



**ZNO VE POLİSAKKARİT İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KARABİBER ESANSİYEL
YAĞI NANOEMÜLSİYONUyla KAPLANMIŞ TAVUK ETİNİN KALİTE
ÖZELLİKLERİNİN VE RAF ÖMRÜNÜN ARAŞTIRILMASI**

Syeda Tasmia ASMA
Doktora Tezi
Danışman: Prof. Dr. Zeki GÜRLER
Tez No:2025-010
Afyonkarahisar

**T.C.
AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BESİN/GIDA HİJYENİ VE TEKNOLOJİSİ ANA BİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

**ZNO VE POLİSAKKARİT İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KARABİBER ESANSİYEL
YAĞI NANOEMÜLSİYONUyla KAPLANMIŞ TAVUK ETİNİN KALİTE
ÖZELLİKLERİNİN VE RAF ÖMRÜNÜN ARAŞTIRILMASI**

Hazırlayan
Syeda Tasmia ASMA

Danışman
Prof. Dr. Zeki GÜRLER

Tez No: 2025-010

AFYONKARAHİSAR

Bu tez çalışması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri

Koordinasyon Birimi (BAPK) Tarafından Desteklenmiştir.

Proje No: “24.SAĞ.BİL.07 ”

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİMİ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Sağlık Bilimleri Enstitüsü

Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Bilimsel Yayın Etiği İlkeleri ve Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada:

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallara uygun olarak sunduğum,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda, ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Bu tezin herhangi bir bölümünü Afyon Kocatepe Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı.

Beyan ederim.

22/12/2025

Syeda Tasmia ASMA

ÖZET

ZNO VE POLİSAKKARİT İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KARABİBER ESANSİYEL YAĞI NANOEMÜLSİYONUyla KAPLANMIŞ TAVUK ETİNİN KALİTE ÖZELLİKLERİNİN VE RAF ÖMRÜNÜN ARAŞTIRILMASI

Tavuk eti, erişilebilirliği ve yüksek besin değeri nedeniyle dünya genelinde önemli bir gıda ürünü ve en yaygın tüketilen protein kaynaklarından biridir. Ancak yüksek su aktivitesi ve zengin besin içeriği, mikrobiyal bozulma ve lipit oksidasyonuna yatkın olmasına neden olmakta; bu durum organoleptik kalitede ciddi bir düşüşe yol açarak önemli gıda güvenliği endişeleri doğurmaktadır. Bu nedenle etkili gıda muhafaza stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma, tavuk etinin kalitesini korumak ve raf ömrünü uzatmak amacıyla yeni bir antimikrobiyal ve antioksidan çözümün geliştirilmesini değerlendirmektedir.

Kara biber uçucu yağı (BPEO) bazlı nanoemülsiyon (NE), çinko oksit nanopartikülleri (ZnO NPs) ve yenilebilir bir polisakkarit kaplama ilavesiyle zenginleştirilerek, et kalitesinin korunması ve raf ömrünün uzatılması amacıyla önemli bir strateji olarak kullanılmıştır. Kara biber uçucu yağı; 3-karen, D-limonen, karyofillen, β -pinen ve α -pinen gibi güçlü antimikrobiyal ve antioksidan aktivite gösteren biyoaktif bileşenler içermektedir. Ancak yüksek uçuculuğu ve suda düşük çözünürlüğü, doğrudan uygulanmasının başlıca sınırlamalarıdır.

Kara biber uçucu yağı bazlı nanoemülsiyon (BPEONE), düşük enerjili emülsiyon faz tersinimi emülsifikasyon yöntemiyle sentezlenmiştir. Optimizasyon sonucunda, ortalama damlacık boyutu 120 ± 73 nm ve polidispersite indeksi 0,261 olan kararlı bir nanoemülsiyon elde edilmiştir. ZnO NP'lerin BPEONE ile birlikte kullanımı, mikroorganizmalara karşı antimikrobiyal etkinliği önemli ölçüde artırmıştır. Koruyuculuk etkinliği testlerinden elde edilen sonuçlar, ZnO NP ve BPEONE ile kaplanan tavuk örneklerinin, kaplamasız kontrol grubuna ve yalnızca BPEONE veya BPEO ile kaplanan örneklerle kıyasla anlamlı derecede daha düşük mikrobiyal yüke sahip olduğunu göstermiştir. Özellikle, soğukta depolamanın 16. gününde toplam canlı

sayısının (TVC), kontrol grubunda $8,40 \times 10^6$ CFU/g iken ZnO NP + BPEONE kaplamalı örneklerde yaklaşık $4,77 \times 10^6$ CFU/g seviyesine düştüğü belirlenmiştir.

Buna ek olarak, nano-formülasyon kaplama, lipid oksidasyonunun baskılanmasında da etkili olmuş; 16 günlük depolama sonunda tiyobarbitürik asit reaktif maddeleri (TBARS) değerleri, kontrol grubunda $2,73 \pm 0,13$ mg MDA/kg iken ZnO NP + BPEONE kaplamasında $0,68 \pm 0,09$ mg MDA/kg seviyesine düşmüştür. Daha da önemlisi, uygulanan işlem tavuk etinin renk, doku ve lezzet gibi organoleptik özelliklerini koruyarak, kontrol grubuna kıyasla depolamanın 12. gününe kadar kabul edilebilir duyusal puanların muhafaza edilmesini sağlamıştır. Polisakkarit bir matriste BPEONE ve ZnO NP'lerin bu nano-formülasyonu, et muhafazasının geliştirilmesi için sürdürülebilir, etkili ve temiz etiketli bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: BPEO, Nanoemülsiyon, ZnO Nanopartikülleri, Tavuk etinin muhafazası

SUMMARY

FABRICATION OF BLACK PEPPER ESSENTIAL OIL BASED NANOEMULSIONS FORTIFICATED WITH ZNO AND POLYSACCHARIDE COATING FOR IMPROVING THE ORGANOLEPTIC CHARACTERISTICS AND SHELF LIFE OF CHICKEN MEAT

Chicken meat is a major commodity worldwide and one of the most widely consumed protein sources due to its accessibility and high nutritional value. However, its high water activity and high nutrient content make it prone to microbial spoilage and lipid oxidation, resulting in a severe decline in organoleptic quality and raising serious food safety concerns, thereby necessitating effective food preservation strategies. This study addresses this requirement by evaluating the development of a novel antimicrobial and antioxidant solution for preserving the quality of chicken meat and improving its shelf life.

The black pepper essential oil (BPEO)-based nanoemulsion (NE), enriched by the addition of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) and an edible polysaccharide coating, was used as a significant strategy to maintain meat quality with extended shelf life. Black pepper essential oil contains bioactive compounds such as 3-carene, D-limonene, caryophyllene, β -pinene, and α -pinene, which exhibit influential antimicrobial and antioxidant activities. However, its high volatility and poor water solubility are the limitations for its direct application.

The BPEONE was synthesized by low-energy, emulsion phase inversion emulsification process. Optimization provided a stable NE with a mean droplet size of 120 ± 73 nm and a polydispersity index of 0.261. The incorporation of ZnO NPs along with BPEONE significantly enhanced the antimicrobial efficacy against microorganisms. Results from the preservation efficacy tests showed that the ZnO NP- and BPEONE-coated chicken samples had significantly lower microbial loads than the uncoated control sample and the samples coated with BPEONE and BPEO alone. Specifically, the total viable count

(TVC) was reduced by approximately 4.77×10^6 CFU/g, on the 16th day of refrigerated storage as compared to the control group with 8.40×10^6 CFU/g.

Furthermore, the nano-formulation coating was also effective in suppressing lipid oxidation, as indicated by a decrease in Thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) values, from 2.73 ± 0.13 mg MDA/kg (control group) to 0.68 ± 0.09 mg MDA/kg (ZnO NP+BPEONE coating) after 16 days of storage. Crucially, the treatment preserved the organoleptic qualities (i.e., color, texture, flavor) of the chicken meat, maintaining acceptable scores until the 12th day of storage, as compared to the control group. This nano-formulation of BPEONE and ZnO NPs in a polysaccharide matrix offers a sustainable, effective, and clean-label approach to enhancing meat preservation.

Keywords: BPEO, Nanoemulsion, ZnO Nanoparticles, Chicken preservation

ÖNSÖZ

Gıda Hijyeni ve Teknolojisi Bölümü Başkanı ve danışmanım Sayın **Prof. Dr. Zeki GÜRLER'e** derin teşekkürlerimi sunarım. Onun seçkin rehberliği, sarsılmaz teşviki, yapıcı eleştirileri ve ilham verici motivasyonu, tüm doktora çalışmalarımın başarısında merkezi bir rol oynamıştır.

Bu projenin başarıyla tamamlanmasına önemli katkılarda bulunan değerli akademik rehberliği ile gerekli kaynakları ve **imkânları** sağladığı için, LUMS SBA - SSE Kimya ve Kimya Mühendisliği Bölümü'nden yardımcı danışmanım Sayın **Prof. Dr. Irshad HUSSAIN'e** en derin teşekkürlerimi sunarım.

LUMS, SBA - SSE, Kimya ve Kimya Mühendisliği Bölümü'nden baş araştırma bilimcisi olan mentorum Sayın **Syed Zajif HUSSAIN'e**, başarıma olan sürekli teşviki, titiz bilimsel bakış açısı, stratejik rehberliği ve sarsılmaz desteği için teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, eğitimim boyunca bana sağladığı paha biçilmez rehberlik ve motivasyon için Sayın **Prof. Recep KARA'ya** içten teşekkürlerimi sunarım. Bu zorlu yolculuk boyunca bana verdikleri sarsılmaz manevi destekten dolayı arkadaşlarım ve meslektaşlarım **Duygu UĞURLU, Aiman LAGHARI ve Muneeba SAMAR'a** da teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bana verdikleri sarsılmaz destek, sürekli duaları, motivasyonları ve koşulsuz sevgileri için **Anne ve Babam** ile **Kardeşlerime** içtenlikle teşekkür ederim. Onlar, tüm başarılarımın temelini oluşturan kayadır ve bu dönüm noktası benim olduğu kadar onların da başarısıdır.

Sabrı, sınırsız desteği ve bana olan koşulsuz inancı için **Eşime** içten teşekkürlerimi sunuyorum. Bu zorlu çabada sessiz ve kararlı bir ortak olarak, başarıyla bitiş çizgisine ulaşmam için ihtiyacım olan istikrarı ve sükûneti sağlamıştır.

Son olarak, bu çalışmada bana yardımcı olan ve başarıma için dualarını esirgemeyen herkese şükranlarımı sunmak istiyorum.

Bu çalışmadaki tüm hatalar ve yanlışlıklar tamamen bana aittir.

Syeda Tasmia Asma

Afyonkarahisar

2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
SUMMARY	iii
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER	xiii
ÇİZELGELER	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Kümes Hayvanı Eti Koruma Zorlukları	2
1.1.1. Kümes Hayvanı Eti Üretim Trendlerinin Küresel Önemi	2
1.1.2. Kümes Hayvanı Etinin Ekonomik ve Beslenme Açısından Önemi	3
1.1.3. İşlenmiş Tavuk Ürünlerine Artan Talep	4
1.2. Kümes Hayvanları Endüstrisindeki Zorluklar: Bozulma ve Güvenlik	5
1.2.1. Kümes Hayvanı Etinin Bozulabilirliği	5
1.2.2. Kümes Hayvanlarında Mikrobiyal Bozulma ve Gıda Kaynaklı Patojenler	6
1.2.3. Lipit Oksidasyonu ve Protein Bozunumu	7
1.2.4. Raf Ömrü Sınırlamaları ve Bozulma Göstergeleri	7
1.2.5. Tüketici Güvenliği ve Temiz Etiket Kısıtlamaları	8
1.2.6. İşleme ve Soğuk Zincir Zorlukları	8
1.3. Kümes Hayvanı Etlerinde Geleneksel Koruyucular ve Sınırlamaları	9
1.3.1. Kanatlı Ürünlerinde Yaygın Olarak Kullanılan Sentetik Koruyucular	10
1.3.2. Sağlık Riskleri ve Toksikolojik Endişeler	10
1.3.3. Tüketici Algısı ve Temiz Etiket Hareketi	11
1.4. Sentetik Koruyucuların Teknolojik Sınırlamaları	12
1.5. Doğal Alternatiflere Geçiş: Etkinlik Açığını Kapatmak	12
1.5.1. Doğal Antimikrobiyallere Geçiş	14
1.5.2. Doğal Alternatifler Olarak Uçucu Yağlar	15
1.6. Uçucu Yağların Etki Mekanizması	16
1.6.1. Antimikrobiyal Aktivite	16
1.6.2. Antioksidan Etkinlik	17
1.7. Ette EO'ların Antimikrobiyal Etkileri	18

1.8.	Etlerde Uçucu Yağların Kullanımındaki Sınırlamalar	19
1.9.	Gıda Muhafazası için Uçucu Yağların Nanoenkapsülasyonu	20
1.10.	Nanoemülsiyonlar ve İşlevsel Rol	25
1.11.	Nanoemülsiyonların Üretimi	26
1.12.	Bileşenler ve Hazırlama Yöntemleri	26
1.12.1.	Yüksek Enerji Yöntemleri	27
1.12.2.	Düşük Enerjili Yöntemler	27
1.13.	Nanoemülsiyonlarda Kararsızlık Olayları	28
1.14.	Uçucu Yağların ve Nanoemülsiyonların Güvenlik Profili	29
1.15.	Karabiber Esansiyel Yağı	30
1.15.1.	Karabiberin Biyoaktif Fitokomponentleri	30
1.16.	EO'nun Etkinliğini Etkileyen Faktörler	32
1.17.	BPEO'ya Nanoteknoloji Entegrasyonu	33
1.18.	Koruma için Entegre Sistemler Aracılığıyla İşlevsel Geliştirme	34
2.	MATERYAL VE METOT	36
2.1.	Materyal	36
2.1.1.	Ekipman Listesi	36
2.1.2.	Reaktif Hazırlama	37
2.1.3.	HCl çözeltileri	38
2.2.	METOT	39
2.2.1.	Görsel Süreç Akışı	39
2.3.	GC-MS ile Uçucu Bileşenlerin Analizi	39
2.4.	Karabiber Esansiyel Yağı Nanoemülsiyon Üretimi	40
2.5.	BPEO Nanoemülsiyonunun Karakterizasyonu	40
2.5.1.	Damlacık Boyutu ve Polidispersite İndeksi Belirlenmesi	41
2.5.2.	Bulanıklık (Türbidite) Analizi	41
2.5.3.	BPEONE'nin Morfoloji Analizi	41
2.6.	Enkapsülasyon Etkinliğinin Belirlenmesi (EE)	42
2.7.	Stabilite Analizi	43
2.7.1.	Oda Sıcaklığının Etkisi (Görsel Faz Ayrışması İzleme)	43
2.7.2.	Santrifüjleme Etkisi	43
2.7.3.	15°C'de Dondurmanın Etkisi	44

