-Science*, 28(4): 273-279. doi: 10.1016/j.jksus.2016.05.004
- Casagrande MG, de Lima R. 2019. Synthesis of silver nanoparticles mediated by fungi: A review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7: 287. doi: 10.3389/fbioe.2019.00287
- Chakravarty A, Ahmad I, Singh P, Ud Din Sheikh M, Aalam G, Sagadevan S, Ikram S. (2022). Green synthesis of silver nanoparticles using fruits extracts of *Syzygium cumini* and their bioactivity. *Chemical Physics Letters*, 795: 139493. doi: 10.1016/j.cplett.2022.139493
- Chaudhary R, Nawa, K, Khan AK, Hano C, Abbasi BH, Anjum S. 2020. An overview of the algae-mediated biosynthesis of nanoparticles and their biomedical applications. *Biomolecules*, 10(11): 1498. doi: 10.3390/biom10111498
- Crisan CM, Mocan T, Manolea M, Lasca LI, Tabaran FA, Mocan L. 2021. Review on silver nanoparticles as a novel class of antibacterial solutions. *Applied Sciences-Basel*, 11(3): 1120. doi: 10.3390/app11031120
- Cushen M, Kerry J, Morris M, Cruz-Romero M, Cummins E. 2013. Migration and exposure assessment of silver from a PVC nanocomposite. *Food Chemistry*, 139: 389-397. doi: 10.1016/j.foodchem.2013.01.045
- Daniel SK, Sureshkumar V, Sivakumar M. 2016. Nano ice based on silver nanoparticles for fish preservation. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 4(5): 162-167.
- Dash KK, Deka P, Bangar SP, Chaudhary V, Trif M, Rusu A. 2022. Applications of inorganic nanoparticles in food packaging: A comprehensive review. *Polymers*, 14(3): 521. doi: 10.3390/polym14030521

- De Silva C, Nawawi NM, Abd Karim MM, Abd Gani S, Masarudin MJ, Gunasekaran B, Ahmad SA. 2021. The mechanistic action of biosynthesised silver nanoparticles and its application in aquaculture and livestock industries. *Animals*, 11: 2097. doi: 10.3390/ani11072097
- Deus D, Kehrenberg C, Schaudien D, Klein G, Krischek C. 2017. Effect of a nano-silver coating on the quality of fresh turkey meat during storage after modified atmosphere or vacuum packaging. *Poultry Science*, 96(2): 449-457. doi: 10.3382/ps/pew308
- Dutta T, Chowdhury SK, Ghosh NN, Chattopadhyay AP, Das M, Mandal V. 2022. Green synthesis of antimicrobial silver nanoparticles using fruit extract of *Glycosmis pentaphylla* and its theoretical explanations. *Journal of Molecular Structure*, 1247: 131361. doi: 10.1016/j.molstruc.2021.131361
- Echegoyen Y, Nerin C. 2013. Nanoparticle release from nano-silver antimicrobial food containers. *Food and Chemical Toxicology*, 62: 16-22. doi: 10.1016/j.fct.2013.08.014
- Ediyilyam S, George B, Shankar SS, Dennis TT, Waclawek S, Cernik M, Padil VVT. 2021. Chitosan/gelatin/silver nanoparticles composites films for biodegradable food packaging applications. *Polymers (Basel)*, 13(11): 1680. doi: 10.3390/polym13111680
- El-Refai AA, Hassan AM, Nagy K, Rabie MM. 2017. Antimicrobial effect for both of carboxy methyl cellulose and chitosan treated with ferulic acid or nanosilver particles as edible coatings used for some refrigerated beef samples. *Journal of Food and Dairy Sciences*, 8(2): 87-91. doi: 10.21608/jfds.2017.37128
- Fayaz AM, Balaji K, Girilal M, Kalaichelvan PT, Venkatesan R. 2009. Mycobased synthesis of silver nanoparticles and their incorporation into sodium alginate films for vegetable and fruit preservation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(14): 6246-6252. doi: 10.1021/jf900337h
