

Preserving the Quality Characteristics of Eggs Using Nanotechnology

Abdullah Demirci^{1*}

¹Bingöl University, Institute of Natural Sciences, Department of Apiculture and Bee Products, 12000, Bingöl, Turkey.

Abstract

Eggs are known as one of nature's most complete and functional food sources. In addition to their high nutritional value, their rich mineral and vitamin content makes them an important commercial product, particularly due to their unique applications in the food industry. However, due to their source of production and physical properties, they have a short shelf life, and quality loss is inevitable. Due to its structure, the egg is a food susceptible to microbial contamination (*Salmonella* sp.). To derive greater benefit from such a valuable food, methods such as liquid egg pasteurization and powdered egg production are employed. However, in recent years, modern preservation techniques such as nanotechnological coating have been widely researched and applied. In this study, lavender (*Angustifolia-Sevtopolis*) extract was nanoencapsulated within a polyvinyl alcohol polymer using the electrospinning method, collected on wax paper and aluminum foil, and used to coat chicken eggs contaminated with *Salmonella typhimurium* (ST). Over a 35-day storage period at 4 °C, the internal and external quality parameters, total aerobic bacterial count, and *Salmonella* count of the egg samples were determined. The thermal behavior, molecular characterization, and morphological properties of the produced nanofibers were determined using TGA, FTIR, and SEM analyses. As a result, compared to the control group samples (without nanofiber application), total aerobic bacterial growth in the egg samples was inhibited by up to 31.9% (1.38 log CFU/g) over the 35-day storage period. It was demonstrated that the treatment inhibited ST growth by up to 3.2 log CFU/g on aluminum foil and 2.6 log CFU/g on wax paper. The applied nanoencapsulation method reduced weight loss without affecting shell thickness; it also maintained critical quality parameters such as the white index, yellow index, and Haugh unit at high levels compared to the control. The application of nanofibers containing lavender extract has been demonstrated as an effective nanotechnological strategy applicable to the food industry, which preserves egg quality parameters and enhances microbiological safety.

Keywords: Nanotechnology, Electrospinning, *Salmonella typhimurium*, Egg quality parameters

Nanoteknoloji ile Yumurtanın Kalite Özelliklerinin Korunması

Özet

Yumurta, doğanın en eksiksiz ve fonksiyonel besin kaynaklarından biri olarak bilinmektedir. Yüksek besin, mineral ve vitamin içeriğiyle gıda sanayisinde benzersiz özelliklere sahip, ticari değeri yüksek bir üründür. Ancak üretim kaynağı ve fiziksel özellikleri gereği raf ömrü kısadır ve kalite kayıpları kaçınılmazdır. Yumurta, yapısı gereği mikrobiyal kontaminasyona (*Salmonella* sp.) açık bir gıdadır. Bu kadar değerli bir gıdadan daha fazla yararlanmak için; sıvı yumurta pastörizasyonu ve toz yumurta üretimi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda nanoteknolojik kaplama gibi modern muhafaza teknikleri yaygın olarak araştırılmakta ve uygulanmaktadır. Çalışmada; *Lavandula angustifolia* ekstresi, polivinil alkol polimeri içersine elektrospinning yöntemiyle Nanoenkapsüle edilerek, yağlı kağıt ve alüminyum folya üzerinde toplanarak *Salmonella typhimurium* (ST) ile kontamine edilmiş tavuk yumurtası kaplanmıştır. 4 °C'de 35 günlük depolama süresi boyunca yumurta numunelerinin; iç-dış kalite parametreleri, toplam aerobik bakteri ve *Salmonella* sayımı gerçekleştirilmiştir. Üretilen nanofiberlerin termal davranışı, moleküler karakterizasyonu ve morfolojik özellikleri TGA, FTIR ve SEM analizleri ile ortaya konulmuştur. Sonuç olarak; kontrol grubu numunelerine (nano uygulama yapılmamış) kıyasla, 35 günlük depolama süresi boyunca yumurta numunelerindeki toplam aerobik bakteri üremesi %31,9'a (1,38 log CFU/g) kadar engellenmiştir. ST büyümesini; alüminyum folyoda 3,2 log CFU/g ve yağlı kâğıtta 2,6 log CFU/g'ye kadar engellediği gösterilmiştir. Uygulanan nanoenkapsülasyon yöntemi kabuk kalınlığını etkilemeksizin ağırlık kaybını azaltırken; kontrole oranla ak indeksi, sarı indeksi ve Haugh birimi gibi kritik kalite parametrelerini yüksek düzeyde korumuştur. Lavanta ekstraktı içeren nanofiber uygulaması, yumurtaların kalite parametrelerini koruyan ve mikrobiyolojik güvenliğini artıran, gıda sanayine uygulanabilir etkin bir nanoteknolojik strateji olarak ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Nanoteknoloji, Elektrosping, *Salmonella typhimurium*, Yumurta kalitesi

Giriş

Küresel nüfus artışı ve tüketici bilincinin yükselmesi, gıda endüstrisinde hem besleyici değeri yüksek hem de mikrobiyolojik açıdan güvenli gıdalara olan talebi artırmıştır. Hayvansal kaynaklı protein, esansiyel amino asitler, vitamin ve mineraller bakımından en zengin ve ekonomik besin kaynaklarından biri olan yumurta, insan beslenmesinde



kritik bir role sahip olduğu bilinmektedir (Kovacs-Nolan ve ark., 2005; Pal ve Molnar 2021). Ancak yumurta, yumurtlamadan tüketime kadar geçen süreçte biyolojik yapısı gereği fizikokimyasal ve mikrobiyolojik bozulmalara karşı oldukça hassastır. Depolama süresince kabuktaki gözenekler vasıtasıyla meydana gelen su ve karbondioksit kaybı; iç kalite parametreleri olan; hava boşluğunun büyümesine, ak ve sarı indeksinin düşmesine ve Haugh birimi değerinin azalmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, kabuk yüzeyindeki mikroorganizmaların gözeneklerden içeri sızması, başta *Salmonella* sp. türleri olmak üzere patojenik kontaminasyon riskini artırarak hem gıda güvenliğini hem de halk sağlığını ciddi şekilde tehdit etmektedir.

Literatürde, kümes barınak sistemlerinin *Enterococcus* ve *Escherichia coli* gibi spesifik indikatör patojenlerin horizontal geçiş riski ve toplam mikrobiyal popülasyon seviyeleri üzerinde belirleyici bir rol oynadığı rapor edilmektedir. Yapılan çalışmalarda, en düşük kontaminasyon oranlarına geleneksel (4.05 log CFU/yumurta) ve zenginleştirilmiş (3.98 log CFU/yumurta) kafes sistemlerinde rastlanırken; büyük kafeslerden elde edilen yumurtaların 5.49 log CFU/yumurta mikrobiyal yüke sahip olduğu, en yüksek kirliliğin ise altlıklı kümes sistemlerinde (6.24 log CFU/yumurta) meydana geldiği bildirilmiştir (Englmaierova ve ark., 2014).