2.8.	ZnO Nanopartiküllerinin Sentezi	44
2.9.	ZnO NP'lerin karakterizasyonu	44
2.10.	Antimikrobiyal Aktivite Analizi	45
2.10.1.	Kültür Hazırlama	45
2.10.2.	Disk Difüzyon Yöntemi ile Antibakteriyel Test	45
2.10.3.	Minimum İnhibisyon Konsantrasyonu Belirlenmesi	46
2.11.	Yenilebilir Nişasta Kaplama Çözeltisinin Hazırlanması	47
2.12.	Tavuk Muhafazası	49
2.13.	Fizikokimyasal Analiz	49
2.13.1.	Lipit Oksidasyonu	50
2.13.2.	pH Tayini	50
2.14.	Duyusal Analiz	50
2.15.	Tavuk Etinin Mikrobiyolojik Kalitesi	53
2.15.1.	Seri Seyreltmelerin Hazırlanması	53
2.15.2.	Mikrobiyolojik Analiz	53
2.16.	İstatistiksel Analiz	54
3.	SONUÇ	55
3.1.	GC-MS ile Uçucu Bileşenlerin Analizi	55
3.2.	Karabiber Esansiyel Yağı Nanoemülsiyon Üretimi	57
3.3.	BPEO Nanoemülsiyonun Karakterizasyonu	57
3.3.1.	Damlacık Boyutu ve Zeta Potansiyeli Belirleme	57
3.3.2.	Bulanıklık (Türbidite) Analizi	67
3.3.3.	Nanoemülsiyon Morfoloji Analizi	68
3.4.	Enkapsülasyon Etkinliğinin Belirlenmesi	70
3.5.	Stabilite Analizi	71
3.5.1.	Görsel Faz Ayrışması	71
3.5.2.	Santrifüjün Etkisi	72
3.6.	ZnO Nanopartiküllerinin Sentezi ve Karakterizasyonu	73
3.6.1.	Parçacık Boyutu ve Zeta Potansiyeli Analizi	73
3.6.2.	XRD Analizi	74
3.6.3.	SEM Analizi	75
3.6.4.	Enerji Dağıtıcı X-ışını spektroskopisi	75

3.7.	Antimikrobiyal Aktivite Analizi	77
3.7.1.	Kültür Hazırlama	77
3.7.2.	Disk Difüzyon Yöntemi ile Antibakteriyel Test	77
3.7.3.	Minimum İnhibisyon Konsantrasyonu Tayini	78
3.8.	Tavuk Koruma	79
3.8.1.	Fiziksel-kimyasal analiz	79
3.8.2.	Duyusal analiz	83
3.9.	Mikrobiyolojik Analiz	85
3.9.1.	Toplam Canlı Sayısı (TVC)	85
3.9.2.	Enterobacteriaceae Analizi	87
3.9.3.	Psikrotrofik Bakteriyel Analiz	89
3.9.4.	Küf ve Maya	91
3.9.5.	Laktik Asit Bakterileri (LAB)	93
3.9.6.	Salmonella spp.	95
3.9.7.	Antimikrobiyal Potansiyel	96
4.	TARTIŞMA	97
4.1.	GC-MS ile Uçucu Bileşenlerin Analizi	97
4.2.	BPEO Nanoemülsiyon Üretimi	98
4.3.	BPEO Nanoemülsiyon Karakterizasyonu	99
4.4.	Enkapsülasyon Etkinliğinin	103
4.5.	ZnO NP'lerin Sentezi ve Karakterizasyonu	103
4.6.	Fiziko-kimyasal Analiz	105
4.7.	Duyusal Analiz	106
4.8.	Mikrobiyolojik Analiz	106
5.	SONUÇ	109
6.	KAYNAKLAR	111

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ADI:	Kabul Edilebilir Günlük Alım Miktarı
Au:	Altın
BHA:	Butil Hidroksianisol
BHT:	Butil Hidroksitoluen
BPEO:	Karabiber Esansiyel Yağı
BPEONE:	Karabiber Esansiyel Yağı Nanoemülsiyonu
C:	Karbon
CAC:	Codex Alimentarius Komisyonu
CaO:	Kanola Yağı
CEO:	Tarçın Esansiyel Yağı
CFU:	Koloni Oluşturan Birim
CoE:	Avrupa Konseyi
CTAB:	Setiltrimetilamonyum Bromür
Cu:	Bakır
EDX:	Enerji Dağıtıcı X-Işını Spektroskopisi
EO:	Uçucu Yağ
EPI:	Emülsiyon Faz Tersinimi
FAO:	Gıda ve Tarım Örgütü
FCC:	Gıda Kimyası Kodeksi
FDA:	Gıda ve İlaç İdaresi
FEMA:	Aroma ve Ekstrakt Üreticileri Birliği
GC-MS:	Gaz Kromatografisi-Kütle Spektrometresi
GRAS:	Genel Olarak Güvenli Olarak Kabul Edilen
IARC:	Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı
IOFI:	Uluslararası Aroma Endüstrileri Örgütü
LD₅₀:	Ortalama Ölümcül Doz
MAP:	Modifiye Aktif Ambalajlama
MDA:	Malonaldehit
MIC:	Minimum İnhibisyon Konsantrasyonu
NE:	Nanoemülsiyon
O/W:	Suda Yağ
OmpW:	Dış Membran Proteini W

O:	Oksijen
OR:	Ostwald Olgunlaşması.
PAEO:	<i>Pimpinella Anisum</i> EO
PDI:	Polidispersite İndeksi
PEO:	<i>Petroselinum Crispum</i> Esansiyel Yağı
PIC:	Faz Tersine Çevirme Bileşimi
PIT:	Faz Tersine Çevirme Sıcaklığı
PUFA'lar:	Çoklu Doymamış Yağ Asitleri
RAEng:	Kraliyet Mühendislik Akademisi
ROS:	Reaktif Oksijen Türleri
RPM:	Dakikadaki Devir Sayısı
SBEO:	<i>Satureja Bachtiarica</i> Esansiyel Yağı
SCCS:	Tüketici Güvenliği Bilimsel Komitesi
SCHEER:	Sağlık, Çevre ve Ortaya Çıkan Riskler Bilimsel Komitesi
SEM:	Tarayıcı Elektron Mikroskobu
SOR:	Sürfaktan-Yağ Oranı
TBARS:	Tiyobarbitürik Asit Reaktif Maddeler
TEM:	Geçirimli (Transmission) Elektron Mikroskobu
TEO:	Kekik Esansiyel Yağı
TVC:	Toplam Canlı Sayısı
W/O:	Su-Yağ
WHO:	Dünya Sağlık Örgütü
XRD:	X-ışını difraktometresi
ZIN:	İnhibisyon Bölgesi
Zn:	Çinko
Zn O NP'ler:	Çinko Oksit Nanopartiküller
µm:	Mikrometre
nm:	Nanometre
mm:	Milimetre
kV:	Kilovolt
mV:	Mili volt
mL:	Mililitre
µL:	Mikrolitre

Kg:	Kilogram
g:	Gram
mg:	Miligram
µg:	Mikrogram
psi:	İnç Kare Başına Pound
ppm:	Milyonda Parça



ŞEKİLLER

Şekil 1.1: Karabiber esansiyel yağında yaygın olarak bulunan bazı biyoaktif bileşiklerin kimyasal yapıları.	31
Şekil 2.1: BPEO nanoemülsiyon ve ZnO nanopartikül sentezinden yenilebilir kaplamanın formülasyonuna ve tavuk etine uygulanmasına kadar olan sıralı süreci gösteren akış şeması.	39
Şekil 2.2: Hazırlanan işlem protokolünün tavuk etine uygulanması.	49
Şekil 3.1: BPEO Nanoemülsiyonlar.	58
Şekil 3.2: %10, %15 ve %20 BPEO nanoemülsiyonlarının damlacık boyutu ve polidispersite indeksi sonuçları.	62
Şekil 3.3: %10, %15 ve %20 BPEO nanoemülsiyonlarının zeta potansiyeli sonuçları.	63
Şekil 3.4: Dondurulmuş %10, %15 ve %20 BPEO nanoemülsiyonlarının damlacık boyutu ve polidispersite indeksi sonuçları.	65
Şekil 3.5: Dondurulmuş %10, %15 ve %20 BPEO nanoemülsiyonlarının zeta potansiyeli sonuçları.	66
Şekil 3.6: Hazırlanan nanoemülsiyonların geçirimli elektron mikrografları.	68
Şekil 3.7: Damlacık boyutu dağılım sıklığının histogramları.	69
Şekil 3.8: Faz ayrışması belirtisi göstermeyen BPEO nanoemülsiyonu.	71
Şekil 3.9: A) ZnO NP'lerin parçacık boyutu ve polidispersite indeksi sonucu, B) ZnO NP'lerin Zeta Potansiyeli sonucu.	73
Şekil 3.10: Hidrotermal yöntemle sentezlenen ZnO NP'lerin X-ışını difraktogramı.	74
Şekil 3.11: Hazırlanan ZnO NP'lerin taramalı elektron mikroskobu: daha yüksek büyütmede (500 µm) ve 5 µm büyütmede.	75
Şekil 3.12: ZnO NP'lerin element piklerini gösteren EDX spektrumu.	76
Şekil 3.13: Hidrotermal olarak hazırlanan ZnO NP'lerin EDX haritalaması.	76
Şekil 3.14: Staphylococcus aureus ve Escherichia coli bakteriyel kültürleri.	77
Şekil 3.15: BPEONE'nin MHA üzerinde A) E. coli ve B) S. aureus'a karşı antibakteriyel etkisi.	78
Şekil 3.16: Farklı formülasyonlarla işlenmiş tavuk etinin tiyobarbitürik asit (mg MDA/kg) değerleri.	80

Şekil 3.17: Formülasyonların tavuk etinin pH'ı üzerindeki etkisi.	82
Şekil 3.18: Formülasyonların tavuk etinin lezzeti üzerindeki etkisi.	83
Şekil 3.19: Formülasyonların tavuk etinin dokusu üzerindeki etkisi.	84
Şekil 3.20: Formülasyonların tavuk etinin rengi üzerinde etkisi.	84
Şekil 3.21: Formülasyonların toplam canlı sayı üzerindeki etkisi.	85
Şekil 3.22: Formülasyonların Enterobacteriaceae üzerindeki etkisi.	87
Şekil 3.23: Formülasyonların psikrotrofik bakteriler üzerindeki etkisi.	89
Şekil 3.24: Formülasyonların küf ve mayalar üzerindeki etkisi.	91
Şekil 3.25: Formülasyonların laktik asit bakterileri üzerindeki etkisi.	93
Şekil 3.26: Formülasyonların Salmonella spp. üzerindeki etkisi.	95
Şekil 3.27: Tüm formülasyonların karşılaştırmalı antimmikrobiyal potansiyel (%).	96

ÇİZELGELER

Çizelge 1.1: Yaygın olarak kullanılan bazı koruyucular, kabul edilebilir günlük alım miktarları ve ilgili tehlikeler/riskler.	9
Çizelge 1.2: Tavuk eti muhafazasında antimikrobiyal ve antioksidan aktiviteleri olan uçucu yağlara dayalı son çalışmalar.	21
Çizelge 1.3: Gıda Sistemlerinde Uçucu Yağların Etkinliğini Etkileyen Faktörler.	33
Çizelge 2.1: Normal salinin bileşimi.	37
Çizelge 2.2: 5M – NaOH bileşimi.	37
Çizelge 2.3: 1M – NaOH bileşimi.	38
Çizelge 2.4: 0,1 M – NaOH bileşimi.	38
Çizelge 2.5: 5M – HCl bileşimi.	38
Çizelge 2.6: 1M – HCl bileşimi.	38
Çizelge 2.7: 0,1 M – HCl bileşimi.	38
Çizelge 2.8: Yenilebilir kaplama formülasyonunda kullanılan bileşenlerin önemli özellikleri ve et muhafazasında işlevleri.	47
Çizelge 2.9: Tavuk muhafazası için kaplama formülasyonları.	48
Çizelge 3.1: BPEO'nun GC-MS analizi.	56
Çizelge 3.2: Damlacık boyutu, polidispersite indeksi ve zeta potansiyeli belirleme.	59
Çizelge 3.3: %10, %15 ve %20 BPEO nanoemülsiyonlarının bulanıklık analizi.	67
Çizelge 3.4: 4 haftaya kadar BPEO nanoemülsiyonunun yükleme.	70
Çizelge 3.5: Santrifüjlemenin BPEO nanoemülsiyonlarının bulanıklığına etkisi.	72
Çizelge 3.6: BPEONE seyreltilerinin inhibisyon bölgeleri.	78
Çizelge 3.7: Minimum inhibitör konsantrasyon belirleme.	78
Çizelge 3.8: Tiyobarbitürik asit (mg MDA/kg), farklı formülasyonlarla işlenmiş tavuk etinin değerleri.	79
Çizelge 3.9: Formülasyonların tavuk etinin pH'ı üzerindeki etkisi.	81
Çizelge 3.10: Formülasyonların 16 günlük saklama süresi boyunca toplam canlı sayısına etkisi.	86
Çizelge 3.11: 16 günlük saklama süresi boyunca Enterobacteriaceae üzerinde formülasyonların etkisi.	88

Çizelge 3.12: Formülasyonların 16 günlük depolama süresince psikrotrofik bakteriler üzerindeki etkisi.	90
Çizelge 3.13: 16 günlük depolama süresince formülasyonların küf ve mayalar üzerindeki etkisi.	92
Çizelge 3.14: Formülasyonların 16 günlük depolama süresince laktik asit bakterileri üzerindeki etkisi.	94
Çizelge 3.15: Formülasyonların 16 günlük depolama süresince Salmonella spp. üzerindeki etkisi.	96



1. GİRİŞ

Kümes hayvanı eti, uygun fiyatı, besin değeri ve çeşitli mutfak hazırlıklarında çok yönlülüğüyle dünya çapında diyetlerin önemli bir parçası haline gelmiştir. Kümes hayvanı eti, dünya çapında oldukça popüler bir protein kaynağıdır. Esansiyel amino asitler de dahil olmak üzere yüksek biyolojik değere sahip yüksek miktarda protein içerir ve kırmızı etlere göre daha az yağ içerir. Hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerdeki insanlar için popüler bir seçim haline gelmiştir (Parisi ve Tignani, 2025). Modern tarım-gıda sisteminde, kısa üretim döngüsü ve yüksek yem dönüşüm verimliliği nedeniyle daha da cazip hale gelmiştir. Son yirmi yılda, küresel kümes hayvanı üretimi hızlı bir büyüme kaydetmiş ve et endüstrisinin en hızlı büyüyen parçası haline gelmiştir. Daha fazla insan şehirlere göç etmekte ve nüfus artmaktadır. Bu artış, tavuğun düşük maliyetli ve uygun bir protein kaynağı olarak hizmet verdiği Asya, Afrika ve Latin Amerika'da en kritik düzeydedir. Ancak, kümes hayvanları endüstrisi genişledikçe, etin tedarik zinciri boyunca güvenli, yüksek kaliteli ve raf ömrünün uzun olmasını sağlamak da aynı derecede önemlidir (Macedo, 2025).