- Fernandez CC, Sokolonski AR, Fonseca MS, Stanisic D, Araujo DB, Azevedo V, Portela RD, Tasic L. 2021. Applications of silver nanoparticles in dentistry: Advances and technological innovation. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(5): 2485. doi: 10.3390/ijms22052485
- Gallochio F, Cibir V, Biancotto G, Roccato A, Muzzolon O, Carmen L, Simone B, Manodori L, Fabrizi A, Patuzzi I, Ricci A. 2016. Testing nano-silver food packaging to evaluate silver migration and food spoilage bacteria on chicken meat. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 33(6): 1063-1071. doi: 10.1080/19440049.2016.1179794
- Garcia T, Lafuente D, Blanco J, Sánchez DJ, Sirvent JJ, Domingo JL, Gómez M. 2016. Oral subchronic exposure to silver nanoparticles in rats. *Food and Chemical Toxicology*, 92, 177-187. doi: 10.1016/j.fct.2016.04.010
- Garg D, Sarkar A, Chand P, Bansal P, Gola D, Sharma S, Khantwal S, Surabhi Mehrotra R, Chauhan N, Bharti RK. 2020. Synthesis of silver nanoparticles utilizing various biological systems: Mechanisms and applications-a review. *Progress in Biomaterials*, 9(3): 81-95. doi: 10.1007/s40204-020-00135-2
- Gaviria J, Alcudia A, Begines B, Beltrán AM, Villarraga J, Moriche R, Rodríguez-Ortiz JA, Torres Y. 2021. Synthesis and deposition of silver nanoparticles on porous titanium substrates for biomedical applications. *Surface and Coatings Technology*, 406: 126667. doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.126667
- Ghetas HA, Abdel-Razek N, Shakweer MS, Abotaleb MM, Ahamad Paray B, Ali S, Eldessouki EA, Dawood MAO, Khalil RH. 2022. Antimicrobial activity of chemically and biologically synthesized silver nanoparticles against some fish pathogens. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(3): 1298-1305. doi: 10.1016/j.sjbs.2021.11.015
- Gudikandula K, Maringanti SC. 2016. Synthesis of silver nanoparticles by chemical and biological methods and their antimicrobial properties. *Journal of Experimental Nanoscience*, 11(9): 714-721. doi:10.1080/17458080.2016.1139196
- Hong SI, Cho Y, Rhim JW. 2021. Effect of agar/AgNP composite film packaging on refrigerated beef loin quality. *Membranes*, 11(10): 750. doi: 10.3390/membranes11100750
- Huang S, Hong X, Zhao M, Liu N, Liu H, Zhao J, Shao L, Xue W, Zhang H, Zhu P, Guo R. 2022. Nanocomposite hydrogels for biomedical applications. *Bioengineering & Translational Medicine*, 7(3): e10315. doi: 10.1016/j.jcis.2021.10.131
- Ijaz M, Zafar M, Iqbal T. 2021. Green synthesis of silver nanoparticles by using various extracts: A review. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 51(5): 744-755. doi: 10.1080/24701556.2020.1808680
- Ijaz I, Bukhari A, Gilani E, Nazir A, Zain H, Saeed R, Hussain S, Hussain T, Bukhari A, Naseer Y, Aftab R. 2022. Green synthesis of silver nanoparticles using different plants parts and biological organisms, characterization and antibacterial activity. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 18: 100704. doi: 10.1016/j.enmm.2022.100704
- Islam MA, Jacob MV, Antunes E. 2021. A critical review on silver nanoparticles: From synthesis and applications to its mitigation through low-cost adsorption by biochar. *Journal of Environmental Management*, 281: 111918. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111918
- Jain N, Jain P, Rajput D, Patil U. 2021. Green synthesized plant-based silver nanoparticles: therapeutic prospective for anticancer and antiviral activity. *Micro and Nano Systems Letters*, 9(1): 5. doi: 10.1186/s40486-021-00131-6