Niğde ve Kayseri illerinde; market ve köy yumurtalarının mikrobiyolojik kalitelerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, Niğde ve Kayseri'deki çeşitli market ve açık pazarlardan alınan toplam 200 yumurta (100 market ve 100 köy) örneği mikrobiyolojik analize tabi tutuldu. Her bir yumurta kabuğu ve içeriği koliform, *Escherichia coli*, *Campylobacter* sp., *Staphylococcus aureus*, *Salmonella* sp. ve maya- küf bakımından incelendi. İncelenen yumurta örneklerinin hiçbirinde *Campylobacter* sp. ve *S. aureus*'a rastlanmazken, bir örnekte (yumurta kabuğu) *Salmonella* sp. belirlendi. Ayrıca 27 (%13.5) yumurta kabuğunun ve 6 (%3) içeriğinin koliform bakteriler ile sırasıyla 12 (%6) ve 31 (%15.5) yumurta kabuğunun ise sırasıyla *E. coli* ve maya- küf ile kontamine olduğu tespit edilmiştir (Karadal ve ark., 2018).

Geleneksel olarak yumurta kalitesini korumak amacıyla soğuk zincir uygulamaları, mineral yağlarla kaplama veya modifiye atmosfer paketleme gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerin yüksek maliyet, sınırlı raf ömrü uzatma kapasitesi ve çevresel sürdürülebilirlik gibi açılardan çeşitli dezavantajları bulunmaktadır. Son yıllarda gıda bilimi ve teknolojisinde yaşanan devrimsel gelişmeler, yenilikçi bir yaklaşım olarak nanoteknolojinin gıda muhafaza sistemlerine entegrasyonunu ön plana çıkarmıştır. Nanoteknoloji, materyallerin nano boyutta (1-100nm) manipüle edilerek üstün mekanik, bariyer ve antimikrobiyal özelliklere sahip yeni biyomalzemelerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Yumurtanın muhafazasında nanoteknolojik yaklaşımlar; özellikle elektro-eğirme (electrospinning) gibi yöntemlerle üretilen nanofiberlerin, nanokompozit ambalajların ve nano-enkapsüle edilmiş aktif bileşenlerin (esansiyel yağlar, organik asitler vb.) kullanımına odaklanmaktadır. Nano ölçekteki bu yapılar, çok yüksek bir yüzey alanı/hacim oranına sahip olmaları sayesinde kabuk yüzeyini homojen ve mikroskobik düzeyde kaplayarak gaz ve nem transferini minimuma indirmekte, böylece iç kalite kayıplarını etkili bir şekilde yavaşlatmaktadır. Aynı zamanda, yapıya entegre edilen antimikrobiyal nano-ajanların kontrollü salınımı sayesinde kabuk yüzeyindeki mikrobiyal yükün penetrasyonu engellenmekte ve ürünün mikrobiyolojik güvenliği en üst düzeye çıkarılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, yumurtanın depolama sürecindeki fizikokimyasal ve mikrobiyolojik kalitesini korumak adına nanoteknoloji tabanlı yenilikçi biyomalzemelerin (PVA) kullanım potansiyelini incelemektir. Bu doğrultuda, geliştirilen nanoteknolojik sistemlerin yumurta kabuğu üzerindeki bariyer etkileri, fonksiyonel özellikleri ve patojen mikroorganizmalara karşı gösterdiği antimikrobiyal etkinlik detaylı bir şekilde ele alınmıştır (Demirci 2026).

Materyal ve Yöntem

Uçucu Yağ Ekstraksiyonu

Araştırmada kullanılan *Lavandula angustifolia* bitkisinden uçucu yağ eldesi, Clevenger sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ekstraksiyon işlemi, çözücü olarak saf su varlığında 5 saat süreyle kesintisiz olarak sürdürülmüş; elde edilen uçucu yağ fazı ayrıştırılarak sonraki aşamalarda kullanılmak üzere 4°C'de muhafaza edilmiştir.

Elektrospın Çözeltisinin Hazırlanması

Eğirme çözeltisinin hazırlanmasında, matris materyali olarak poli(vinil alkol) (PVA; Mv: 50.000-85.000 Da g/mol, Acros Organics) tercih edilmiştir. Kütlece %10'luk stok PVA çözeltisi, saf su içerisinde, manyetik karıştırıcıda 45°C sıcaklıkta, 350 rpm karıştırma hızında 4 saat süreyle tam çözünme sağlanana kadar stabilize edilmiştir. Ardından, elde edilen *L. angustifolia* uçucu yağı, hazırlanan homojen PVA matrisine toplam hacme oranla (%1.5, w/V) oranında ilave homojen olması sağlanmıştır (Demirci ve ark., 2025).

Elektroeğirme (Electrospinning) Prosesi

Hazırlanan biyoaktif emülsiyon çözeltisinin elektroeğirme işlemi, özelleştirilmiş bir elektrospinning düzeneğinde (Faraday Elektrik ve Elektronik Ltd., Erzurum, Türkiye) gerçekleştirilmiştir. Çözelti, bir dijital çift sıringa pompası (Harvard Apparatus 11 Plus, Holliston, Massachusetts, ABD) vasıtasıyla sisteme uyarlanmıştır. Proses parametreleri; akış hızı 0,450 mL/h, iğne ucu ile toplayıcı plaka arasındaki mesafe 12 cm ve uygulanan elektriksel potansiyel fark 10,8



kV olarak optimize edilmiştir. İşlem sonucunda elde edilen nanolifli (nanofiber) membran yapılar, karakterizasyon ve performans analizleri için kurutulmuş ve kullanılmıştır.

Nano Materyalin Karakterizasyon Analizleri

Lavanta ile üretilen nanofiberlerin morfolojileri, sırasıyla 10, 25 ve 50 kx büyütme oranlarında taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir.

Nanofiberlerin termal davranışları, bir termogravimetrik analizör (TGA; New Castle, DE, ABD) kullanılarak belirlenmiştir. Azot akış hızları 20 mL/dk olarak, sıcaklık aralığı ise 25°C ile 800°C arasında 10°C/dk hızında ayarlanmıştır. Belirtilen ısıtma aralığında (30°C ile 520°C) ayrışma ve buna bağlı ağırlık kaybı gözlemlenmiştir. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi

Üretilen nanofiberlerin kızılötesi spektrumlarına dayalı FTIR sonuçları, Bruker Optics (Almanya) tarafından üretilen ve ATR elmas modülüne sahip bir FTIR spektrometresi kullanılarak 400 ile 4000 cm⁻¹ (4 cm⁻¹ çözünürlük) dalga sayıları aralığında ölçülmüştür (Demirci ve ark., 2024; 2025).

Yumurtanın Kaplanması

Erzurum Atatürk Üniversitesi yumurta üretim çiftliğinde aynı gün üretilen, boyuta göre sınıflandırılmış (53-62 g, M) ve *salmonella* içermeyen yumurta örnekleri, test örnekleri olarak kullanılmıştır. Tüm yumurta örnekleri, 4,5 log (CFU/ml) *Salmonella typhimurium* içeren bir çözeltiye 2 saniye boyunca daldırılmış, ardından yumurta yüzeyindeki nemin kurumasına izin verilmiştir. Bu işlemlerin ardından, her numune için 10 dakika boyunca elektrospraying yöntemiyle hazırlanan ve nanomalzemelerle kaplanmış alüminyum folyo ve pişirme kağıdı (15x15 cm) yumurta yüzeyine uygulandı. Tüm yumurta numuneleri (kaplamasız numuneler: kontrol grubu, lavanta nanofiberlerinden üretilmiş alüminyum folyo ve pişirme kağıdı ile işlenmiş numuneler) 35 gün boyunca 4°C'de saklanmıştır.

Yumurta İç-Dış Kalite Parametre Analizleri

Yumurta, ağırlığı, kabuk kalınlığı ve şekil indeksi olarak dış kalite; hava boşluğu, ak- sarı indeksi ve haugh biri olarak iç kalite özelliklerini oluşturmaktadır.