Kümes hayvanı eti, yüksek nem oranı, zayıf protein yapısı ve bakterilerin gıdaya kolayca girebilmesi nedeniyle çabuk bozulur. Uygun şekilde saklanıp işlenmezse, kümes hayvanı eti birkaç saat içinde bozulmaya çok yatkındır. Sonuç olarak, bu durum gıda güvenliği, sağlık ve ekonomik açıdan son derece sakıncalıdır. Barmettler vd. (2025) göre, *Salmonella* spp. ve diğer bakteriler, özellikle soğuk zincirin sıkı bir şekilde korunmadığı yerlerde, satılan tavuklarda hala sıklıkla bulunmaktadır.

Koruma teknolojileri, sera gazı emisyonlarının başlıca nedenlerinden biri olan gıda israfının azaltılmasına da yardımcı olmaktadır. Biswas vd. (2019), etkili koruma yöntemleri ile hasat sonrası et kayıplarının önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermiştir. Düşük ve orta gelirli ülkelerde, etin önemli bir kısmı israf edilmektedir ve bu da ciddi bir ikilem oluşturmaktadır. Dünyada en yaygın olarak üretilen et, hızlı üreme ve çoğalma özelliği nedeniyle en yaygın olan kümes hayvanları etidir. Bu nedenle, tüm değer zincirlerine sağlam koruma stratejileri dahil etmek çok önemlidir.

1.1. Kümes Hayvanı Eti Koruma Zorlukları

1.1.1. Kümes Hayvanı Eti  retim Trendlerinin Küresel  nemi

Tavuk eti, uygun fiyatı, hazırlama kolaylığı ve kırmızı ete kıyasla sağladığı sağlık yararları nedeniyle dünyadaki gıda hiyerarşisinin en üstüne yükselmiştir. Son zamanlarda elde edilen ampirik veriler, soğuk hava depolama ve koruma sistemlerinin en uygun olmadığı gelişmekte olan ülkelerde kümes hayvanı üretiminin önemli ölçüde arttığını göstermektedir (Chermala vd., 2025; Abadula vd., 2022). Buna paralel olarak, koruma sadece işleme sonrası aşamada değil, çiftlikten perakende satış noktasına kadar tüm değer zinciri boyunca uygulanmalıdır. Tavuk luk sektörü, küresel gıda endüstrisinin en gelişmiş sektörlerinden biridir. Bu durum, biyolojik verimliliği, düşük üretim maliyetleri ve tüketiciler tarafından yüksek düzeyde kabul görmesi ile açıklanabilir (Mottet ve Tempio, 2017).

Tavuk, maliyet verimliliği, mutfak çeşitliliği ve hızlı üretim açısından sığır eti ve domuz etini geride bırakmıştır. Gıda ve Tarım  rg t 'ne (FAO) göre, küresel tavuk luk  retilimi 2023 yılında 146 milyon tona ulaşarak yıllık %1,9 artış göstermiş ve güçlü, çok yıllı bir büyüme eğilimini sürdürmüştür. Bu büyümenin ana itici gücü Asya olmuştur ve yaklaşık 1,5 milyon ton ekleyerek toplam  retilimi 58 milyon tona ulaştırmıştır. Özellikle, Afrika hariç tüm büyük bölgeler bu artışa katkıda bulunmuştur (FAO, 2024). En önemli artışlar Güneydoğu Asya, Brezilya ve Hindistan'da gerçekleşmiştir ve bu bölgeler büyümeye devam etmektedir. Mottet ve Tempio'ya (2017) göre, Çin ve Amerika Birleşik Devletleri birlikte dünya kümes hayvanlarının %40'ından fazlasını oluştırmaktadır. Kümes hayvanları endüstrisi, genetik iyileştirmeler, daha verimli yem kullanımı ve değer zincirinin dikey entegrasyonu sayesinde artık daha aktiftir (Zampiga vd., 2021).

Brezilya, dünyanın en büyük tavuk ihracatçısıdır. Tavuk luğu ucuz ve hastalık vakalarının sınırlı olduğu bir şekilde yürütme kabiliyeti, özellikle Asya ve Orta Doğu'da olmak üzere küresel talebi karşılamada merkezi bir konuma sahip olmasını sağlamaktadır (Nkukwana, 2018). K  k  l ekli kümes hayvanı işletmeleri, Güney Asya ve Sahra altı bölgesel kırsal alanlarda önemli bir rol oynamakta ve büyük ölçekli üreticilerin ötesinde gıda güvenliği ve gelir yaratılmasını desteklemektedir (Erdaw ve Beyene, 2022). Bu durum, endüstriyel ölçekli işletmelere kıyasla arka bahçede yetiştirilen kümes

hayvanlarının et üretiminde düşüşe yol açmış ve tavuk yetiştiriciliğinin çok amaçlı ve esnek doğasını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, kümes hayvanı üretiminin yoğunlaşmasının gıda güvenliği, depolama ve raf ömrü ile ilgili endişeleri artırdığı da bir gerçektir. Kesildikten sonra, kümes hayvanı eti, onu bozan mikroorganizmalar nedeniyle işlenmesi zor olabilir, bu da nakliyesini zorlaştırır ve hızlı bozulmaya neden olur. Soğuk zincir altyapısı, birçok düşük ve orta gelirli ülkede yetersizdir (Sime, 2022).

1.1.2. Kümes Hayvanı Etinin Ekonomik ve Beslenme Açısından Önemi

Kümes hayvanı eti, uygun maliyetli ve yüksek kaliteli bir hayvansal protein kaynağı olduğu için dünya beslenmesinin önemli bir bileşenidir. Tavuk, iyi bir protein kaynağıdır ve çok az yağ içerir. Kümes hayvanları demir, fosfor, çinko ve B vitaminleri, özellikle niasin (B3) ve piridoksin (B6) açısından iyi bir kaynaktır, bu da onları protein-enerji yetersizliği ve mikro besin eksikliği sorunları ile karşı karşıya olan nüfuslar için özellikle yararlı kılmaktadır (Haque vd., 2020). Sektör, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ekonomilerde gayri safi milli hasıla, istihdam ve ticarete önemli bir rol oynamaktadır. Sadece kümes hayvanları sektörü, Amerika Birleşik Devletleri ekonomisine 50 milyar doların üzerinde gelir sağlar ve tarım, işleme, dağıtım ve perakende sektörlerinde 1,5 milyondan fazla kişiye istihdam sağlar (Davis vd., 2013). Etiyopya gibi gelişmekte olan ülkelerde, kümes hayvanları küçük çiftçilere geçim kaynağı sağlar, kadınları güçlendirir ve yoksulluğun azaltılması için bir araç görevi görür (Sime, 2022). Sığır eti veya kuzu etine kıyasla daha düşük maliyetli olan tavuk eti, düşük gelirli bireylerin bu ürüne erişimini artırmaktadır. Ayrıca, dini veya kültürel beslenme kısıtlamalarına karşı düşük duyarlılığı nedeniyle, tavuk eti sindirimi kolay bir hayvansal protein kaynağıdır (Ravindran, 2013). Bu nedenle, kümes hayvanlarının ekonomik önemi, iç ve dış ticaret üzerindeki etkileriyle yakından bağlantılıdır.

Kümes hayvanları eti, küresel olarak en çok ticareti yapılan et türüdür ve bu nedenle, güvenli ve sağlıklı tutulması hem halk sağlığı hem de ekonomik bir gerekliliktir (Windhorst, 2006). Bozulma ve kontaminasyon, önemli mali kayıplara neden olabilir (Rouger vd., 2017). Mikrobiyal bozulma ve oksidasyonun, kesim sonrası dünyadaki kümes hayvanı eti kayıplarının %25'inden sorumlu olduğu düşünülmektedir (Zampiga vd., 2021). Bu kayıplar her yıl milyarlarca dolara ulaşmakta ve gıdayı daha güvenli ve

sürdürülebilir hale getirmeyi önemli ölçüde zorlaştırmaktadır. Dünya nüfusu arttıkça, sentetik koruyuculara bağlı kalmadan tavuk etinin daha uzun süre güvenli ve yenilebilir kalmasını sağlamak giderek daha önemli hale gelmektedir (Teshome vd., 2022).

1.1.3. İşlenmiş Tavuk Ürünlerine Artan Talep

Dünya çapında daha fazla insan tavuk tüketmeye başladıkça, tüketiciler tavuk etinin daha yüksek kalitede, daha güvenli olmasını ve üretim süreçleri hakkında daha fazla şeffaflık sağlanmasını istemektedir. İnsanların yemek tercihlerinde az işlenmiş ve doğal olarak korunmuş gıdalara doğru bir kayma olduğu açıktır. Bunun nedeni, nüfusun sağlığına daha fazla önem vermesi, yaşam tarzlarının değişmesi ve kimyasal katkı maddelerine güvenmemesidir. 2021 yılında yapılan küresel gıda trendleri araştırması, tüketicilerin %78'inin doğal veya koruyucu içermeyen etiketli gıda ürünlerini, özellikle et ve tavuk ürünlerini tüketmeye istekli olduğunu ortaya koymuştur (Zampiga vd., 2021). Bu ilgi, hem gelişmekte olan hem de yüksek gelirli pazarlarda gözlemlenmiştir. Kuzey Amerika ve Avrupa'da organik ve temiz ürünlerin popülerliğinin artması nedeniyle, yapay koruyucu, antibiyotik ve antioksidan içermeyen tavuk talebinde büyük bir artış yaşanmıştır. Çin ve Hindistan'daki tüketiciler, taze veya işlenmiş tavuk ürünlerini, daha yüksek kaliteli olduğuna inandıkları seçenekler olarak giderek daha fazla tercih etmektedir (Fearnley, 2025; Nanda Kumar vd., 2022; Bruckert, 2021). Bu tür tercih değişikliklerinin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Tavuk eti ne kadar az işlenmişse, katkı maddesi olarak yaygın kullanılan nitrit, sülfite ve butil hidroksianisol (BHA)/butil hidroksitoluen (BHT) gibi koruyucular içermediğinden, bakteriyel kontaminasyon ve oksidasyonun bozulmaya neden olma olasılığı o kadar yüksek olur. Bu durum, soğuk zincir yönetiminin yükünü artırmakta ve etkili, uzun ömürlü ve evrensel gıda koruma tekniklerine olan ihtiyacı vurgulamaktadır (Davoudi vd., 2024). Sorunlar, tavuk etinin uygun olmayan şekilde işlenmesiyle bağlantılı *Listeria* ve *Salmonella* salgınları gibi gıda güvenliği sorunları nedeniyle daha da kötüleşmektedir. Tüm bu olaylar, insanların kümes hayvanları hakkındaki farkındalığını ve bu gıdanın kaynağı ve işlenmesi hakkında daha fazla bilgi edinme isteğini artırmıştır (Haque vd., 2020).

Gıda üreticileri ve hükümetler, kümes hayvanı ürünlerini daha güvenli hale getirmek için çeşitli koruma yöntemleri kullanma konusunda giderek daha fazla baskı altındadır. Bu talepleri karşılayabilecek en umut verici kapsülleme teknolojileri arasında metal oksit nanopartiküller, uçucu yağlar ve polisakkarit bazlı kapsülleme bulunmaktadır. Bu stratejiler, minimum düzeyde işlenmiş kümes hayvanı etinin güvenliğini ve raf ömrünü artırmakla kalmaz, aynı zamanda faydalı doğal bileşenlere odaklanan "temiz etiket" hareketine de katkıda bulunur. Dahası, tüketiciler, yapay katkı maddeleri içermeyen tavuk ürünleri için bile, daha uzun raf ömrü, mikroplara karşı koruma ve bozulmamış organoleptik özellikler garanti edildiğinde daha yüksek fiyatlar ödemeye daha isteklidir (Korver, 2023; Martínez Michel vd., 2011). Bu durum, gıda bilimcileri ve et endüstrisi için hem bir zorluk hem de günümüz tüketicileri tarafından kabul edilebilir ve etkili yeni gıda koruma yöntemleri geliştirmek için bir fırsattır.

1.2. Kümes Hayvanları Endüstrisindeki Zorluklar: Bozulma ve Güvenlik

Kümes hayvanı eti dünya çapında önemli bir protein kaynağı olmasına rağmen (Windhorst, 2017), biyokimyasal yapısı ve oksidatif ve mikrobiyolojik hasara yatkınlığı nedeniyle en çabuk bozulan hayvansal gıdalardan biri olarak kabul edilir (Kaewprachu vd., 2022). Tavukçuluk biliminde mevcut zorluk iki yönlüdür: güvenliğini sağlamak ve raf ömrünü uzatmanın yanı sıra, müşterilerin daha az işlenmiş ürünlere olan ihtiyacını karşılamak. Bozulma, mikrobiyal kontaminasyon ve oksidatif dönüşümlerin mekanizmalarının bilinmesi çok önemlidir, çünkü bu faktörler etin kalitesi, raf ömrü, pazarlanabilirliği ve sağlık riskleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Rebezov vd., 2024).