- Kanimozhi S, Durga R, Sabithasree M, Kumar AV, Sofiavizhimalar A, Kadam AA, Rajagopal R, Sathya R, Azelee NIW. 2022. Biogenic synthesis of silver nanoparticle using *Cissus quadrangularis* extract and its invitro study. *Journal of King Saud University-Science*, 34(4): 101930. doi: 10.1016/j.jksus.2022.101930
- Kavakebi E, Anvar AA, Ahari H, Motalebi AA. 2021. Green biosynthesized *Satureja rechingeri* Jamzad-Ag/poly vinyl alcohol film: quality improvement of *Oncorhynchus mykiss* fillet during refrigerated storage. *Food Science and Technology, Campinas*, 41(1): 267-278. doi: 10.1590/fst.62720
- Khalaf HH, Sharoba AM, El-Tanahi HH, Morsy MK. 2013. Stability of antimicrobial activity of pullulan edible films incorporated with nanoparticles and essential oils and their impact on turkey deli meat quality. *Journal of Food and Dairy Sciences*, 4(11): 557-573. doi: 10.21608/jfds.2013.72104
- Khan MJ, Ramiah SK, Selamat J, Shameli K, Sazili AQ, Mookiah S. 2022. Utilisation of pullulan active packaging incorporated with curcumin and pullulan mediated silver nanoparticles to maintain the quality and shelf life of broiler meat. *Italian Journal of Animal Science*, 21(1): 244-262. doi: 10.1080/1828051X.2021.2012285
- Krishnaraj C, Radhakrishnan S, Ramachandran R, Ramesh T, Kim BS, Yun SI. 2022. In vitro toxicological assessment and biosensing potential of bioinspired chitosan nanoparticles, selenium nanoparticles, chitosan/selenium nanocomposites, silver nanoparticles and chitosan/silver nanocomposites. *Chemosphere*, 301: 134790. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134790
- Kumar P, Mahajan P, Kaur R, Gautam S. 2020. Nanotechnology and its challenges in the food sector: A review. *Materials Today Chemistry*, 17: 100332. doi: 10.1016/j.mtchem.2020.100332
- Kumar S, Basumatary IB, Sudhani HPK, Bajpai VK, Chen L, Shukla S, Mukherjee A. 2021. Plant extract mediated silver nanoparticles and their applications as antimicrobials and in sustainable food packaging: A state-of-the-art review. *Trend in Food Science and Technology*, 112: 651-666. doi: 10.1016/j.tifs.2021.04.03

- Kuuliala L, Pippuri T, Hultman J, Auvinen S-M, Kolppo K, Nieminen T, Karp M, Björkroth J, Kuusipalo J, Jääskeläinen E. 2015. Preparation and antimicrobial characterization of silver-containing packaging materials for meat. *Food Packaging and Shelf Life*, 6: 53-60. doi: 10.1016/j.fpsl.2015.09.004
- Lakhan MN, Chen R, Shar AH, Chand K, Shah AH, Ahmed M, Ali I, Ahmed R, Liu J, Takahashi K, Wang J. 2020. Eco-friendly green synthesis of clove buds extract functionalized silver nanoparticles and evaluation of antibacterial and antiadhiatom activity. *Journal of Microbiological Methods*, 173: 105934. doi: 10.1016/j.mimet.2020.105934
- Lamri M, Bhattacharya T, Boukid F, Chentir I, Dib AL, Das D, Djenane D, Gagaoua M. 2021. Nanotechnology as a processing and packaging tool to improve meat quality and safety. *Foods*, 10(11): 2633. doi: 10.3390/foods10112633
- Lee SH, Jun B-H. 2019. Silver Nanoparticles: Synthesis and application for nanomedicine. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(4): 865. doi: 10.3390/ijms20040865
- Li W, Li L, Zhang H, Yuan M, Qin Y. 2018. Evaluation of PLA nanocomposite films on physicochemical and microbiological properties of refrigerated cottage cheese. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(1): 1-9. doi: 10.1111/jfpp.13362