Yumurta Ağırlığı (g): Hassas terazi (0.001 g, hassasiyetli) kullanılarak her bir yumurtanın kütlesi ölçülmüştür.

Kabuk Kalınlığı (µm): Yumurta kırıldıktan sonra iç zarı soyularak; Yumurtanın küt ucu, sivri ucu ve ekvator (orta) bölgesinden mikrometre dijital kumpas ile ölçümler alınarak ortalama değer kaydedilmiştir.

Yumurta hava boşluğu (mm): Yumurta ışık altında tutularak ölçüm cetveli yardımıyla ölçülmüştür.

Yumurta Ak İndeksi (%): Yumurta kırıldıktan sonra ak uzunluğu ve ak genişliği dijital kumpas ile ölçülerek kaydedilmiştir. Ak yüksekliği de mikrometre ile ölçülerek aşağıdaki formüle göre hesaplama yapılmıştır.

Ak İndeksi = (Ak Yüksekliği (mm) / ((2 * Uzun Çap (mm) + Kısa Çap (mm)) / 3)) * 100

Yumurta Sarı İndeksi (%): Yumurta kırıldıktan sonra sarı çapı dijital kumpas ile ölçülerek kaydedilmiştir. Sarı yüksekliği de mikrometre ile ölçülerek aşağıdaki formüle göre hesaplama yapılmıştır.

Sarı İndeksi = ((Sarı Yüksekliği (mm) / Sarı Çapı (mm)) * 100

Haugh Birimi (Haugh, HU): Yumurta tazeliğinin ve ak (albumin) kalitesinin literatürdeki en temel göstergesidir. Yumurta kırıldıktan sonra, sarının hemen etrafındaki yoğun ak tabakasının yüksekliği üç ayaklı mikrometre ile ölçülmüştür. Ardından yumurta ağırlığı da denkleme katılarak şu formülle HU hesaplanmıştır:

HU=100×log(H+7.57-1.7×W^{0.37}), H = Ak yüksekliği (mm), W =Yumurta ağırlığı (g)

Yumurtanın Mikrobiyolojik Analizleri

Nanofiber kaplamalı numunelerin ve kontrol yumurta örneklerinin toplam aerobik bakteri sayısı, Townsend ve Naqui (1998) tarafından tanımlanan yöntemle göre belirlenmiştir. Her numune için, bozulmamış yumurta numunesi, 100 ml seyreltme solüsyonu (%1 pepton ve %0,85 NaCl) içeren steril bir Stomacher torbasına konulmuştur; 5 dakikalık aralıklarla iki kez elle çalkalandıktan sonra, üç grup için seri seyreltiler (10¹ ila 10⁷) hazırlandı. Tüm seyreltilmiş numuneler, TAB üremesini tahmin etmek amacıyla 35 °C'de 2 gün (48 saat) süreyle inkübe edildi. TAB ile ilgili mikrobiyolojik ölçümler, her analiz gününde üç kez tekrarlandı ve sonuçlar ortalama±standart sapma olarak verilmiştir.

Toplam aerobik bakteri sayımı için, seyreltiler (10¹–10⁶ CFU/ml) *Salmonella typhimurium*'a özgü olan XLD agarında (Ksiloz Lisin Deoksikolat Agar, Merck 1.05287) inkübe edildi. 37°C'de 24 saatlik inkübasyonun ardından, besiyeriyle aynı renkte, yarı saydam ve bazen ortası siyah olan koloniler *Salmonella typhimurium* olarak sayılmıştır (Wenke, 2009; ISO 6887-1: 2017).

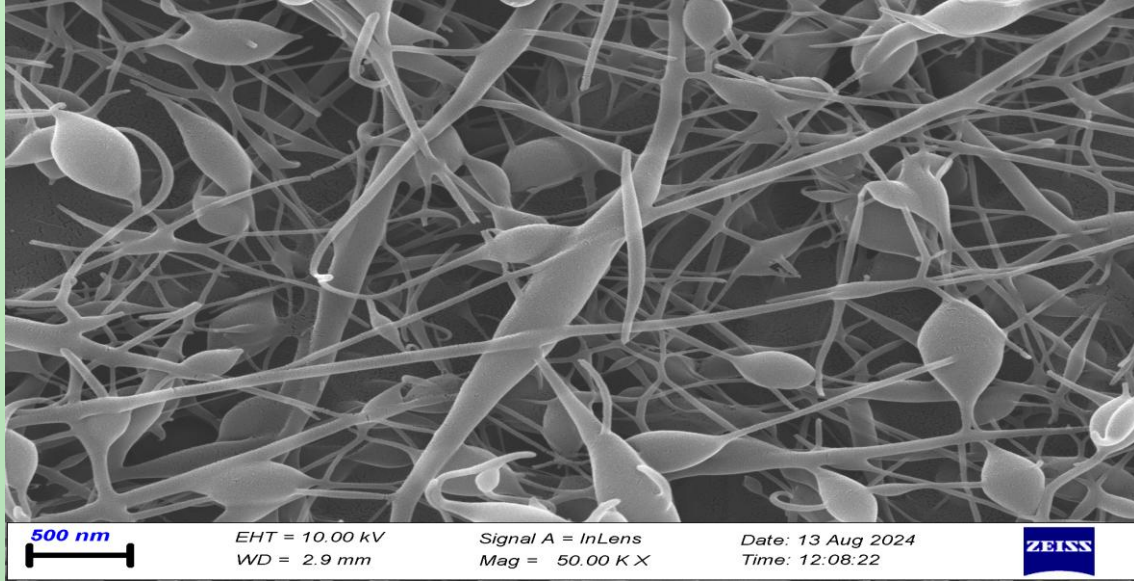
Bulgular ve Tartışma

Polivinilalkol nano polimeri içerisine gömülü olan lavanta yağı ekstresi ile kaplanan yumurta örnekleri 35 gün boyunca 4°C'de saklanmıştır. Bu süreçte yumurtanın iç-dış kalite özellikleri araştırılırken nano materyalin karakterizasyon morfolojisi de ortaya konmuştur.



Nano Materyalin Karakterizasyon Sonuçları

Yumurta örneklerinin kaplanması için üretilen nanofiberler **Şekil 1**'de gösterilmiştir. SEM'e dayalı bu görüntüler, nanofiberlerin başarıyla elde edildiğini ortaya koymuştur. Bu bağlamda, nanofiberlerin çapları 135,23 ile 589,514 nm aralığında ölçülmüş olup, ortalama değer ise $230,92 \pm 128,539$ nm olarak belirlenmiştir. Nanofiberlerin çaplarından da anlaşıldığı üzere, PVA'ya lavanta yağının eklenmesi çapı artırmıştır. Üretilen nanomalzemelerin çaplarının farklı boyutlarda olması kullanılan malzeme türüne (polisakkarit veya protein vb.) değişmekle birlikte elektrospin parametrelerinin (yüksek voltaj, mesafe ve toplayıcı türü) değişkenliğine bağlı olarak farklılık göstermektedir (Demirci ve ark., 2024; 2025; Ceylan ve Meral 2023). Papaya ve sirsak yaprağı özütlerinin akne tedavisindeki terapötik etkilerinden yararlanmak amacıyla geliştirilen PVA bazlı nanolifli sistemler, yenilikçi bir topikal taşıyıcı matris alternatifi sunmaktadır. Bu iki biyoaktif ekstraktın elektrospin ile polimerik PVA matrisine eş zamanlı entegrasyonunun, akne patolojisine yönelik lokal uygulamalarda hedef kütle transferini ve biyoaktiviteyi destekleyecek kararlı fizikokimyasal özelliklere sahip nanoliflerin üretilmesine zemin hazırladığı bildirilmektedir. Üretilen nanofiberlerin çapları solüsyondaki bitki ekstresi miktarına bağlı olarak 962-1232nm aralığında değişmiştir (Sastia ve ark., 2025). Bu çalışmada, *Salmonella*'nın inhibisyonunun hayati önem taşıması nedeniyle, 230,92nm dalga boyundaki nanofiberin uygulanması, yumurta numunelerinin kabuğunda barınabilecek bakterilerin yüzeyinde daha geniş bir temas alanı sağlayarak hızlı üremelerini engellediği görülmektedir.