1.2.1. Kümes Hayvanı Etinin Bozulabilirliği

Kümes hayvanı eti, besin açısından zengin olması, yüksek su aktivitesi (0,98'in üzerinde) ve bozulmaya neden olan mikroorganizmaların hızlı büyümesini ve gelişmesini sağlayan nötr pH değerine yakın olması nedeniyle özellikle çabuk bozulur (Rather vd., 2024). Kümes hayvanı kas dokusu, postmortem biyokimyasal durumu nedeniyle kesimden hemen sonra çürümeye özellikle yatkındır, bu durum hem mikropların kasa girmesini hem de endojen enzimatik bozulmayı teşvik eder. Taze kümes hayvanı eti 4 °C'de 5 ila 7 gün

saklanabilir; ancak, çoğu gelişmekte olan ülkede standartların altında soğuk zincir ağırları nedeniyle işlemden sonra et yalnızca 24 saat içinde bozulabilmektedir. Kısa raf ömrü, üreticiler ve tüccarlar için kayıplara neden olur ve nihayetinde tüketiciler için önemli sağlık riskleri oluşturur. Rather vd. (2024) tarafından yapılan bir araştırma, ambalajsız kümes hayvanı etinin, buzdolabında saklandığında mikropların güvenli sınırını ($>6 \log \text{CFU/g}$) aştığında bozulabileceğini göstermiştir. Bu hızlı bozulma oranı, etkili koruma stratejilerine duyulan ihtiyaç ortaya koymaktadır.

1.2.2. Kümes Hayvanlarında Mikrobiyal Bozulma ve Gıda Kaynaklı Patojenler

Çiğ tavuk etinin mikrobiyal ekolojisi, hem patojenik hem de bozulmaya neden olan mikropları içerir. Yaygın olarak tanımlanan bozulma mikropları arasında *Pseudomonas* spp., *Brochothrix thermosphacta* ve *Shewanella putrefaciens* gibi çeşitli bakteriler bulunur. Bu bakteriler, lipitleri ve amino asitleri uçucu kükürtlü ve azotlu bileşiklere metabolize ederek, sümük oluşumuna neden olarak ve kötü kokular yayarak ette renk değişikliğine yol açarlar (Majeed ve Nassar, 2025). Ayrıca, *Salmonella enterica*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* O157:H7 ve *Campylobacter jejuni* gibi kritik gıda kaynaklı patojenlerin kümes hayvanı eti yoluyla bulaştığı bilinmektedir.

Dünya Sağlık Örgütü (WHO), kümes hayvanlarından kaynaklanan *Campylobacter* ve *Salmonella* türlerinin dünya çapında gıda kaynaklı hastalıkların en yaygın kaynakları olduğunu belirtmektedir. Uygun olmayan işleme ve soğutma koşulları ile işleme sürecinde meydana gelen çapraz bulaşma, bu tehlikeyi daha da artırmaktadır (WHO, 2023). Son araştırmalar, tavukçuluk sektöründe tespit edilen çoklu ilaca dirençli mikroorganizmaların yaygınlığında endişe verici bir artış olduğunu ortaya koymuştur. Buna paralel olarak, bazı araştırmalar, tavukçulukta çoklu ilaca dirençli bakteri suşlarının artışı belgelenmiştir. Effatpanah vd. (2025), tavuklardan izole edilen *E. coli* suşlarında kolistin direnci sağlayan *mcr-1* direnç genini bildirmiştir. Haeili vd. (2025) kümes hayvanı etinden izole edilen *E. coli* örneklerinde *fosA4* ve *fosA3* direnç genlerini tespit etmiş ve bunun fosfomisine direnç ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, gıda üretim süreçlerinde antimikrobiyallerin yetersiz veya yanlış kullanımının sağlık riskleri oluşturduğunu vurgulamaktadır. Bu nedenle, özellikle tüketici

taleplerinin artmasıyla birlikte, gıda kaynaklı patojenleri engelleyebilecek etkili antimikrobiyal stratejilerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

1.2.3. Lipit Oksidasyonu ve Protein Bozunumu

Mikrobiyal bozulmanın yanı sıra, lipitlerin ve proteinlerin oksidasyonu da tavuk etinin kalitesini etkiler. Tavuk eti, özellikle ışık, oksijen ve metal iyonlarına maruz kaldığında oksidasyona eğilimli olan çoklu doymamış yağ asitleri (PUFA'lar) açısından oldukça besin değeri yüksek bir gıdadır. Lipitlerin oksidasyonu, renk değişikliğine, ekşime ve koku oluşumuna, etin yumuşaklığının azalmasına (proteinler arasındaki çapraz bağlanma nedeniyle) ve nihayetinde besin değerinin kaybına neden olur. Tavuk etindeki lipit peroksidasyonu, stres ve yüzeyin maruz kalma süresinin artmasıyla şiddetlenir ve oksidatif hasar, mikrobiyal aktivite ve ısı gibi çevresel faktörler tarafından yoğunlaşır (Zampiga vd., 2021). Sentetik antioksidanlar BHA ve BHT gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır; ancak, kimyasal katkı maddeleri konusunda tüketici bilincinin artması, doğal ikameler için talebi artırmaktadır. Bitki bazlı uçucu yağlar, nanoteknolojinin de kullanımıyla, antioksidan ve antibakteriyel özelliklerinin birleşimi sayesinde umut verici alternatifler olarak ortaya çıkmıştır.

1.2.4. Raf Ömrü Sınırlamaları ve Bozulma Göstergeleri

Kümes hayvanı etinin raf ömrü, oksidatif ve mikrobiyal bozulma analizi ile belirlenebilir. Et kalitesi, toplam canlı sayımı (kabul edilebilir aralık $\leq 6 \log \text{CFU/g}$), pH, duyuşal özellikler ve tiyobarbitürik asit reaktif maddelerin (TBARS) değerlendirilmesi ile analiz edilebilir. Rather vd. (2024), 4 °C'de saklanan tavuk etinin raf ömrünü uzatmak için nano-emülsifiye biber tohumu yağı içeren çevre dostu ambalaj poşetleri geliştirmiştir. Bu poşetler, rengi koruyarak, ağırlık kaybını en aza indirerek ve doku özelliklerini koruyarak tavuk göğsü küplerinin 15 gün boyunca korunmasına katkıda bulunmuştur. Bu torbalara paketlenen tavuk eti, mikrobiyal bozulmayı 15 güne kadar geciktirerek raf ömrünü önemli ölçüde uzatmıştır, kontrol grubu ise kabul edilebilir mikrobiyal aralığı $7 \log \text{CFU/g}$ aşmıştır. Bu bulgulara dayanarak, mikrobiyal büyümeyi kontrol ederken aynı zamanda oksidasyonu yavaşlatabilen entegre sistemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

1.2.5. Tüketici Güvenliği ve Temiz Etiket Kısıtlamaları

Modern tavukçuluk sektörü iki yönlü bir zorlukla karşı karşıyadır: mikrobiyolojik ve oksidatif güvenliği sağlamak ve aynı zamanda yapay katkı maddeleri ve kimyasallar içermeyen ürünlere yönelik müşteri taleplerini karşılamak. Nitritler, sorbatlar ve benzoatlar dahil olmak üzere yapay gıda koruyucuları yaygın olarak kullanılmaktadır; ancak, alerji ve kanserle potansiyel bağlantıları nedeniyle şu anda gözden geçirilmektedir (Dewan vd., 2024; Pepper vd., 2020). Temiz etiket talepleri, niş inceleme aşamasını geçerek pazarda belirleyici bir güç haline gelmiştir. Tüketiciler şu anda, özellikle faydalar (örneğin, doğal kaynaklı antimikrobiyal özellikler) ve yapay katkı maddelerinin kasıtlı olarak hariç tutulması açısından, içeriklerin kullanımı konusunda tam şeffaflık beklemektedir. Bu değişen tüketici talebi, teknik olarak yararlı ürünler (sentetik bileşikler) ile pazarda kabul gören ürünler (doğal ürünler) arasında güçlü bir ayrım yaratmış ve böylece çok işlevli doğal koruma sistemlerinin araştırılmasını hızlandırmıştır. Umud vaat eden çözümlerden biri, nano emülsifiye uçucu yağlar (NEO'lar), metal oksit nanopartiküller (örneğin ZnO) ve polisakkarit bazlı yenilebilir filmlerin kullanılmasıdır. Tüm bu faktörler, mikrobiyal büyümeyi inhibe etme, oksidasyonu azaltma ve duyuusal özellikleri koruma açısından sinerjik etkiler sergilemiştir.

1.2.6. İşleme ve Soğuk Zincir Zorlukları

Kümes hayvanı etinin bozulması sadece satış öncesi aşamalarda değil, son kullanım işleme aşamalarında da meydana gelir. Et işleme sürecinde kesim, iç organların çıkarılması, soğutma ve paketlenme aşamalarında çeşitli türlerde kontaminasyonlar meydana gelebilir. Dağıtım sırasında uygun olmayan hijyen koşulları, sıcaklık dalgalanmaları ve paketlenme sızıntıları raf ömrünün kısalmasına neden olarak gıda kaynaklı hastalık riskini artırır (Akinsemolu ve Onyeaka, 2024; Karanth vd., 2023; Biswas vd., 2018). Tavuk etinin sıcaklığa duyarlılığını anlamak ciddi bir konudur. Depolama sırasında 2 ila 3 °C meydana gelen arasında küçük sıcaklık değişimleri, mikrobiyal büyümeyi önemli ölçüde kolaylaştırabilir ve artırabilir (Augustyńska-Prejsnar vd., 2023). Elektrik kesintileri ve yetersiz nakliye düzenlemeleri, Asya ve Afrika'nın birçok bölgesinde işleme sonrasında bile ürünün kullanılabilirliğini düşürmektedir (Sime, 2022). Buna bağlı olarak, güvenli işleme ve üretimi sürdürmek için antimikrobiyallerin

kontrollü salınımını sağlayan aktif ambalajlama stratejileri veya sıcaklık açısından kararlı antimikrobiyal takviyeleri gerekli hale gelmektedir.

1.3. Kümes Hayvanı Etlerinde Geleneksel Koruyucular ve Sınırlamaları

Tavuk eti yüksek miktarda su içerdiğinden ve pH seviyesi nötr seviyeye yakın olduğundan, mikropların kolayca üremesine ve oksidasyona uğramasına neden olur. Bu durum, etin kullanım süresini uzatmak ve güvenliğini sağlamak için eti koruyan maddelerin kullanılmasını gerektirir. Uzun süredir gıda üretim sektörü bir grup sentetik koruyucuya bağımlıdır. Bu grup BHT, BHA, nitritler, benzoatlar ve sülfidler içerir (Çizelge 1.1). Bu maddeler gıdaların bozulmasını ve hastalık yapıcı mikropları kontrol altında tutmada etkili olmuştur. Ancak potansiyel sağlık riskleri ve tüketicilerin bakış açısından düzenlemelerle ilgili sorunlar nedeniyle endişe odağı haline gelmiştir.

Çizelge 1.1: Yaygın olarak kullanılan bazı koruyucular, kabul edilebilir günlük alım miktarları ve ilgili tehlikeler/riskler.

Sentetik Koruyucu	Kullanıldığı yerler (Ürünler)	ADI* (mg/kg)	Tehlikeler/Riskler	Kayn.
Butil hidroksianisol (BHA, E320)	Ürünlerin hazırlanmasında kullanılan yağ/katı yağa (tavuk nugget ve kızarmış tavuk vb.) eklemesi, yağın bozulmasını önlemek için.	0 – 0,5	Kanserojen. Potansiyel endokrin bozucu.	(Ren vd., 2025)
Butil hidroksitoluen (BHT, E321)	Oksidasyonu önlemek için et ürünlerinin yağına/yağlarına/ambalajlarına eklenir.	0 – 0,25	Bazı durumlarda endokrin bozucu ve tümör teşvik edici olduğundan şüphelenilmektedir.	(Ren vd., 2025)
Sodyum Nitrit (E250)	Sosis, sucuk ve nugget gibi işlenmiş/kurutulmuş tavuk ürünleri.	0 – 0,07	N-Nitrosamin oluşumu ve ilişkili kanser riski.	(EFSA Panel, 2017)
Sorbik Asit (E200)	Bazı işlenmiş tavuk ürünlerinin kabuklarında/kaplamalarında antimikrobiyal ajan olarak kullanılır.	0 – 11	Düşük risk, hassas kişilerde alerjik reaksiyonlara veya aşırı duyarlılığa neden olabilir.	(EFSA Panel, 2019)

Potasyum Nitrit (E249)	Sosis, sucuk ve nugget gibi işlenmiş/kurutulmuş tavuk ürünleri.	0 – 0,07	Kansere neden olabilir.	(EFSA Panel, 2017)
Potasyum Sorbate (E202)	Taze kümes hayvanları ve bazı işlenmiş/pişirilmiş kümes hayvanı ürünlerinde maya ve küf oluşumunu önlemek için kullanılır.	0 – 11	Aşırı duyarlılık reaksiyonlarına neden olabilir. Genel olarak düşük risklidir.	(EFSA Panel, 2019)

*ADI: Kabul edilebilir günlük alım miktarı.

1.3.1. Kanatlı Ürünlerinde Yaygın Olarak Kullanılan Sentetik Koruyucular

İşlenmiş tavuk etinde, koruyucular hem antibakteriyel ajanlar hem de antioksidanlar olarak işlev görür. Kullanılan başlıca sentetik koruyucular, *Clostridium botulinum*'a karşı antibakteriyel özellikleri ve rengi korumaları nedeniyle kürlenmiş tavuk ürünlerinde kullanılan nitratlar (NaNO_3) ve nitritlerdir (NaNO_2). Sülfidler ve kükürt dioksit (SO_2) antimikrobiyal ve antioksidan olarak işlev görür, bozulmaya neden olan bakterileri ve enzimatik kahverengileşmeyi önler. BHA ve BHT, kümes hayvanı etindeki çoklu doymamış lipitleri peroksidasyona karşı koruyan lipit çözüner sentetik antioksidanlardır.