- Li Z, Tian C, Jiao D, Li J, Li Y, Zhou X, Zhao H, Zhao Y, Han X. 2022a. Synergistic effects of silver nanoparticles and cisplatin in combating inflammation and hyperplasia of airway stents. *Bioactive Materials*, 9: 266-280. doi: 10.1016/j.bioactmat.2021.07.029
- Li H, Cai Q, Yan X, Jie G, Jie G. 2022b. Ratiometric electrochemical biosensor based on silver nanoparticles coupled with walker amplification for sensitive detection of microRNA. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 353, 131115. doi: 10.1016/j.snb.2021.131115
- Liang J, Wang J, Li S, Xu L, Wang R, Chen R, Sun Y. 2019. The size-controllable preparation of chitosan/silver nanoparticle composite microsphere and its antimicrobial performance. *Carbohydrate Polymers*, 220: 22-29. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.05.048
- Mahdi SS, Vadood R, Nourdahr R. 2012. Study on the antimicrobial effect of nanosilver tray packaging of minced beef at refrigerator temperature. *Global Veterinaria*, 9(3): 284-289. doi: 10.5829/idosi.gv.2012.9.3.1827
- Marchiore, N. G., Manso, I. J., Kaufmann, K. C., Lemes, G. F., de Oliveira Pizolli, A. P., Droval, A. A., Bracht, L., Gonçalves, O. H., Leimann, F. V. 2017. Migration evaluation of silver nanoparticles from antimicrobial edible coating to sausages. *LWT-Food Science and Technology*, 76: 203-208. doi: 10.1016/j.lwt.2016.06.013
- Matar GH, Andac M. 2021. Antibacterial efficiency of silver nanoparticles-loaded locust bean gum/polyvinyl alcohol hydrogels. *Polymer Bulletin*, 78(11): 6095-6113. doi: 10.1007/s00289-020-03418-7
- Matar GH, Akyüz G, Kaymazlar E, Andaç M. 2023. An investigation of green synthesis of silver nanoparticles using Turkish honey against pathogenic bacterial strains. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 13(2): 195. doi: 10.33263/BRIAC132.195
- Meretoudi A, Banti CN, Raptis PK, Papachristodoulou C, Kourkoumelis N, Ikiadis AA, Zoumpoulakis P, Mavromoustakos T, Hadjikakou SK. 2021. Silver nanoparticles from oregano leaves' extracts as antimicrobial components for non-infected hydrogel contact lenses. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(7): 3539. doi: 10.3390/ijms22073539
- Morsy MK, Khalaf HH, Sharoba AM, El-Tanahi HH, Cutter CN. 2014. Incorporation of essential oils and nanoparticles in pullulan films to control foodborne pathogens on meat and poultry products. *Journal of Food Science*, 79(4): M675-684. doi: 10.1111/1750-3841.12400
- Naddeo JJ, Ratti M, Malley S, Gripenburg J, Bubb D, Klein E. 2015. Antibacterial properties of nanoparticles: a comparative review of chemically synthesized and laser-generated particles. *Advanced Science, Engineering and Medicine*, 7: 1044-1057. doi: 10.1166/asem.2015.1811
- Naganthran A, Verasoundarapandian G, Khalid FE, Masarudin MJ, Zulharnain A, Nawawi NM, Karim M, Abdullah CAC, Ahmad SA. 2022. Synthesis, characterization and biomedical application of silver nanoparticles. *Materials (Basel)*, 15(2): 427. doi: 10.3390/ma15020427
- Natsuki J. 2015. A review of silver nanoparticles: synthesis methods, properties and applications. *International Journal of Materials Science and Applications*, 4(5): 325-332. doi: 10.11648/j.ijmsa.20150405.17
- Nie P, Zhao Y, Xu H. 2023. Synthesis, applications, toxicity and toxicity mechanisms of silver nanoparticles: A review. *Ecotoxicology and Environment Safety*, 253: 114636. doi: 10.1016/j.ecoenv.2023.114636
- Nwabor OF, Singh S, Paosen S, Vongkamjan K, Voravuthikunchai SP. 2020. Enhancement of food shelf life with polyvinyl alcohol-chitosan nanocomposite films from bioactive Eucalyptus leaf extracts. *Food Bioscience*, 36: 100609. doi: 10.1016/j.fbio.2020.100609