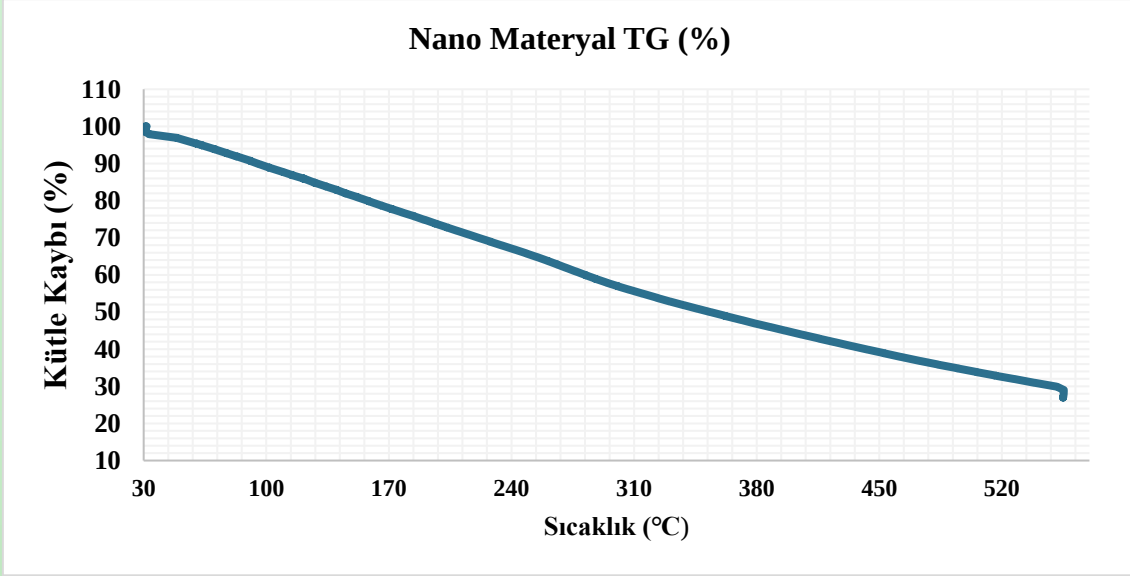


Şekil 1: Nano materyalin 500nm'deki SEM grafiği

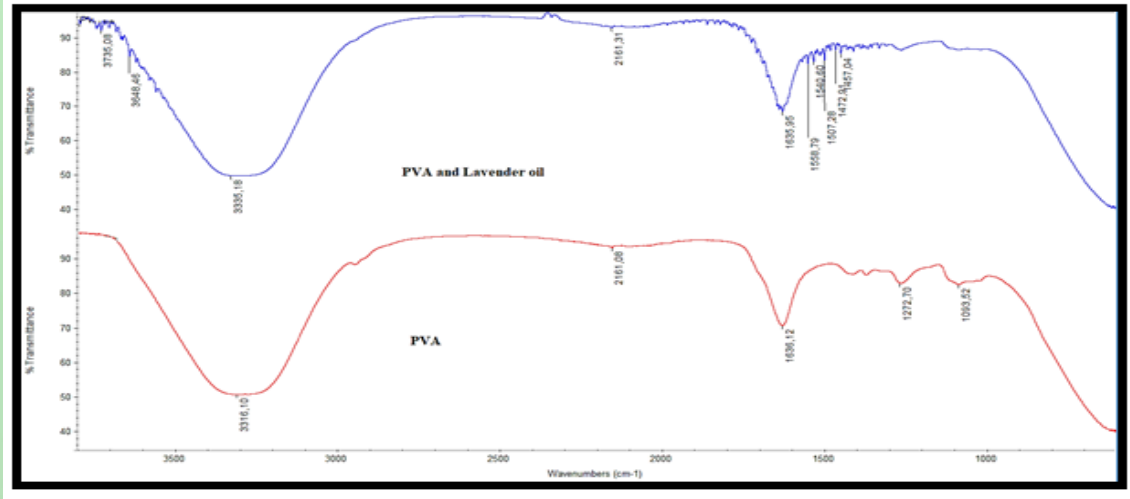
Nanofiberlerin termogravimetrik analizinde ağırlık kaybının, 100 °C'ye kadar %2'nin altında olduğu tespit edilmiştir. Bu kayba sebep olarak nem içeriğinin neden olabileceği ifade edilmektedir. Özellikle, nanofiberde 100 °C ile 550 °C aralığında belirgin bir termal ayrışma gözlemlenmemiştir (Şekil 2). Bu durum, üretilen nanolifin sıcaklığa karşı son derece önemli bir stabilite sağladığını göstermektedir. Gıda bilimi ve teknolojisinde, bütün yumurta veya yumurta ürünlerinde *Salmonella* sp. varlığının eliminasyonu; pastörizasyon, sterilizasyon ve ısı işlem (kızartma/pişirme) gibi termal proseslerin sıcaklık-zaman optimizasyonuna doğrudan bağlıdır. Bu bağlamda, depolama sürecinde (özellikle 35°C gibi hızlandırılmış veya uygunsuz sıcaklık koşullarında) meydana gelebilecek kütle kaybı, yumurta kabuğunun mikro gözenekli yapısı üzerindeki bariyer etkinliğini zayıflatmaktadır. Dolayısıyla, bu sıcaklık derecesindeki kütle ve nem kaybının baskılanması, kabuk yüzeyinde lokalize olan patojenlerin albumin (yumurta akı) veya vitellusa (yumurta sarısı) doğrudan penetrasyon riskini minimize etmek ve mikrobiyolojik güvenliği sürdürmek açısından nano kaplama kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada, PVA içinde nanofiber olarak bulunan lavanta yağı, dayanıklılığını ve kullanışlı işlevselliğini sağlamak için başarılı bir şekilde nanolif olarak kapsüle edilebildiği gözlemlenmiştir. Yumurta numuneleri için kullanılan üretilmiş nanofiberlerin kızılötesi spektrumundaki pikler Şekil 3'te sunulmuştur. Lavanta nanofiberlerine ait bazı spesifik bantlar; 3735,08, 3648,46 ve 3335,18 cm⁻¹ tespit edilmiştir. Bu bağların; O-H, C=C, CH₂ ve CH₃ gruplarındaki elementler arasındaki gerilme, titreşim ve bükülme simetrisinden kaynaklandığı ifade edilmektedir. Ayrıca, Tarhan ve ark. (2023) tarafından lavanta esansiyel yağı üzerine yürütülen çalışmada, esansiyel yağı nano materyallerinin 2200 ile 400 cm⁻¹ aralığında normal spektrumlara sahip olduğu bildirilmiştir.