Sodyum benzoat ve potasyum sorbat, düşük pH seviyelerinde etkili olan zayıf asitli koruyuculardır ve genellikle kümes hayvanı marine soslarında ve işlenmiş soslarda kullanılır (Nieto vd., 2023). Bu kimyasalların koruma etkinliği iyi belgelenmiştir. Dey ve Nagababu (2022), 200 ppm BHA varlığının, 4 °C'de 10 gün boyunca saklanan tavuk nuggetlarda lipit oksidasyonunu önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Özellikle nitritlerin, *Listeria monocytogenes* ve *Salmonella enterica* gibi bozulmaya neden olan organizmalar ve patojenlere karşı daha da etkili olduğu gösterilmiştir (Mwale ve Sector, 2023). Avantajlı olmalarına rağmen, günümüzde kullanımları tartışmalı hale gelmiştir.

1.3.2. Sağlık Riskleri ve Toksikolojik Endişeler

Sentetik koruyucular, toksikolojik özellikleri nedeniyle geniş çapta incelenmiştir. Nitritler, ette bulunan ikincil aminlerle reaksiyona girerek, Uluslararası Kanseri Araştırma Ajansı (IARC) tarafından kanserojen olarak sınıflandırılan bazı N-nitrozaminler

üretebilir. Nitrit seviyeleri ABD ve AB sistemleri tarafından kontrol ediliyor olsa da (örneğin pişmiş et ürünlerinde en fazla 150 ppm nitrit), büyük miktarlarda tüketildiğinde veya diğer kimyasallarla etkileşime girdiğinde hala bir tehdit oluşturmaktadır (Mwale ve Sector, 2023; Quansah ve Saalia, 2024). Hayvan araştırmalarında, BHA ve BHT'nin uzun süreli kullanımı ile nörotoksisite, kanserojenlik ve hormonal bozukluklar da ilişkilendirilmiştir. Ciobanu vd. (2024), BHT'nin antioksidan etkileri olmasına rağmen, hayvan modellerinin bilişsel ve nöroperseptüel yetenekleri üzerinde olumsuz bir etkisi olduğunu bildirmiştir. Bazı sağlık kuruluşları şu anda bu katkı maddelerinin kullanımının, özellikle gençler ve savunmasız nüfus gruplarında sınırlandırılmasını önermekle birlikte, bunlar genellikle 200 ppm konsantrasyonda güvenli (GRAS) olarak kabul edilmektedir (Nieto vd., 2023; Hugo vd., 2015). Sülfidler, içeceklerde veya kurutulmuş meyvelerde olduğu kadar kümes hayvanlarında yaygın olmasa da, bunlara duyarlı kişilerde şiddetli alerjik reaksiyonlara neden olabilirler. Bu nedenle, FDA gibi düzenleyici kuruluşlar, sülfidler varlığının açıkça belirtilmesini zorunlu kılmıştır (D'Amore vd., 2020). Ayrıca, sentetik koruyucuların bağırsak florasını değiştirdiği ve temel besinlerin biyoyararlanımını azalttığı gösterilmiştir, bu da kimyasal olarak korunmuş etlerin uzun süreli tüketimine ilişkin endişelerin artmasına katkıda bulunmaktadır.

1.3.3. Tüketici Algısı ve Temiz Etiket Hareketi

Tüketicilerin doğal, organik ve temiz etiketli ürünleri tercih etmelerindeki artış, et endüstrisi üzerinde önemli bir etki yaratmıştır. Kümes hayvanları tüketicileri kimyasallara daha duyarlıdır ve sentetik koruyucu maddelerin kullanımını düşük kalite ve olumsuz etkilerle ilişkilendirme eğilimindedir. Müşterilerin çoğu, ürünleri incelerken koruyucu maddeler de dahil olmak üzere gıda etiketlerini düzenli olarak kontrol eder ve yapay koruyucu madde ilave edilmediğini veya ürünün doğal olarak korunduğunu belirten kümes hayvanları ürün etiketlerini tercih eder. Bu tüketici baskısının ardından düzenleyici değişiklikler yapılmıştır; üreticiler, sentetik koruyucu maddelerin kullanımını yasal seviyelerle sınırlamak için bazı AB ülkelerinde gönüllü azaltma anlaşmalarına tabi tutulmuştur. Aynı zamanda, perakendeciler ve markalar rekabet gücünü korumak için temiz etiketli içerik yasaları uygulamaya koymaktadır. Sentetik katkı maddelerinin kullanımı ve popülaritesi hızla düşerken, gıda pazarı hala etkili koruma teknolojilerinden

yoksundur. Temiz etiketlere olan talebin artması, uçucu yağlar (EO'lar), nanoyapılar ve biyopolimer kaplamalar dahil olmak üzere doğal, çok amaçlı ve etiket dostu koruyucular üzerine araştırmaların artmasına neden olmuştur.

1.4. Sentetik Koruyucuların Teknolojik Sınırlamaları

Formülasyon sınırlamaları, sentetik koruyucular etkili olsalar bile, kümes hayvanları sistemlerinde gözlemlenebilir:

- i. Büyük veya eşit olmayan et parçalarının düzensiz dağılımı.
- ii. pH duyarlılığı: Örneğin benzoatlar ve sorbatlar, asidik pH seviyelerinde en iyi şekilde çalışır, bu da çiğ ette kullanımlarını sınırlar.
- iii. Et proteinleri ve lipitlerle reaksiyona girmeleri, aktiviteyi azaltabilir veya tadı değiştirebilir (Mwale ve Sector, 2023).
- iv. BHA/BHT oksidasyonu inhibe etmesine rağmen, oksidatif maskeleye, özellikle sıcaklık yanlışı kullanımı nedeniyle meydana geldiğinde, ilerlemesini önlemek için yeterli olmayabilir.
- v. Kontrolsüz salım özellikleri: Genellikle uygulamadan hemen sonra aktif hale gelirler, uygulamadan kısa süre sonra zirveye ulaşır ve hızla azalır. Bu özellik, tavuk etinin perakende raflarına ulaşmasının 7-10 gün sürebileceği uzun tedarik zinciri sistemlerinde ciddi sorunlara yol açar.

Öte yandan, kapsüllenmiş biyoaktif ve nanoprezervasyon sistemleri, uzun süreli antimikrobiyal salım, hedefe yönelik dağıtım ve azalmış duyu kesinti sunar, bu da onları sentetik alternatiflerin yerine kullanılabilir hale getirir.

1.5. Doğal Alternatiflere Geçiş: Etkinlik Açığını Kapatmak

Kümes hayvanlarında geleneksel yapay koruma teknikleriyle karşılaştırmalı olarak doğal koruma tekniklerinin etkinliğini değerlendirmek üzere çeşitli deneyler başlatılmıştır. Alternatif olarak, kapsüllenmiş kekik yağı nanoemülsiyonları, ısıl işleminden önce alınan numunelerle karşılaştırılmıştır, çünkü her ikisi de 12 günlük soğuk depolamadan sonra koyun eti köftelerinde lipit oksidasyonu üzerinde benzer etkiler göstermiştir (Yu vd., 2023). Wang vd. (2021a), buzdolabında saklanan tavuk etinin fizikokimyasal, mikrobiyolojik ve organoleptik özellikleri üzerinde tarçın esansiyel yağı (CEO)

nanoemülsiyonunun potansiyelini araştırmıştır. Tavuk göğüs filetolarının kalitesini ve raf ömrünü artırmak için farklı konsantrasyonlarda CEO (%0,25, %1,0 ve %2,0 w/v) kullanılarak üç nanoemülsiyon hazırlanmıştır. Nanoemülsiyonlar, *Pseudomonas aeruginosa* ve *L. monocytogenes*'e karşı etkili antimikrobiyal potansiyel göstermiştir. CEO nanoemülsiyonları, soğutulmuş tavuk etinde toplam canlı bakteri sayısının büyümesini önemli ölçüde engellemiştir. Pirastehfard vd. (2021), *Satureja bachtiarica* (Bakhtiari savory) uçucu yağının (SBEO) kanola yağı (CaO) nanoemülsiyonu ile birlikte soğutulmuş tavuk etinin kalitesi üzerindeki etkinliğini incelemiştir. CaO nanoemülsiyon tek başına ve SBEO ile birlikte *Enterobacteriaceae*, psikrofilik, mezofilik ve laktik asit bakterilerinin büyümesini önemli ölçüde azaltmıştır. Kontrol grubuna kıyasla tavuk etinin oksidasyonunu ve raf ömrünü 12 gün boyunca iyileştirdi.

Youssef vd. (2023), kitosan ve polivinil alkol ile TiO₂ nanopartiküllerini (NP'ler) ve CEO nanoemülsiyonunu kullanarak biyo-nanokompozit kaplamalar üretmiştir. CEO nanoemülsiyonunun ortalama parçacık boyutu 152 nm olarak belirlendi. Biyo-nanokompozit filmler, *Aspergillus flavus*'un yanı sıra Gram-negatif ve Gram-pozitif bakterilere karşı etkili antimikrobiyal aktivite sergiledi. TiO₂ NP'ler ve CEO nanoemülsiyon bazlı biyo-nanokompozit filmlerin etkisi, 4±1 °C'de 21 gün boyunca saklanan tavuk etinin korunması üzerinde değerlendirildi. TiO₂ NP'leri ve CEO nanoemülsiyonu (özellikle %20) içeren biyo-nanokompozit filmler, kontrol grubuna (kaplanmamış filetolar) kıyasla 14 gün boyunca önemli antimikrobiyal aktivite sergilemiş, su kaybını azaltmış ve tavuk etinin raf ömrünü uzatmıştır.

Yukarıdaki bulgular, biyopolimer stabilize, nanoemülsiyon bazlı dağıtım sistemlerinin, özellikle fonksiyonel nanopartiküller kullananların, aşağıdaki avantajları sağladığı iddiasını desteklemektedir: iyileştirilmiş oksidatif stabilite, gelişmiş salım kontrolü ve süresi ile temiz etiketli bileşenlerin dahil edilmesi. Ek olarak, literatür, sinerjik karışımların (uçucu yağlar, nanopartiküller ve polisakkaritler gibi bileşenlerden oluşan) koruyucu potansiyeli artırdığını ve her bir bileşenin konsantrasyonunu azalttığını, bunun da önemli bir güvenlik avantajı sağladığını göstermektedir (Nieto vd., 2023). Bu giderek artan literatür, artık eski sentetik katkı maddelerine değil, daha çevre dostu, ölçeklenebilir

ve tüketici dostu alternatiflere dayanan, kümes hayvanları muhafazasında bir paradigma değişikliğini desteklemektedir.

1.5.1. Doğal Antimikrobiyalere Geçiş

Gıda koruma uygulamaları, tüketici talebi ve güvenlik endişeleri nedeniyle sentetik kimyasal koruyuculardan temiz etiketli, doğal koruyuculara doğru kaymaktadır. Nitritler, sülfidler, BHA ve BHT gibi geleneksel bileşikler, bozulmayı etkili bir şekilde önlemiş, ancak kanserojen nitrozaminlerin oluşma potansiyeli ve antimikrobiyal direnç nedeniyle sağlık endişelerine yol açmıştır (Ren vd., 2025; Shakil vd., 2022; Gómez vd., 2020; Silva vd., 2016). Etin korunması, mikrobiyal bozulmayı geciktirmek, oksidasyonu önlemek, ağırlık kaybını azaltmak ve dokuyu ve lezzeti korumayı amaçlamaktadır (Chellaiah vd., 2020). Doğal yöntemler, duyu kaliteyi etkilemeden raf ömrünü uzatır (Gómez vd., 2020). Kurutma, dondurma ve konserve gibi teknikler yaygın olarak kullanılmaya devam ederken, soğuk plazma, yüksek hidrostatik basınç ve ultrason destekli dondurma gibi gelişmiş termal olmayan yöntemler kaliteyi korur, ancak enerji yoğun olabilir (Kumar vd., 2019). EO'lar ve bitki kaynaklı antimikrobiyallerin kullanıldığı termal olmayan, doğal koruma yöntemleri etkili ve sürdürülebilir çözümler sunar (Zhou vd., 2010). Bu bileşikler, özellikle *Pseudomonas* spp. tarafından oksidasyona ve mikrobiyal bozulmaya eğilimli taze tavuk eti için faydalı olan güçlü antioksidan ve antimikrobiyal aktiviteler sergiler (Chacha vd., 2021).

Son zamanlarda yapılan çalışmalar, doğal alternatiflerin potansiyelini doğrulamaktadır. Kapsüllenmiş kekik yağı nanoemülsiyonu, 12 gün saklandıktan sonra koyun eti köftelerinde kontrol grubuyla benzer lipid oksidasyon etkileri sergilemiştir (Yu vd., 2023). Tarçın esansiyel yağı nanoemülsiyonları (0,25-2,0%), buzdolabında saklanan tavuk filetolarında *Pseudomonas deceptionensis* ve *L. monocytogenes*'i etkili bir şekilde inhibe ederek raf ömrünü uzatmıştır. Benzer şekilde, kanola yağı nanoemülsiyonu ile birleştirilen *Satureja bachtiarica* esansiyel yağı, bakteri üremesini ve oksidasyonu azaltarak tavuk etinin raf ömrünü 12 güne çıkarmıştır (Pirastehfard vd., 2021). Kitosan, polivinil alkol, TiO₂ nanopartiküller ve CEO nanoemülsiyonunu birleştiren biyo-nanokompozit kaplamalar, 4 °C'de 21 gün boyunca saklanan tavuk filetolarında

mikrobiyal stabiliteyi artırmış ve su kaybını azaltmıştır (Youssef vd., 2023). Biyopolimerle stabilize edilmiş nanoemülsiyon sistemleri, gelişmiş oksidatif stabilite, kontrollü salım ve artırılmış güvenlik sunar. Uçucu yağlar, nanopartiküller ve polisakkaritlerin sinerjik karışımları, katkı maddesi konsantrasyonu ihtiyacını azaltırken koruyucu özelliği artırır (Nieto vd., 2023) ve çevre dostu ve tüketici güvenliği açısından güvenli tavuk eti koruma yöntemlerine geçişi destekler.