- Oluwatofarati SW, Olayemi RA, Rahman A. 2018. Effects of silver bio-nanoparticle treatment on the wet preservation, technological, and chemical qualities of meat. *Food Quality and Safety*, 2(3): 159-164. doi: 10.1093/fqsafe/fyy014
- Ong WTJ, Nyam KL. 2022. Evaluation of silver nanoparticles in cosmeceutical and potential biosafety complications. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(4): 2085-2094. doi: 10.1016/j.sjbs.2022.01.035
- Owoseni-Fagbenro KA, Saifullah S, Imran M, Perveen S, Rao K, Fasina TM, Olasupo IA, Adams LA, Ali I, Shah MR. 2019. Egg proteins stabilized green silver nanoparticles as delivery system for hesperidin enhanced bactericidal potential against resistant *S. aureus*. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 50: 347-354. doi: 10.1016/j.jddst.2019.02.002
- Panea B, Ripoll G, González J, Fernández-Cuello Á, Albertí P. 2014. Effect of nanocomposite packaging containing different proportions of ZnO and Ag on chicken breast meat quality. *Journal of Food Engineering*, 123: 104-112. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.09.029
- Patino JH, Henríquez LE, Restrepo DA, Lantero MI, García MA. 2022. Influence of polyamide composite casings with silver-zinc crystals on the quality of beef and chicken sausages during their storage. *Journal of Food Science and Technology*, 59: 75-85. doi: 10.1007/s13197-021-04983-z
- Pichardo J, Chilakapati MK, Castro-Beltrán R, Cardoso-Avila P. 2015. Photochemical transformation of silver nanoparticles by combined blue and green irradiation. *Journal of Nanoparticle Research*, 17: 160. doi: 10.1007/s11051-015-2920-x
- Pino-Ramos VH, Audifred-Aguilar JC, Sánchez-Obregón R, Bucio E. 2021. Antimicrobial polyurethane catheters synthesized by grafting-radiation method doped with silver nanoparticles. *Reactive and Functional Polymers*, 167: 105006. doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2021.105006
- Pipattanachat S, Qin J, Rokaya D, Thanyasrisung P, Srimanepong V. 2021. Biofilm inhibition and bactericidal activity of NiTi alloy coated with graphene oxide/silver nanoparticles via electrophoretic deposition. *Scientific Reports*, 11(1): 14008. doi: 10.1038/s41598-021-92340-7
- Pulit-Prociak J, Banach M. 2016. Silver nanoparticles—a material of the future...? *Open Chemistry*, 14(1): 76-91. doi: 10.1515/chem-2016-0005
- Pushparaj K, Liu W-C, Meyyazhagan A, Orlacchio A, Pappusamy M, Vadivalagan C, Robert AA, Arumugam VA, Kamyab H, Klemesš JJ, Khademi T, Mesbah M, Chelliapan S, Balasubramania B. 2022. Nano- from nature to nurture: A comprehensive review on facets, trends, perspectives and sustainability of nanotechnology in the food sector. *Energy*, 240: 122732. doi: 10.1016/j.energy.2021.122732

- Rajoriya P, Barcelos MCS, Ferreira DCM, Misra P, Molina G, Pelissari FM, Shukla PK, Ramteke PW. 2021. Green silver nanoparticles: Recent trends and technological developments. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(9): 2711-2737. doi: 10.1007/s10924-021-02071-z
- Rodriguez-Acosta H, Tapia-Rivera JM, Guerrero-Guzman A, Hernandez-Elizarraraz E, Hernandez-Diaz JA, Garza-Garcia JJO, Pérez-Ramírez PE, Velasco-Ramírez SF, Ramírez-Anguiano AC, Velázquez-Juárez G, Velázquez-López JM, Sánchez-Toscano YG, García-Morales S, Flores-Fonseca MM, García-Bustos DE, Sánchez-Chiprés DR, Zamudio-Ojeda A. 2022. Chronic wound healing by controlled release of chitosan hydrogels loaded with silver nanoparticles and calendula extract. *Journal of Tissue Viability*, 31(1): 173-179. doi: 10.1016/j.jtv.2021.10.004