Şekil 2: Nano materyalin Termogravimetrik analiz grafiği



Şekil 3: Nano materyalin FTIR analiz grafiği

Sanei-Dehkordi ve ark. (2023), lavantadan elde edilen nanoemülsiyonun O-H titreşimleriyle ilişkili olarak yaklaşık 3467 cm⁻¹'de bir tepe noktası gösterdiğini ve 2966, 2925, 2876, 1449, 1368 ve 1238 cm⁻¹'deki C-H, 1737 cm⁻¹'de C=O ile ilişkili pikler olduğu ve ayrıca 1044 ve 1092 cm⁻¹'de bulunan bantların alkol, eterler, karboksilik asit ve esterlerin C-O titreşimleriyle ilişkili olabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmanın FTIR sonuçları, yukarıda bahsedilen çalışma ile karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda, FTIR sonuçları, Salmonella'nın ortadan kaldırılmasında kullanılabilecek lavanta yağı-PVA nanofiber üretiminin başarılı olduğunu doğrulamıştır.

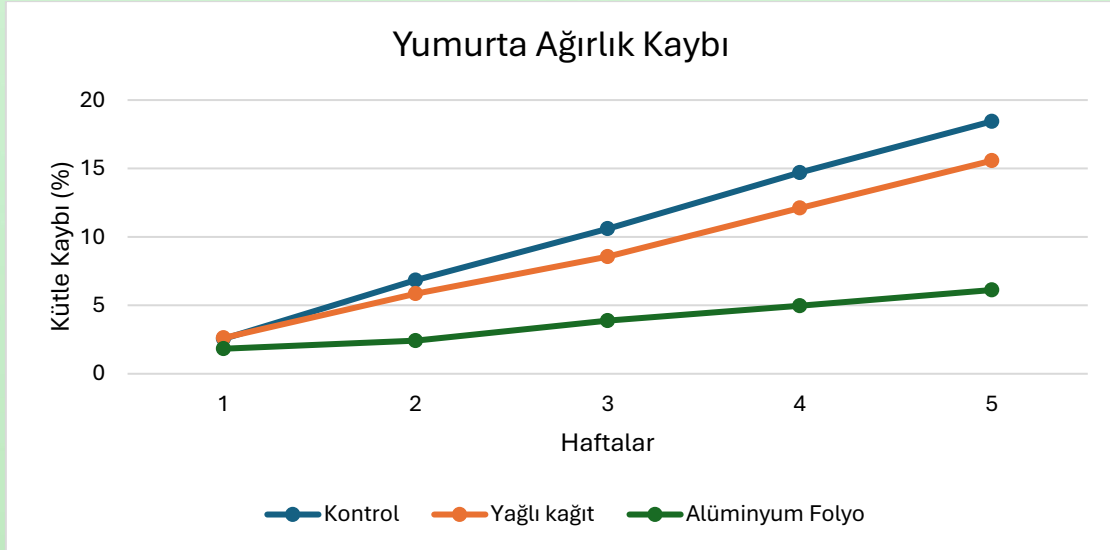
Yumurta İç-Dış Kalite Parametre Analiz Sonuçları

Çalışmada, yumurtanın iç ve dış kalite özelliklerinden bazıları 4°C'de 35 gün depolama süresince ölçülmüştür. Yumurta örneklerinin depolama süresinde ağırlık kaybı ölçüm sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. Çalışmada; 5 hafta boyunca ağırlıkları ölçülen yumurtaların; 3. haftadan itibaren kontrol örneklerindeki kayıpların %10 u aşarak yumurtanın M boydan S boya indiği görülmektedir. 5. Haftada ise ağırlık kaybının en az (%6) alüminyum folyo ile kaplanan yumurta örneğinde olduğu görülmektedir.

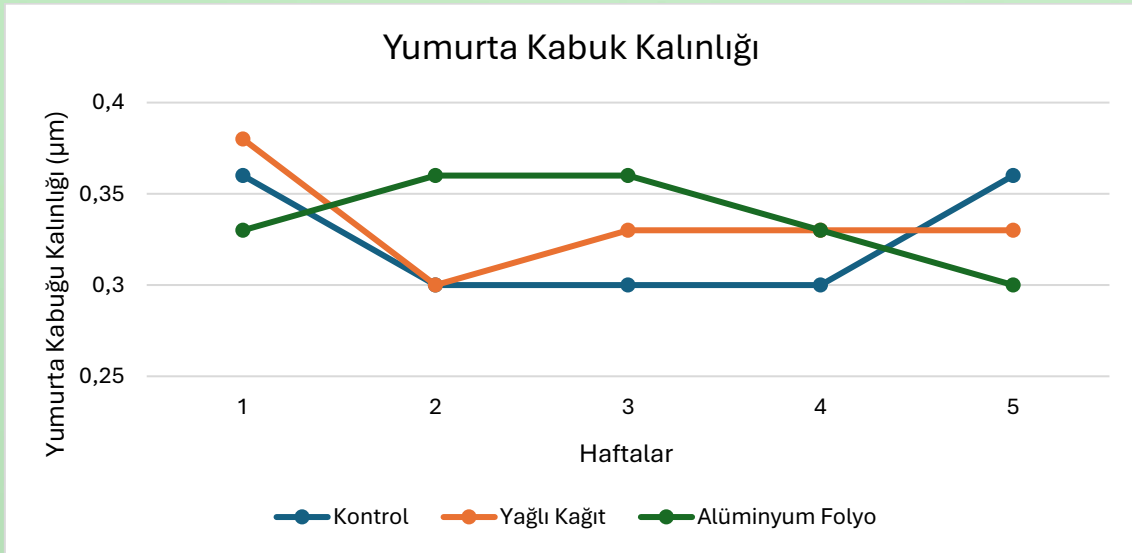
Çalışmada yumurta kabuk kalınlığındaki değişim analiz sonuçları Şekil 5'te verilmiş olup, nano kaplamadan bağımsız olarak önemli olmayan düzensiz bir dağılım görülmektedir. Bunun sebebinin her ne kadar aynı koşullardaki yumurtalar kullanılsa bile, yumurtalar arasındaki farklılıkların olduğu düşünülmektedir.

Yumurta örneklerinin depolama süresince iç hava boşluğundaki değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Çalışmada; yumurta iç hava boşluğunun en yüksek kontrol örneğinde olduğu gözlemlenirken alüminyum folyo ile kaplanan yumurta örneklerinde en az boşluk ölçülmüştür. Bu sonuçlar yumurta toplam ağırlık kaybı ile paralellik göstermektedir.