1.5.2. Doğal Alternatifler Olarak Uçucu Yağlar

Doğal koruyucular arasında, uçucu yağlar etkinlikleri ve tüketiciler tarafından popüler olmalarıyla öne çıkar ve kümes hayvanlarının korunmasında sentetik koruyuculara umut verici alternatifler oluşturur. Başlıca terpenler ve terpenoidlerden oluşan bu uçucu sıvılar, doğal bitki savunma mekanizmaları olarak işlev görür ve bozulabilir tavuk etini stabilize etmek için gerekli olan çift etkili antimikrobiyal ve antioksidan koruma sağlar (Ojeda-Piedra vd., 2022; Azevedo vd., 2021). EO'lar, Gram-pozitif ve Gram-negatif bakteriler ile küf ve mayalar dahil olmak üzere çok çeşitli mikroorganizmaları inhibe ederek eti bozulmaya ve patojenlere karşı korur. Antimikrobiyal etkileri, EO bileşenlerinin yüksek lipofilikliğine dayanır; bu da mikrobiyal hücre zarlarını bozarak hücre içeriğinin sızmasına ve hücre ölümüne yol açar (Burt, 2004).

EO'lar ayrıca reaktif oksijen türlerini (ROS) temizleyerek lipit oksidasyonunu önler ve böylece depolama sırasında etin rengini ve lezzetini korur. EO'lar çiçekler, tomurcuklar, tohumlar, yapraklar, meyveler ve kökler gibi çeşitli bitki parçalarından elde edilen doğal aromatik sıvılardır (Burt, 2004) ve FDA tarafından GRAS olarak sınıflandırılır (Kalogianni vd., 2020). Bunlar, antimikrobiyal etki gösteren düşük moleküler ağırlıklı aromatik bileşiklerin (Calo vd., 2015) karmaşık karışımlarıdır (Jayasena vd., 2013). Aktif bileşikler terpenler ve terpenoidler ile aromatik ve alifatik bileşenler (fenilpropanoidler) olarak ikiye ayrılır. İzopren birimlerinden oluşan terpenler, oksijenlendiğinde terpenoidler oluşturur. Monoterpenler en sık görülenlerdir ve EO'ların yaklaşık %90'ını oluşturur (Bakkali vd., 2008). Daha küçük bir kısmı, antimikrobiyal aktiviteye katkıda bulunan fenilpropandan türetilen aromatik fenolik bileşikler içerir (Pateiro vd., 2021; Barbosa

vd., 2009). Fenolik bileşiklerin miktarının artması, antimikrobiyal potansiyeli artırır (Alirezalu vd., 2020).

Ancak, yüksek uçuculuk ve düşük suda çözünürlük, EO'nun uygulamasını sınırlamaktadır. Bu nedenle, nanoteknoloji, özellikle nanoemülsiyonlar (20 ila 200 nm arasında değişen damlacık boyutları ile), çözünürlüğü, stabiliteyi ve duyuşal uyumluluğu artırarak aktif bileşiklerin daha etkili ve sürdürülebilir bir şekilde verilmesini sağlar. Böylece, nanoemülsifiye EO'lar (NEO'lar) doğal et muhafazasında umut verici bir atılım sunmaktadır (Dammak vd., 2020; Amiri vd., 2019; Abdou vd., 2018).

1.6. Uçucu Yağların Etki Mekanizması

1.6.1. Antimikrobiyal Aktivite

Etin mikrobiyal ortamı, hem yüksek su aktivitesi hem de düşük asitliği ile mükemmel bir besin kaynağı olduğu için elverişlidir ve işleme ve depolama parametreleri (sıcaklık ve oksijen mevcudiyeti) mikrobiyota bileşimini değiştirir (Doulgeraki vd., 2012). EO bileşenlerinin antimikrobiyal aktivitesi, ait oldukları fitokimyasal ailenin moleküler yapısına bağlıdır. Birincil EO metabolitleri terpenler, fenilpropanoidler, aldehytler, esterler, alkoller ve ketonlardır (Bhavaniramya vd., 2019). EO'nun tek bir etki mekanizması yoktur; ancak en yaygın mekanizma, EO'nun lipofilik özelliklerinin kolaylaştırdığı membran geçirgenliğinin artmasıdır. Bu özellikler, difüzyona ve sitoplazmik membranlarla etkileşime yardımcı olur. Yüksek geçirgenlik, sitoplazmik içeriğin kaybına ve hücre ölümüne neden olur (Burt, 2004).

EO'ların antimikrobiyal etkinliği, EO bileşimi ve hedef mikroorganizmalarla ilgili mekanizmalara bağlıdır (Pateiro vd., 2021). Membran bozulması en yaygın mekanizmadır, çünkü EO bileşikleri fosfolipid çift tabakalarında birikir, bütünlüğü değiştirir, geçirgenliği artırır, hücre içi içeriği serbest bırakır, membran proteinlerini bozar ve hücre ölümüne yol açar (Calo vd., 2015; Huang vd., 2014). Gram-pozitif bakteriler, kalın peptidoglikan tabakaları nedeniyle daha dirençlidir (Guimarães vd., 2019), Gram-negatif bakterilerde ise bloke porin kanalları hidrofobik bileşiklere karşı direnci artırır (Bharti vd., 2020).

Hardal, kekik, oregano, tarçın ve sarımsak uçucu yağları ve bunların bileşenleri (timol, karvakrol, sinnamaldehit, öjenol) *E. coli* gibi gıda kaynaklı patojenlere karşı geniş spektrumlu antimikrobiyal aktivite gösterir (Clemente vd., 2016; Yuan vd., 2019). Hardal EO, hücre zarlarını bozar ve ATP sızıntısına neden olur (Turgis vd., 2009), tarçın EO ise zar bütünlüğünü bozar ve elektrolit sızıntısına neden olur (Huang vd., 2014). Sarımsak EO, mantar hiflerini (*P. funiculosus*) hedef alır (Li vd., 2014). EO'lar, membranları bozarak, duvar biyosentezini inhibe ederek, mitokondriyi bozarak, efflux pompalarını baskılayarak ve reaktif oksijen türleri üreterek mantarları engeller (Nazzaro vd., 2017). EO aktivitesi, yağ konsantrasyonuna, mikrobiyal yüke ve hücresel yapıya bağlıdır (Siddique vd., 2020). Timol ve karvakrol gibi monoterpenoidlerdeki hidroksil grupları ve delokalize elektron sistemleri, Gram-negatif patojenlere karşı bile antimikrobiyal etkilerini artırır (Kachur vd., 2020).

1.6.2. Antioksidan Etkinlik

Oksidatif bozulma, etin bileşimi ve depolanmasından etkilenen, etin korunmasında önemli bir sorundur (Domínguez vd., 2019). Doymamış lipitler, lipitlerin, proteinlerin ve pigmentlerin oksidasyonunu uyararak oksidatif yolakları tetikleyen reaktif türler oluşturur (Manassis vd., 2020). Antioksidanlar, hidrojen atomu veya elektron transferi veya metal şelasyonu yoluyla oksidasyonu kontrol eder (Granato vd., 2018). Birçok EO, serbest hidroksil gruplarına sahip fenolik bileşikler ve oksidasyonu inhibe eden ikincil metabolitler nedeniyle antioksidan aktiviteye sahiptir (Chen vd., 2023). Çeşitli bitkilerden elde edilen uçucu yağlar, oksijenli monoterpenler (α -terpineol, mentol, linalool, sitronellal), fenolik terpenoidler (timol, karvakrol) ve terpenik hidrokarbonlar (α -pinen, mirsen) içerir ve bunların tümü doğal et muhafazası için güçlü antioksidan kapasite gösterir (Ricardo-Rodrigues vd., 2024; Aguiar Campolina vd., 2023; Šojić vd., 2023). Jaradat vd. (2017), üç farklı bölgeden elde edilen *Ruta chalepensis* EO'nun serbest radikal inhibe edici etkisini göstermiştir. Bu çalışmalar, EO'ların et ve et ürünlerinde oksidatif bozulmayı önlemek için doğal alternatifler olarak potansiyelini doğrulamaktadır. Ghasemi vd. (2016), α -pinen ve cis-okimen açısından zengin *Ferulago angulata* EO'nun BHT'ye benzer serbest radikal temizleme özellikleri sergilediğini bulmuştur. Benzer

şekilde, karvon ve limonenin baskın olduğu *Mentha spicata* EO da eşdeğer aktiviteye sahipti (Snoussi vd., 2015).

1.7. Ette EO'ların Antimikrobiyal Etkileri

Tek tek ve kombinasyonlar halinde, birçok uçucu yağ ve bunların aktif bileşenleri *in vitro* olarak yüksek antimikrobiyal aktivite gösterir (Mohamed ve Alotaibi, 2023; Chouhan vd., 2017). Uçucu yağların antimikrobiyal özellikleri, disk difüzyonu, agar ve et suyu seyreltme, zaman-öldürme analizi ve taramalı elektron mikroskopu kullanılarak değerlendirilmiştir (Burt, 2004). Minimum inhibitör konsantrasyon (MIC), bir mikroorganizmanın büyümesini engelleyen en düşük konsantrasyondur (Lambert vd., 2001). Dussault vd. (2014), kekik (*Thymus capitatus Hoff.*) ve kekik (*Thymus vulgaris*, *T. zygis*) yağlarının geniş spektrumlu antibakteriyel aktiviteye sahip olduğunu, hardal yağı ve ana bileşeni alil izotiyosiyanatın da güçlü antibakteriyel etki gösterdiğini bulmuştur (Akhtar ve Khan, 2024). EO'ların etkinliği bitkinin hangi kısmının kullanıldığına, damıtma yöntemine ve coğrafi kaynağa bağlıdır (Chakravarty vd., 2023).

Et ve et ürünlerindeki EO'lar, raf ömrünü uzatan güçlü antimikrobiyal etkiler sergilemektedir (Ji vd., 2023; Papadochristopoulos vd., 2021; Kargozari vd., 2019; Jayasena vd., 2013). Buhar halindeki kekik, biberiye ve portakal yağları antibakteriyel aktivite göstermiştir (Luna-Guevara vd., 2021). Kekik yağı (2000 mg/L), duyuşal kaliteyi etkilemeden 144 saat sonra *Salmonella*'yı 1,97 log CFU/g oranında azaltmıştır. Adaçayı yağı (*Salvia officinalis L.*), duyuşal özellikleri geliştirirken aerobik ve patojenik bakterilerin toplam sayısını azaltmıştır (Šojić vd., 2018). Kaffir limonu (*Citrus hystrix DC*) ve parmak kökü (*Boesenbergia pandurata Roxb.*) yağları, Çin sosisi raf ömrünü sırasıyla beş ve on gün uzattı (Kingchaiyaphum ve Rachtanapun, 2012). *Cinnamomum cassia* ve kekik yağları jambonda *L. monocytogenes*'i inhibe etti (Dussault vd., 2014). Defne yaprağı yağı (*Laurus nobilis L.*) koliformları 3 log CFU/g azalttı ve raf ömrünü iki gün uzattı (da Silveira vd., 2014). Karabiber yağı, lipid oksidasyonunu önlemiş ve *Pseudomonas* ve *Enterobacteriaceae*'nin büyümesini inhibe etmiştir (Zhang vd., 2016).

EO antimikrobiyal aktivitesi, fenoller, alkoller, aldehitler, asitler, esterler, eterler ve metoksi bileşikleri arasındaki etkileşimlerden kaynaklanır (Khwaza ve Aderibigbe, 2025). EO bileşenleri sinerjik, additif, kayıtsız veya antagonistik olarak etkileşime girebilir (Burt, 2004). Kekik ve biberiye yağları, *Aspergillus*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella* ve *E. coli*'ye karşı sinerjik etki gösterir (Hossain vd., 2016). Fenolik monotерpenler (timol, karvakrol, öjenol) *E. coli* üzerinde sinerjik etkiler gösterir (Kachur vd., 2020; Yuan vd., 2019; Pei vd., 2009). Bu kombinasyonlar gerekli EO miktarlarını azaltır ve duyusal etkileri en aza indirir (Hyldgaard vd., 2012). Kekik-portakal, anacardiaceae-lamiaceae ve kış çorbası-ardıç gibi kombinasyonlardaki EO'lar, *Listeria* gibi bakteriyel büyümeyi inhibe ederek çeşitli etleri etkili bir şekilde korumuş ve nihayetinde raf ömrünü uzatmıştır (Chaichi vd., 2021; Vasiljević vd., 2019; Sharma vd., 2018; Rimini vd., 2014; Djenane vd., 2011).

1.8. Etlerde Uçucu Yağların Kullanımındaki Sınırlamalar

EO'ların in vitro kontrollü koşullarda yapılan çalışmaları, geniş biyoaktiviteyi göstermektedir. Bununla birlikte, gıda matrislerinde kullanıldığında, EO'nun etkinliği azalır ve bu da gıda muhafazasında önemli bir sorun oluşturur. Etin heterojenliği, EO-hedef ilişkilerini belirleyen çeşitli fizikokimyasal özelliklere sahip farklı mikro ortamlar oluşturur (Gutierrez vd., 2008). Et ürünlerinde pür yağların kullanılmasının en büyük dezavantajı, EO bileşenlerinin et yağı ile etkileşime girerek seyreltilmesi ve biyoaktivitelerinin azalmasıdır (da Silva vd., 2021; Hyldgaard vd., 2012). Çiğ etin yağ içeriği genellikle yaklaşık %2,5'tir ve bu oran kasın yeri, türü, cinsiyet, yaş ve yetiştirme uygulamaları gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir (López-Bote, 2017). Elektrostatik veya hidrofobik kuvvetlerin aracılık ettiği EO bileşenlerinin et proteinleri ile etkileşimleri, biyoaktivitelerini azaltabilir (Ji vd., 2023). Gıda sisteminin pH'ı da bu etkileşimleri modüle eder. pH seviyesi düştüğünde (5'in altına), EO hidrofobikliği artar ve böylece et matrislerinde çözünürlüğü azalır. Çiğ etin pH'ı yaklaşık 5,5 iken, işlenmiş etin pH'ı 6 ile 6,5 arasında değişir (Gutierrez vd., 2008).