- Roy A. 2021. Plant derived silver nanoparticles and their therapeutic applications. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 22(14): 1834-1847. doi: 10.2174/1389201021666201027155708
- Saeed S, Iqbal A, Ashraf MA. 2020. Bacterial-mediated synthesis of silver nanoparticles and their significant effect against pathogens. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(30): 37347-37356. doi: 10.1007/s11356-020-07610-0
- Shankar S, Khodaei D, Lacroix M. 2021. Effect of chitosan/essential oils/silver nanoparticles composite films packaging and gamma irradiation on shelf life of strawberries. *Food Hydrocolloids*, 117: 106750. doi: 10.1016/j.foodhyd.2021.106750
- Simbine EO, Rodrigues LDC, Lapa-Guimarães J, Kamimura ES, Corassin CH, De Oliveira CAF. 2019. Application of silver nanoparticles in food packages: A review. *Food Science and Technology*, Campinas, 39(4): 793-802. doi: 10.1590/fst.36318
- Siqueira MC, Aouada MRM, Castro VLS, Brandao HM, Rech RR, Marconcini JM, Mattoso LHC. 2013. Caracterização e avaliação da toxicidade de nanopartículas de prata para incorporação em matriz polimérica para uso em embalagens de alimentos. VII Workshop de Nanotecnologia Aplicada ao Agronegócio, Embrapa Instrumentação, 10 a 13 de Junho de 2013, Sao Carlos, Brazil, pp. 542-544.
- Sofi MA, Sunitha S, Sofi MA, Khadheer Pasha SK, Choi D. 2022. An overview of antimicrobial and anticancer potential of silver nanoparticles. *Journal of King Saud University-Science*, 34(2): 101791. doi: 10.1016/j.jksus.2021.101791
- Takamiya AS, Monteiro DR, Gorup LF, Silva EA, de Camargo ER, Gomes-Filho JE, de Oliveira SHP, Barbosa DB. 2021. Biocompatible silver nanoparticles incorporated in acrylic resin for dental application inhibit *Candida albicans* biofilm. *Materials Science & Engineering C-Materials for Biological Applications*, 118: 111341. doi: 10.1016/j.msec.2020.111341
- Thames HT, Fancher CA, Colvin MG, McAnally M, Tucker E, Zhang L, Kiess AS, Dinh TTN, Sukumaran AT. 2022. Spoilage bacteria counts on broiler meat at different stages of commercial poultry processing plants that use peracetic acid. *Animals*, 12: 1439. doi: 10.3390/ani12111439
- Vega-Baudrit J, Gamboa S, Rojas E, Martinez V. 2019. Synthesis and characterization of silver nanoparticles and their application as an antibacterial agent. *International Journal of Biosensors & Bioelectronics*, 5(5): 166-173. doi: 10.15406/ijbsbe.2019.05.00172
- Wang W, Yu Z, Alsammarraie FK, Kong F, Lin M, Mustapha A. 2020. Properties and antimicrobial activity of polyvinyl alcohol-modified bacterial nanocellulose packaging films incorporated with silver nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 100: 105411. doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.105411
- Wu Z, Zhou W, Pang C, Deng W, Xu C, Wang X. 2019. Multifunctional chitosan-based coating with liposomes containing laurel essential oils and nanosilver for pork preservation. *Food Chemistry*, 295: 16-25. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.05.114
- Zhao X, Wang K, Ai C, Yan L, Jiang C, Shi J. 2021. Improvement of antifungal and antibacterial activities of food packages using silver nanoparticles synthesized by iturin A. *Food Packaging and Shelf Life*, 28: 100669. doi: 10.1016/j.fpsl.2021.100669