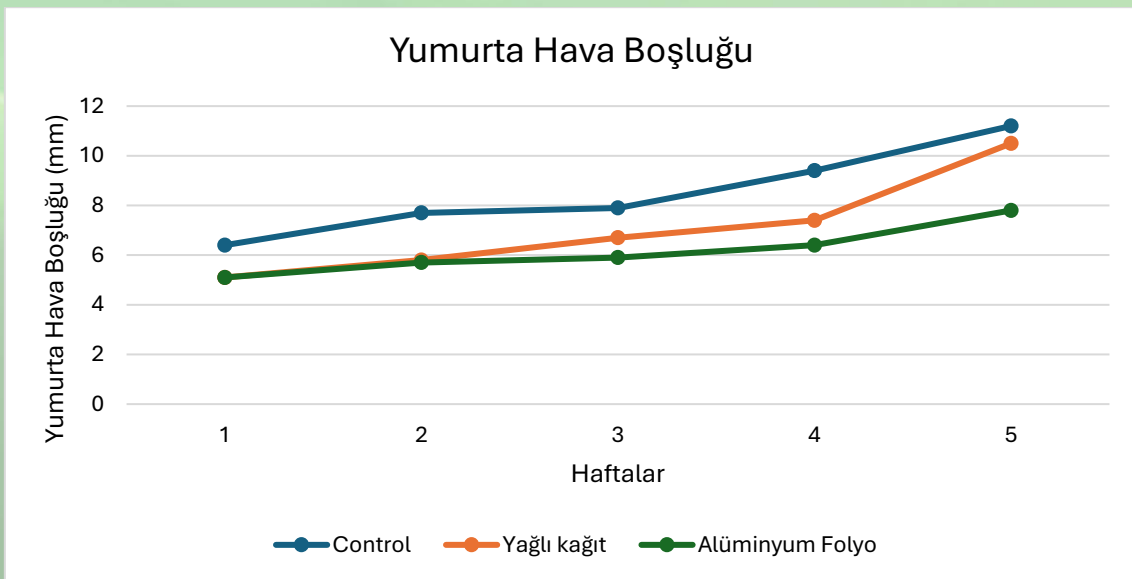




Şekil 4: Yumurta örneklerinin depolama süresinde ağırlık kaybı

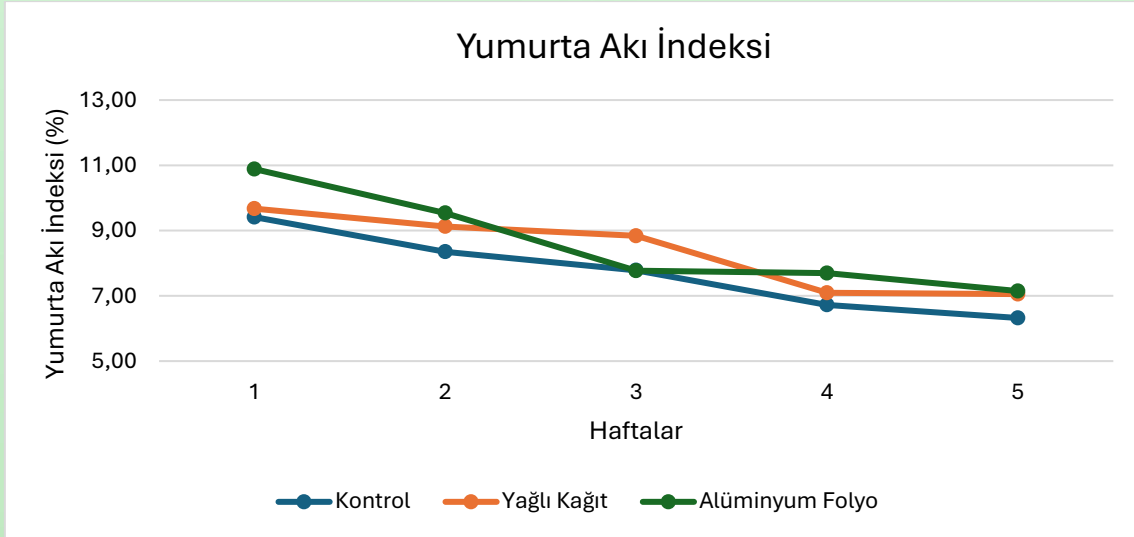


Şekil 5: Yumurta örneklerinin depolama süresince kabuk kalınlığı

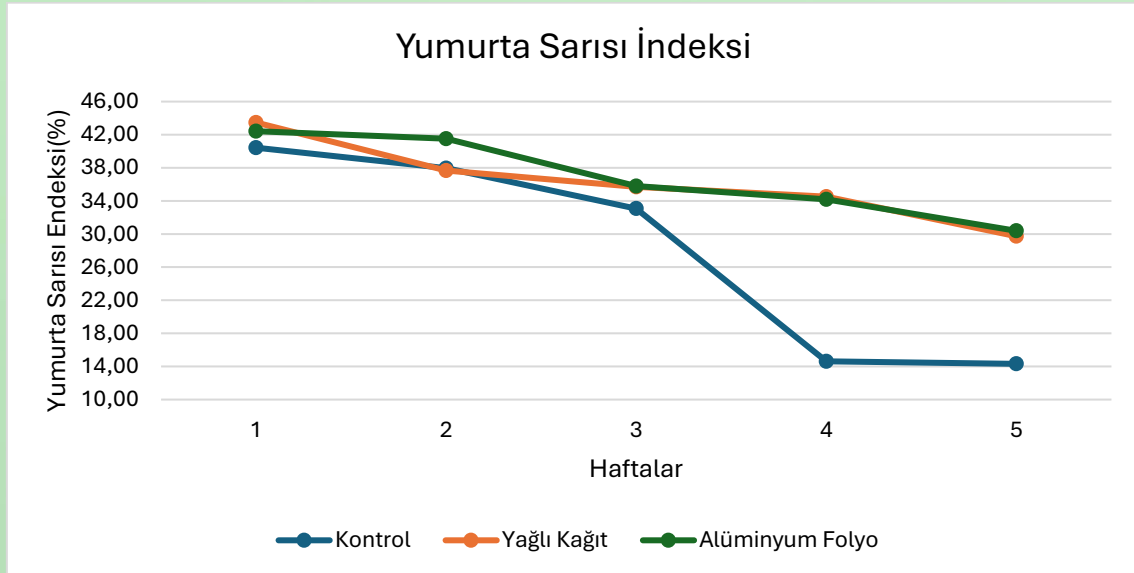


Şekil 6: Yumurta örneklerinin depolama süresince iç hava boşluğundaki değişimi





Şekil 7: Yumurta örneklerinin depolama süresince Ak indeksindeki değişimi



Şekil 8: Yumurta örneklerinin depolama süresince Sarı indeksindeki değişimi

Yumurtaların sınıflandırılmasında Haugh birimi (HU) esas alınmaktadır. $HU \geq 72$ AA, 71-60 A, 59-31 B ve <30 C olarak gruplandırılmaktadır. Çalışma sonuçlarımıza bakıldığında; başlangıçta A sınıfında olan yumurtalar kontrol grubu 2. haftadan itibaren bir alt grup olan B sınıfına düşerek 3. haftayı geçerken C sınıfının da altına düşmüştür. 5 haftalık bu süreçte nanokaplanan yumurtalar sadece 1 sınıf değer kaybetmişlerdir. Bu durumda nano kaplamanın yumurta HU birimini önemli ölçüde koruyabilmiştir.

Çalışmada; yumurta ak indeksi (Şekil 7) kontrol örneğinde 4. haftaya doğru düşük kalite sınıfına girerken nanokaplananlar orta kalitede kalabilmiştir.

Sarı indeksinde (Şekil 8) ise 3. haftadan itibaren kontrol grubu düşük kalite sergilerken yine nanokaplanan yumurta örnekleri orta kalite sınıfını koruyabilmiştir.