Corrêa vd. (2021), tarçın EO'nun birincil biyoaktif bileşiği olan sinnamaldehit'in in vitro antibakteriyel aktivitede etkili olduğunu, ancak dilimlenmiş jambonda *S. enteritidis* ve *L.*

monocytogenes büyümesini kontrol edemediğini bulmuştur. Shekarforoush vd. (2015), güçlü in vitro antibakteriyel aktivitesine rağmen, kekik EO'nun tavuk etindeki bakterileri sadece 8°C'de ilk 24 saat boyunca inhibe ettiğini belgelemiştir. Sosislere defne yaprağı EO ilavesi, raf ömrünü uzatarak etkili antimikrobiyal aktivite göstermiştir, ancak sosislerin organoleptik özelliklerini etkilemiştir ve EO içermeyen sosisler tüketiciler tarafından daha fazla kabul görmüştür (da Silveira vd., 2014). Smaoui vd. (2016), *Mentha piperita* EO'nun sığır etine eklenmesinin, EO'nun uçuculuğundan kaynaklanan güçlü koku nedeniyle kabul oranında bir düşüşe neden olduğunu bildirmiştir.

Porter vd. (2020), tavuk etinde beyaz hardal EO'nun etkinliğinin azaldığını belirtmiştir. Bu kaybı telafi etmek için EO seviyelerinin artırılması, duyuşal eşikleri olumsuz etkileyebilir (Hyldgaard vd., 2012). Ette EO biyoaktivitesini engelleyen birkaç faktör vardır; bu nedenle, EO stabilitesini ve etkinliğini artırmak için nanoemülsiyonlar, kapsülleme veya EO kaplı filmler gibi alternatif teknolojiler önerilmektedir (Dalei vd., 2025; Rathod vd., 2024; Sayadi vd., 2024; Snoussi vd., 2022; Ujilestari vd., 2023).

1.9. Gıda Muhafazası için Uçucu Yağların Nanoenkapsülasyonu

Uçucu yağlar, yapraklar, gövdeler, çiçekler, meyveler ve tomurcuklar gibi aromatik ve tıbbi bitkilerden elde edilen uçucu ikincil metabolitlerdir (Falleh vd., 2019). Yaklaşık iki bin bitki türü, yaklaşık üç bin EO üretir ve bunlardan sadece üç yüzü endüstriyel olarak kullanılır. Bunlar, terpenler, terpenoidler, alkoller, esterler, ketonlar, fenilpropanoidler ve aldehytlerin karmaşık karışımlarıdır. Sentetik koruyucular etkili olsalar da, sağlık ve çevre üzerinde olumsuz etkileri vardır, bu da daha güvenli bitki bazlı alternatiflere olan ilgiyi artırmaktadır. Örnekler arasında gıda kaynaklı patojenlere karşı Eco-SMART, Eugenol TweenR, Pycnogenol R ve Protecta formülasyonları sayılabilir (Prakash ve Kiran, 2016). Tavuk etinin korunmasında önemli antimikrobiyal ve antioksidan aktiviteler gösteren, uçucu yağ bazlı birkaç çalışma rapor edilmiştir (Çizelge 1.2).

Bununla birlikte, serbest formdaki uçucu yağlar, hızlı salınım, gıda özelliklerini etkileyen güçlü aroma, oksidatif bozunma ve biyolojik aktivite kaybı gibi sınırlamalarla karşı karşıyadır (da Silva vd., 2021). Nanoenkapsülasyon, biyoaktif maddeleri 100 nm'nin

altındaki çaplara sahip polimerik matrislere gömerek bu sorunları azalmakta ve böylece mikrobiyal inhibisyon, antioksidan stabilitesi, çözünürlük ve duyu kaliteyi iyileştirmektedir (Ojeda-Piedra vd., 2022; Snoussi vd., 2022; Pabast vd., 2018; Ghaderi-Ghahfarokhi vd., 2016). *Cinnamodendron dinisii* EO depolayan zein nanopartiküller antioksidan aktivitesini korumuştur (Xavier vd., 2021) ve *Citrus reticulata* EO oksidatif stabiliteyi artırmıştır (Mahdi vd., 2021).

Çizelge 1.2: Tavuk eti muhafazasında antimikrobiyal ve antioksidan aktiviteleri olan uçucu yağlara dayalı son çalışmalar.

No.	Uçucu yağ	İşlem	Et ve Koruma Koşulları	Sonuç	Kayn.
1	Limon, Kişniş, Fesleğen, Linalool, L-limonen	Serpme, süperkritik CO ₂ 15 dakika boyunca işlem	Tavuk eti, 4 °C/ 12 gün	↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal büyüme	(Fabio vd., 2025)
2	Peynir altı suyu proteini izolatu, <i>Ziziphora clinopodioides</i>	Aktif yenilebilir kaplama	Tavuk filetosu, 4 °C/ 12 gün	↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal büyüme ↓ Toplam uçucu azot (TVB-N) ↓ Peroksit değeri (PV) ↑ Organoleptik özellikler ↔ Duyusal özellikler ↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal bozulma	(Hajjar Bargh vd., 2025)
3	Kekik, mercanköşk, karanfil ve bunların kombinasyonu	Modifiye atmosfer ambalajlama (MAP) ile aktif ambalajlama	Soğutulmuş taze tavuk, 4 °C/14 gün	Gecikmeli lipit oksidasyonu ↓ Tiyo-barbitürik asit (TBARS) ↓ TVB-N ↓ Toplam canlı sayı (TVC)	(Li vd., 2025)
4	Nane	Püskürtme Ultrasonikasyon (37kHz, 600W)	Tavuk eti, 4 °C/12 gün	↑ Raf ömrü ↓ Toplam plaka sayısı	(Ashraf vd., 2025)

5	Zeytin, Susam, Soya Fasulyesi, Hardal	Doğrudan karıştırma	Tavuk eti, 4 °C/09 gün	Gecikmeli lipit oksidasyonu ↑ duyusal özellikler Zeytinyağı, mikrobiyal büyümeyi ve oksidasyonu azaltmada ve duyusal özellikleri korumada etkili sonuçlar vermiştir. ↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal bozulma (toplam koloni ve koliform sayısı azalması) ↓ Tiyo-barbitürik asit (TBARS) ↓ TVB-N ↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal büyüme Gecikmeli lipit oksidasyonu ↓ Tiyo-barbitürik asit (TBARS) Geniş spektrumlu inhibisyon ↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal bozulma Gecikmeli lipit oksidasyonu ↓ TBARS ↓ TVB-N ↓ PV ↔ Duyusal özellikler ↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal büyüme Yüksek antimikrobiyal aktivite	(Hasan vd., 2024)
6	Bakteriyel selüloz-Kekik EO	Emülsiyon kaplama	Soğutulmuş tavuk eti, 4 °C/12 gün		(Xu vd., 2024b)
7	<i>Litsea cubeba</i> , Manyok nişastası	Yenilebilir film kaplama	Tavuk eti, 4 °C/10 gün		(Shi vd., 2024)
8	Tarçın, Peynir altı suyu proteini izolatu, Nano-kitosan	Yenilebilir aktif kaplama	Tavuk eti, 4 °C/12 gün		(Sheerzad vd., 2024)
9	Kekik	Aktif film kaplama	Tavuk eti, 4±1 °C/21 gün		(Mirsharifi vd., 2023)

10	EO'lar ve bitki özlerinin kombinasyonları	Doğrudan ilave	Tavuk eti, 4 °C/21 gün	↑ Raf ömrü ↓ Lipid oksidasyonu Orta derecede duyusal kabul	(Khodaei vd., 2023)
11	Sinnamaldehit, timol, karvakrol	Doğrudan ilave	Tavuk eti, 4 °C/06 gün	↑ Raf ömrü ↓ TVB-N ↓ Mikrobiyal büyüme ↔ Duyusal kalite ↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal bozulma	(Wang vd., 2023)
12	Kekik	Aktif yenilebilir kaplama	Tavuk göğüs eti, 4 °C/12 gün	↓ TVC ↓ TBARS ↓ TVB-N Geliştirilmiş duyusal özellikler ↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal büyüme	(Yang vd., 2023)
13	Biberiye	REO içeren aktif ambalaj chitosan filmi	Tavuk burgerleri, 4 °C/20 gün	↓ Lipid oksidasyonu ↓ TBARS ↔ Duyusal kalite ↑ Raf ömrü ↓ Toplam mezofilik büyüme	(Farokhzad vd., 2023)
14	Hardal, Sarımsak, Kekik (Üçlü karışım)	Daldırma	Tavuk göğsü eti, 4±1 °C/7 gün	↓ Lipid oksidasyonu ↔ Duyusal kalite ↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal büyüme	(Rivera de la Cruz vd., 2023)
15	Kekik	Kitosan kaplama	Tavuk göğsü filetoları, 4 °C/12 gün	↓ TVC ↓ TBARS ↓ TVB-N ↑ duyusal özellikler ↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal büyüme	(Zheng vd., 2023)
16	<i>Satureja bachtiarica</i>	Aktif yenilebilir kaplama (Kitosan, resveratrol)	Tavuk göğsü filetoları, 4 °C/12 gün	↓ PV ↓ TBARS ↑ Duyusal özellikler	(Abdalbeygi vd., 2022)

17	<i>Rosmarinus officinalis</i>	Nisin ile sinerjik olarak birleştirilmiş aktif yenilebilir kaplama (kitosan)	Soğutulmuş tavuk filetoları, 4 °C/12 gün	↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal büyüme ↓ Psikrotrofik sayı ↓ Mezofilik sayı ↓ Enterobacteriaceae ↓ TBARS ↓ TVB-N ↑ Duyusal özellikler ↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal bozulma ↑ Antimikrobiyal aktivite ↓ Lipid oksidasyonu ↓ PV ↓ TBARS ↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal bozulma ↓ TVC ↓ Lipid oksidasyonu ↓ TBARS ↑ Duyusal özellikler ↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal büyüme (TVC, Koliformlar, Küfler/Mayalar) ↓ TVB-N ↓ TBARS ↔ Duyusal kalite ↓ Mikrobiyal büyüme ↑ Antibakteriyel aktivite ↓ TVB-N ↓ PV Organoleptik özelliklerin korunması	(Mavalizadeh vd., 2022)
18	Kekik, Tarçın, Kanel, Sarımsak	Düşük doz γ ışınlaması (1 kGy) ile birlikte doğrudan uygulama	Kemiksiz tavuk but eti, 4 °C/17 gün	↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal bozulma ↑ Antimikrobiyal aktivite ↓ Lipid oksidasyonu ↓ PV ↓ TBARS ↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal bozulma ↓ TVC ↓ Lipid oksidasyonu ↓ TBARS ↑ Duyusal özellikler ↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal büyüme (TVC, Koliformlar, Küfler/Mayalar) ↓ TVB-N ↓ TBARS ↔ Duyusal kalite ↓ Mikrobiyal büyüme ↑ Antibakteriyel aktivite ↓ TVB-N ↓ PV Organoleptik özelliklerin korunması	(Shankar vd., 2022)
19	Zencefil EO, elma kabuğu özü ve zein	Daldırma + kaplama	Tavuk but eti, 4±1 °C/17 gün	↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal bozulma ↓ TVC ↓ Lipid oksidasyonu ↓ TBARS ↑ Duyusal özellikler ↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal büyüme (TVC, Koliformlar, Küfler/Mayalar) ↓ TVB-N ↓ TBARS ↔ Duyusal kalite ↓ Mikrobiyal büyüme ↑ Antibakteriyel aktivite ↓ TVB-N ↓ PV Organoleptik özelliklerin korunması	(Barkhordari vd., 2021)
20	<i>Artemisia fragrans</i>	Yenilebilir kaplama (kitosan)	Tavuk filetosu, 4 °C/12 gün	↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal büyüme (TVC, Koliformlar, Küfler/Mayalar) ↓ TVB-N ↓ TBARS ↔ Duyusal kalite ↓ Mikrobiyal büyüme ↑ Antibakteriyel aktivite ↓ TVB-N ↓ PV Organoleptik özelliklerin korunması	(Yaghoubi vd., 2021)
21	<i>Zataria multiflora Boiss</i>	Aktif film kaplama (jelatin, nano-kitosan içeren)	Tavuk göğüs eti, 4 °C/14 gün	↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal büyüme (TVC, Koliformlar, Küfler/Mayalar) ↓ TVB-N ↓ TBARS ↔ Duyusal kalite ↓ Mikrobiyal büyüme ↑ Antibakteriyel aktivite ↓ TVB-N ↓ PV Organoleptik özelliklerin korunması	(Hematizad vd., 2021)

25	Kekik EO, Laktik asit	MAP	Tavuk göğsü filetoları, 4 °C/12 gün	↓ Mikrobiyal büyüme ↓ Lipid oksidasyonu ↓ TBARS	(Jaspal vd., 2021)
26	Yaz çorbası	Kitosan/düşük yoğunluklu polietilen çift katmanlı film ile aktif ambalajlama	Tavuk göğsü filetosu, 4±1 °C/13 gün	↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal büyüme ↓ TBARS ↓ Lipid oksidasyonu ↓ Mikrobiyal büyüme	(Moradi vd., 2020)
27	Elettaria cardamomum	Vakumlu ambalajlı	Tavuk baget, 4 °C/16 gün	↓ Lipid oksidasyonu ↓ TBARS ↔ Duyusal kalite ↑ Raf ömrü ↓ Mikrobiyal büyüme	(Khorshidi vd., 2021)
28	Kekik yağı	Aktif yenilebilir kaplama	Soğutulmuş tavuk eti, 4 °C/16 gün	↓ TVB-N ↓ TBARS ↓ Lipid oksidasyonu ↔ Duyusal kalite ↑ Raf ömrü	(Garavito vd., 2020)
29	Karanfil, Limon fesleğeni EO	Doğrudan ilave	Tavuk eti, 5±2 °C/12 gün	↓ Mikrobiyal büyüme ↑ Antimikrobiyal aktivite	(Hartanti vd., 2020)

1.10. Nanoemülsiyonlar ve İşlevsel Rol

Su içinde yağ (O/W) ve yağ içinde su (W/O) emülsiyonları yaygın olmakla birlikte, W/O/W ve O/W/O tipleri hem polar hem de polar olmayan bileşikleri kapsüller (Zhang vd., 2017b; Arriaga vd., 2015). Nanoemülsiyonlar (20–200 nm) fizikokimyasal özellikleri, iyileştirerek stabiliteyi ve şeffaflığı artırır (Barradas ve de Holanda e Silva, 2021). Daha küçük damlacıklar, mikropların zarlarından geçmelerini kolaylaştırarak nanoemülsiyonlardaki biyoaktif bileşiklerin antimikrobiyal potansiyelini artırır (Moraes-Lovison vd., 2017). Bazı çalışmalar, kereviz tohumu (*Apium graveolens*), tarhun (*Artemisia dracunculus L.*) ve karanfil (*Eugenia aromatica*) nanoemülsifiye uçucu yağları

kullanarak, pür yağlara göre membran geçirgenliğini ve inhibe edici potansiyeli artırdıklarını bildirmiştir (Azizkhani vd., 2021; Nirmala vd., 2020; de Meneses vd., 2019). Damlacık yüzey alanının artması da antioksidan potansiyeli artırmaktadır. Çok sayıda nanoemülsiyon damlacığı nedeniyle artan yüzey alanı, EO'nun biyoaktif bileşikleri ile serbest radikaller arasındaki etkileşimi kolaylaştırarak yüksek radikal temizleme kapasitesi ve önemli antioksidan potansiyeli sağlamıştır (Gholamhosseinpour vd., 2023; Badr vd., 2021).