Yumurtanın Mikrobiyolojik Analiz Sonuçları

Yumurta, hem üretici hem de tüketici için mikrobiyolojik açıdan güvenilir olmalıdır. Üretim hattı olarak değerlendirdiğinde yumurta kontaminasyona maruz kalan ve sonrasında da içeriğindeki zenginliği sayesinde bulaşa çok müsait bir gıda konumundadır. Yumurtlama olduktan sonra yumurtanın bulunduğu ortam şartları ve tüketiciye ulaşana kadar geçen süreçteki taşıma muhafaza koşulları bulaşa ve var olan kontamine mikroorganizmaların üremesine olanak sağlayabilmektedir. Yumurtanın kendini belirli bir savunma sistemi (kütikula tabakası, avidin ve lizozim enzimi vb.) olduğu bilinmektedir (Yüceer ve Caner 2013; Chousalkar ve ark., 2021). Ancak ticari kazanç hırsı yumurtaların yeterince kabuk ve zar kısımlarının oluşmadan kısa sürelerde yumurtlama olmasını istemektedirler. Bu durumda ince kabuk ve hasar görmesi daha muhtemel yumurtalar oluşmaktadır. Sonuç olarak; hem mikrobiyal anlamda güvenilir hem de kalite özellikleri korunmuş yumurta istenmektedir.

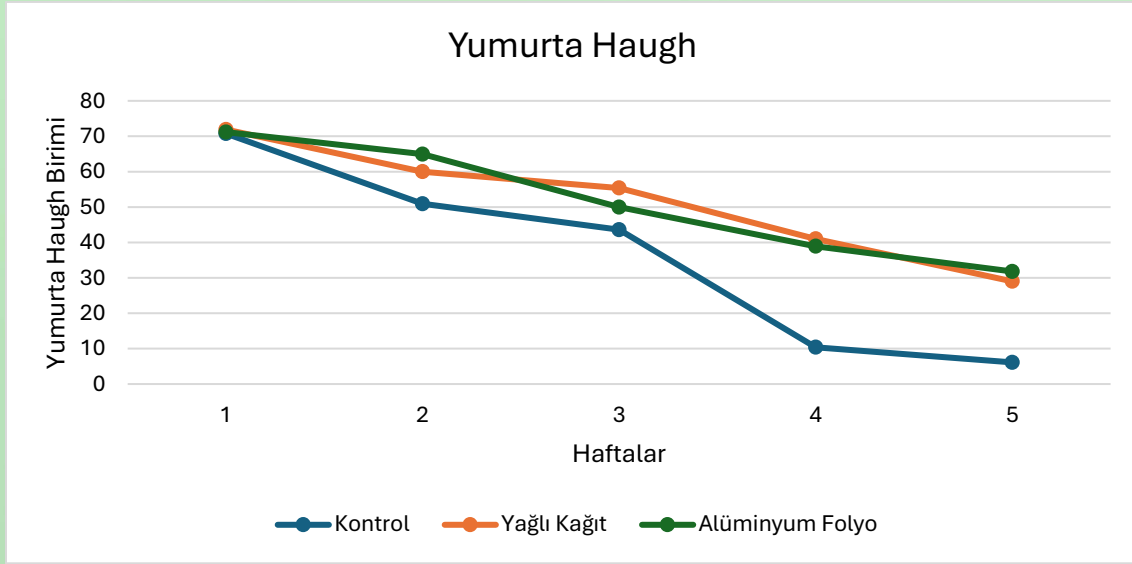


Kanatlı hayvanlar, *Salmonella* spp. patojeni için doğal bir rezervuar teşkil etmekte olup; söz konusu kontaminasyon, çevresel yollarla veya yumurta oluşumu esnasında içsel olarak şekillenebilmektedir. Bu çalışmada, hem çevresel faktörler hem de içsel fizyolojik süreçlerden kaynaklanan kontaminasyon mekanizmaları neticesinde, yumurta kabuk yüzeyinde yaklaşık 5 log CFU/mL düzeyinde yüksek bir bakteriyel popülasyon tespit edilmiştir. Elde edilen bu kritik mikrobiyal yük, yumurtanın muhafaza sürecinde patojenlerin kabuk bariyerini aşarak iç yapılara penetrasyon riski taşıdığını ve halk sağlığı açısından ciddi bir gıda güvenliği tehdidi oluşturduğunu doğrulamaktadır (Aguiar ve ark., 2026).

Yumurta örnekleri, depolama boyunca materyal metot kısmında anlatıldığı gibi *Salmonella Typhimurium* ve Toplam Aerobik Bakteri Sayısı yönüyle analiz edilmiştir. Analiz veri sonuçları Tablo 1’de sergilenmiştir.

Çalışmada; lavanta ekstresi nanokapsüle edilen materyal *Salmonella* sp. üzerine 9mm’lik zon çapında antimikrobiyal etki göstermiştir.

Yumurtanın mikrobiyolojik analiz sonuçlarında; Tablo 1 ve Şekil 10 birlikte değerlendirildiğinde antimikrobiyal aktivitesi olduğu bilinen lavanta ekstresinin elektrospin yöntemiyle ile nanolif oluşturularak antimikrobiyal etkinliği artırıldığı görülmektedir. Tablo 1, detaylıca incelendiğinde kontrol örneklerinde hem *Salmonella* hem de toplam bakteri sayısının depolama boyunca yüksek oranda görüldüğü ancak çalışmanın 2. haftasından itibaren nano uygulanan örnek yumurtalarda mikrobiyal güvenliğin sağlandığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak uygulanan nanoteknolojik işlemin yumurta mikrobiyal güvenliğini sağlayarak paralelinde diğer kalite paralelinde de iyileşme sağladığı ortaya konulmuştur.

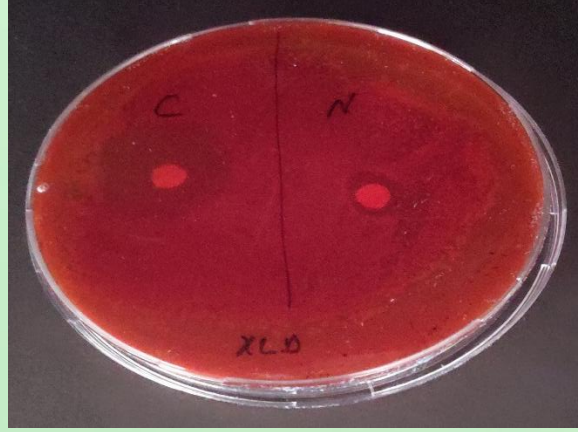


Şekil 9: Yumurta örneklerinin depolama süresince Haugh birimi değişimi

Tablo 1: Yumurta örneklerinin mikrobiyolojik analiz sonuçları

Uygulama Grupları	Depolama Süresi (Hafta)	<i>Salmonella Typhimurium</i> (CFU/ml)	Toplam Aerobik Bakteri Sayısı (TAB, CFU/ml)
Kontrol	1	4.3±0.01	4.15±0.02
	2	4.3±0.03	4.47±0.02
	3	4.2±0.05	4.76±0.01
	4	4.2±0.01	4.62±0.04
	5	4.1±0.06	4.88±0.05
Fırın kağıdı	1	4.3±0.04	4.32±0.08
	2	3.2±0.02	3.34±0.04
	3	1.1±0.05	3.23±0.01
	4	1.0±0.01	3.12±0.01
	5	-	2.94±0.06
Alüminyum folyo	1	4.3±0.04	3.89±0.05
	2	2.6±0.05	3.41±0.04
	3	1.2±0.04	3.21±0.05
	4	1.0±0.05	3.15±0.01
	5	-	2.76±0.07





Şekil 10: *Salmonella Typhimurium* üzerine antimikrobiyal test uygulaması (C: pozitif kontrol gentamisin sülfat, 20g/ml; N: lavanta ekstresinin Nanoenkapsüle edilmiş hali, 5 mm'lik disk)

Sonuç

Yumurta nanoenkapsülasyonunda kullanılan maddenin karakterizasyon sonuçları; elektroegirme yöntemiyle ortalama 230,09 nm çapında üniform nanoliflerin başarıyla üretildiğini göstermiştir. Nanoliflerin termal kararlılığı, yumurta muhafaza uygulamalarında test edilen sıcaklık sınırları içerisinde yapısal bir bozunma sergilememiştir. Ayrıca FTIR analizlerinde, lavanta uçucu yağına özgü karakteristik spektral bantların net bir şekilde tespit edilmesi, biyoaktif bileşenlerin polimerik matris içerisinde kimyasal bütünlüklerini kaybetmeden başarıyla enkapsüle edildiğini kanıtlamaktadır. Kontrol grubu numunelerine (nano uygulama yapılmamış) kıyasla, 35 günlük depolama süresi boyunca yumurta numunelerindeki toplam aerobik bakteri üremesi %31,9'a (1,38 log CFU/g) kadar engellenmiştir. ST büyümesini; alüminyum folyoda 3,2 log CFU/g ve yağlı kağıtta 2,6 log CFU/g'ye kadar engellediği gösterilmiştir. Uygulanan nanoenkapsülasyon yöntemi kabuk kalınlığını etkilemeksizin ağırlık kaybını azaltırken; kontrole oranla ak indeksi, sarı indeksi ve Haugh birimi gibi kritik kalite parametrelerini yüksek düzeyde korumuştur. Lavanta ekstraktı içeren nanofiber uygulaması, yumurtaların kalite parametrelerini koruyan ve mikrobiyolojik güvenliğini artıran, gıda sanayine uygulanabilir etkin bir nanoteknolojik strateji olarak ortaya konmuştur.

Beyanlar

Etik Onay Belgesi

Bu çalışmanın deneysel prosedürlerinin uygulanmasında etik onaya ihtiyaç duyulmamıştır.

Yazar Katkı Beyanı

Abdullah Demirci, corresponding yazar; veri toplama, araştırma, biçimsel analiz, yazım ve idüzenlemeden sorumludur.

Finansman Beyanı

Çalışma bir kurum/kuruluş tarafından desteklenmemiştir.

Çıkar Çatışması

Abdullah Demirci, corresponding yazar, “Herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.”

Kaynaklar

- Aguiar, N. T., da Silva, E. P., Nascimento, C. A., Alves, K. F., da Costa, L. B., & Ribeiro-Júnior, J. C. (2026). Microbiological quality and *Salmonella*-related food safety risks in commercial and free-range eggs. *Food Control*, 171, 112083. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.112083>
- Ceylan, Z., & Meral, R. (2023). A practiced nanobiotechnology approach with the scope of nutrition, food safety, dietetics, gastronomy, and sustainability for humans by fish meat and fish products preservation. *Annals of Animal Science*, 23(4), 985-994. <https://doi.org/10.2478/aoas-2023-0037>
- Chousalkar, K. K., Khan, S., & McWhorter, A. R. (2021). Microbial quality, safety and storage of eggs. *Current Opinion in Food Science*, 38, 91-95. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.11.003>
- Demirci, A. (2026, June). *Nanoteknoloji ile Yumurtanın Kalite Özelliklerinin Korunması* [Özet]. International Anatolian Agriculture, Food, Environment and Biology Congress, Konya, Türkiye. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2026.agrifood.0622>





- Demirci, A., Ocak, E., & Ceylan, Z. (2024). A new nanobiotechnology material for yogurt samples: Characterized nanotubes-*Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*. *Food Bioscience*, 59, 104178. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104178>
- Demirci, A., Ocak, E., & Ceylan, Z. (2025). Protein-based preservative nanotube: Viability of yogurt bacteria in different environments. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 96, 104213. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.104213>
- Englmaierová, M., Tůmová, E., Charvátová, V., & Skřivan, M. (2014). Effects of laying hens housing system on laying performance, egg quality characteristics and egg microbial contamination. *Czech Journal of Animal Science*, 59(8), 345-352. <https://doi.org/10.17221/7631-CJAS>
- Gole, V. C., Chousalkar, K. K., Roberts, J. R., Sexton, M., May, D., Tan, J., & Kiermeier, A. (2014). Effect of egg washing and correlation between eggshell characteristics and egg penetration by various *Salmonella* Typhimurium strains. *PLoS ONE*, 9(4), e90987. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090987>
- ISO. (2017). *Microbiology of the food chain — Preparation of test samples, initial suspension and decimal dilutions for microbiological examination — Part 1: General rules for the preparation of the initial suspension and decimal dilutions* (ISO Standard No. 6887-1:2017). International Organization for Standardization. <https://doi.org/10.31220/iso.std.6887.-1.2017>
- Karadal, F., Onmaz, N. E., Hızlısoy, H., Yıldırım, Y., Al, S., Gönülalan, Z., & Ülger, İ. (2018). Niğde ve Kayseri’de satışa sunulan köy ve market yumurtalarının mikrobiyolojik kalitesi. *Erciyes Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 15(1), 51-57. <https://doi.org/10.32707/ercivet.411623>
- Kovacs-Nolan, J., Phillips, M., & Mine, Y. (2005). Advances in the value of eggs and egg components for human health. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(22), 8421-8431. <https://doi.org/10.1021/jf050964a>
- Pal, M., & Molnár, J. (2021). The role of eggs as an important source of nutrition in human health. *International Journal of Food Science and Agriculture*, 5(1), 112-121. <https://doi.org/10.26855/ijfsa.2021.03.016>
- Sanei-Dehkordi, A., Abdollahi, A., Montaseri, Z., Safari, M., Rostami Chaijan, M., & Osanloo, M. (2023). Lavender and geranium essential oil-loaded nanogels with promising repellent and antibacterial effects. *Psyche: A Journal of Entomology*, 2023, Article ID 9911066. <https://doi.org/10.1155/2023/9911066>
- Sastia, E. D., Johan, A., & Royani, I. (2025). Serat nanofiber berbasis PVA dengan penambahan ekstrak daun pepaya dan sirsak: Tinjauan sistematis dalam perspektif nanoteknologi. *Jurnal Penelitian Sains*, 27(3), 164-172. <https://doi.org/10.58578/jps.v27i3.1402>
- Tarhan, İ., Çelikten, Ş., Kestek, H. M., Çelik, B., Öner, M., Kenar, A., & Kara, H. (2023). Development of a new and rapid FTIR method using chemometric modeling techniques for the determination of lavandin adulteration in lavender essential oil. *Vibrational Spectroscopy*, 127, 103559. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2023.103559>
- Wenke, E. J. (2009). *Comparison of recovery and enumeration of Escherichia coli, Cronobacter species, coliforms, and Salmonella Typhimurium in ground beef and ground turkey using conventional methods and a new chromogenic medium, ECA Check Easygelplus* (Doctoral dissertation, Kansas State University). K-State Research Exchange. <https://doi.org/10.20944/hdl.handle.net/2097/1628>
- Yüceer, M., & Caner, C. (2013). Lizozim-kitosan bazlı antimikrobiyal kaplama uygulamasının taze yumurtanın mikrobiyolojik kalitesi üzerine etkisi. *Akademik Gıda*, 11(1), 40-45. <https://doi.org/10.37965/ajfs.v11i1.2291>