1.11. Nanoemülsiyonların Üretimi

Üretim, nanoprecipitation, inklüzyon kompleksasyonu, çözücü buharlaştırma, koaservasyon ve süperkritik akışkan işleme gibi teknikleri içerir. Nanoprecipitasyon, lipofilik EO'ları poli (alkil siyanoakrilat), poli (ϵ -kaprolakton), polilaktik asit ve poli (laktik-ko-glikolik asit) gibi polimerlere kapsüllemek için genel olarak kullanılan, tekrarlanabilir bir yöntemdir (Walia vd., 2019; Miladi vd., 2017). İçerme kompleksleşmesi, çekirdek maddeler ve polimer matrisi arasında hidrojen bağı, Van der Waals kuvvetleri ve hidrofobik bağlar gibi moleküler etkileşimler oluşturur. β -siklodekstrin ve β -laktoglobulin ile hidrofobik hidrojenler arasındaki moleküler etkileşimler, etkili nanotaşıyıcılar (Aree ve Jongrungruangchok, 2016). Mikroenkapsülasyon yöntemi olan koaservasyon, bir karışımdaki polimerlerin iki faza ayrıldığı bir işlemdir: glutaraldehit veya transglutaminaz gibi çapraz bağlayıcılar kullanılarak çekirdek malzemeyi (örneğin bir yağ damlacığı) çevreleyen, çözücü bakımından zengin ve polimer bakımından zengin (koaservat) bir faz (Ezhilarasi vd., 2013). Çözücü buharlaştırma-emülsifikasyon, nanopartikülleri sentezlemek için kullanılan bir işlemdir (Fornaguera vd., 2015).

1.12. Bileşenler ve Hazırlama Yöntemleri

Uçucu yağ ve su ana bileşenlerdir ve yüzey aktif maddeler sistemi stabilize eder (Dasgupta vd., 2019). Hazırlama yöntemleri düşük enerji ve yüksek enerji olarak sınıflandırılır (Gupta vd., 2016). Hazırlamada kullanılan yöntem, parçacıkların boyutunu, nanoemülsiyonun stabilitesini ve kullanılan yüzey aktif maddenin oranını belirler (Shafiq-un-Nabi vd., 2007).

1.12.1. Yüksek Enerji Yöntemleri

Yüksek enerjili prosedürler, yağ-su arayüzünde dispersiyon fazı damlacıklarının boyutunu azaltabilecek yıkıcı kuvvetler oluşturmak için mekanik enerjinin uygulanmasını içerir (Karthik vd., 2017). Bu yöntemlerle nanoemülsiyonların üretimi genellikle iki temel aşamadan oluşur. Boyutları 500 ila 1000 nm arasında değişen geleneksel emülsiyonlar, birincil homojenizatörlerde yağ, sulu faz ve yüzey aktif madde karıştırılarak geliştirilir (Ghani vd., 2018). Damlacıkların çapı, yüksek basınçlı homojenizatör, mikroakışkanlaştırıcı veya ultrason kullanılarak damlacık arayüzüne yüksek yoğunluklu mekanik enerji uygulanmasıyla en aza indirilir (Barradas ve de Holanda e Silva, 2021). Ayrıca, emülsifikasyona yüzey aktif maddeler eklendiğinde, damlacık yüzeyindeki arayüzey gerilimi azalır ve bu da yüksek enerjili damlacık boyutu küçültme emülsifikasyonunda yıkıcı kuvvetlerin etki etmesine olanak tanır (Gupta vd., 2016).

1.12.2. Düşük Enerjili Yöntemler

Spontan veya düşük enerjili emülsifikasyon üretiminde damlacıklar oluşturmak için minimum dış enerji gereklidir. Karışımın iç enerjisi, kimyasal denge durumundan çıktığında emülsifikasyon için gerekli enerjiyi üretir. Bu emülsiyon süreçleri, bir yüzey aktif maddenin fazını değiştirdiğinde (faz geçişi) üretilen kimyasal enerjiyi kullanır ve bu, bileşim değişikliği (faz tersine çevirme bileşimi) veya sistemin sıcaklık değişikliği (faz tersine çevirme sıcaklığı) ile tetiklenebilir. Düşük enerjili nanoemülsiyon teknikleri, su-içinde-yağ (W/O) sisteminin yağ-içinde-su (O/W) sistemine ve tersine dönüşmesiyle yüzey aktif maddenin faz inversiyonuna neden olur (Solans vd., 2012).

En yaygın iki spontan emülsiyon stratejisi, geçiş faz inversiyonu ve katastronik faz inversiyonudur (Kumar Ankit vd., 2015). Değişen sıcaklıklarda yüzey aktif madde ve sıvı fazları arasındaki etkileşim kuvvetleri, bir fazdan diğerine geçişi belirler; bu, faz inversiyon sıcaklığı (PIT) fenomeni olarak da bilinir (Feng vd., 2021). Faz inversiyon bileşiminde (PIC), sabit bir sıcaklık korunarak ve sürekli bir dağınık faz eklenerek sistemin bileşimi değiştirilebilir (Feng vd., 2020).

1.13. Nanoemülsiyonlarda Kararsızlık Olayları

Emülsiyon kararlılığı, sistemin zaman içinde ve elverişsiz çevre koşulları altında fizikokimyasal özelliklerdeki değişikliklere dayanma kabiliyeti ile belirlenir. Damlacık boyutunun nano ölçeğe düşmesi, Brownian hareketinin baskın olması nedeniyle kinetik kararlılığı artırır ve damlacıkların emülsiyonun tamamına dağılmasını sağlar (Artiga-Artigas vd., 2019). Çapı 100 nm'den küçük damlacıklar Brownian hareketinden etkilenirken, yerçekimi kuvvetleri esas olarak daha büyük damlacıkları kontrol eder. Emülsiyonlarda kararsızlık örnekleri arasında agregasyon, birleşme, yerçekimi ayrışması ve Ostwald olgunlaşması sayılabilir (Karthik vd., 2017). Yerçekimi ayrışması, dağılmış ve sürekli fazlar arasındaki yoğunluk farklılıkları nedeniyle meydana gelir ve sedimentasyon veya krema oluşumuna neden olur; bu durumda daha büyük damlacıklar yerçekimi nedeniyle yükselir veya alçalır (Jafari ve McClements, 2018). Uçucu yağlar sudan daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan, krema oluşumu daha çok yağ-su (O/W) emülsiyonlarında görülür (Helgeson, 2016; Dapčević vd., 2013).

Nanoemülsiyonların stabilitesi, hidrofobik, Van der Waals, sterik ve elektrostatik etkileşimler dahil olmak üzere farklı türdeki kuvvetlerin toplamının aracılık ettiği emülsiyon damlacıkları arasındaki kolloidal etkileşimlerle açıklanır (McClements, 2007). Nanoemülsiyonlardaki daha küçük damlacıkların artan yüzey alanı, bu kuvvetlerin dengesine bağlı olarak damlacıkların temasını kolaylaştırabilir veya sınırlandırabilir. Birleşme sırasında damlacıklar birleşerek tek bir büyük damlacık oluşturur. Flokülasyon fenomeninde ise yağ damlacıkları birbirine yaklaşarak agregasyonlar oluşturur, ancak bireysel bütünlüklerini korurlar. Bu tür süreçler, damlacık boyutu heterojenliğinin bir göstergesi olan yüksek polidispersite indeksi (PDI) taşıyan nanoemülsiyonlarda yaygındır (Karthik vd., 2017). Ostwald olgunlaşması, daha küçük damlacıkların sürekli faz boyunca daha büyük damlacıklarla doğru dağılmasıyla meydana gelir (Nakashima vd., 2021). Depolama ve işleme sırasında kinetik stabiliteyi korumak için, nanoemülsiyonlar damlacık özelliklerini koruyan stabilizasyon yaklaşımlarına ihtiyaç duyar (Dammak vd., 2020). 0,10-0,25 arasındaki bir PDI, damlacık boyutlarının dağılımının homojen olduğunu gösterirken (Ferreira ve Nunes, 2019), 0,5'ten büyük bir PDI, dağılımın geniş olduğunu gösterir (Dos Santos vd., 2015). PDI'daki bir artış, öncelikle Ostwald

olgunlaşması yoluyla nanoemülsiyonlarda kararsızlığa neden olabilir. Zeta potansiyeli de damlacıkların elektrik potansiyeline karşılık gelen önemli bir stabilite göstergesidir. ZP, yüzey aktif maddenin elektrik yükü ve iyonik güç ve pH gibi karışım koşullarından etkilenir (Ferreira ve Nunes, 2019).

1.14. Uçucu Yağların ve Nanoemülsiyonların Güvenlik Profili

Antimikrobiyal ve toksin önleyici özelliklerinin yanı sıra, uçucu yağların ve nanoemülsiyonlarının önemli gıda koruyucuları olarak ticari ölçekte kullanımı, toksik olmayan etkilerini ve tüketici sağlığı üzerindeki yararlı etkilerini doğrulamak için halen kapsamlı güvenlik değerlendirmeleri gerektirmektedir. EO'ların kimyasal ve toksikolojik değerlendirmeleri için temel prosedürler, Gıda ve Beslenme Bilimi Derneği, Gıda Kodeksi Komisyonu (Codex Alimentarius Commission, CAC), Avrupa Konseyi (Council of Europe, CoE), Gıda Kimyası Kodeksi (Food Chemical Codex, FCC), Gıda ve İlaç İdaresi (Food and Drug Administration, FDA), Aroma ve Ekstrakt Üreticileri Derneği (Flavor and Extract Manufacturers Association, FEMA) ve Uluslararası Aroma Endüstrileri Örgütü (International Organization of Flavor Industries, IOFI) gibi farklı ulusal ve uluslararası kuruluşlar tarafından geliştirilmiştir. EO'ların ve nanoemülsiyonların güvenlik ve toksisite çalışmaları, çoğunlukla sıçanlar gibi model hayvanlar üzerinde, Medyan Ölümcül Doz (LD_{50}) belirlenerek güvenli dozun tespit edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Dwivedy vd. (2018), farelerde *Illicium verum* EO'nun LD_{50} değeri 11.257,14 μ L/kg olan akut toksisitesini bildirmiştir. Lindan (5.956 mg/kg), bavistin (1.500 mg/kg) ve nistatin (8.000 mg/kg) gibi sentetik koruyuculardan daha yüksek LD_{50} değerlerine sahip EO'lar ve nanoemülsiyonlar, çevre dostu koruyucular olarak güvenliklerini vurgulamaktadır (Maurya vd., 2021). Benzer şekilde, *Pimpinella anisum* uçucu yağı (PAEO), pür ve nanoyapılı formlarında sırasıyla 19.879,89 μ L/kg ve 13.641,35 μ L/kg LD_{50} değerlerinde azalmalar göstermiştir; bu durum, daha küçük emülsiyon boyutu ve nano kapsül başına daha yüksek uçucu yağ konsantrasyonundan kaynaklanıyor olabilir (Das vd., 2021).

Chaudhari vd. (2021), *Petroselinum crispum* uçucu yağı (PEO) ve kitosan kapsüllü PEO'nun akut toksisite testini gerçekleştirmiş ve sırasıyla 10.765 mg/kg ve 26.830 mg/kg LD₅₀ değerleri bulmuştur. Nanopartiküllerin toksisitesi, şekilleri, boyutları, yükleri ve reaktiviteleri temelinde değişiklik gösterir (Fadeel ve Garcia-Bennett, 2010). Royal Society ve Royal Academy of Engineering (RAEng) gibi düzenleyici kurumlar ile Sağlık, Çevre ve Yeni Ortaya Çıkan Riskler Bilimsel Komitesi (SCHEER) ve Tüketici Güvenliği Bilimsel Komitesi (SCCS), oksidatif stres yoluyla bilinmeyen emilim ve potansiyel genotoksisite nedeniyle aşırı kullanım konusunda uyarıda bulunmaktadır (Maurya vd., 2021). Gıda zincirinde nanomalzemelerin alımı ve dağılımını değerlendirmek için daha fazla in vitro ve in vivo araştırma yapılması gerekmektedir.

1.15. Karabiber Esansiyel Yağı

Piper nigrum L.'den elde edilen karabiber esansiyel yağı (BPEO), tavuk eti için doğal bir koruma sistemi geliştirmek için uygun bir seçimdir. Fonksiyonel aktivitesi ve hafif, kabul edilebilir aroması nedeniyle BPEO, daha düşük inhibisyon konsantrasyonlarına ve yoğun aromaya sahip diğer esansiyel yağlara (örneğin tarçın, kekik) kıyasla daha yüksek inhibisyon konsantrasyonlarında daha etkilidir (Vergis vd., 2015). Önemli özelliği, menşei ve işleme sürecine göre biraz değişiklik gösteren, ancak esas olarak monoterpenler ve seskiterpenlerden oluşan karmaşık kimyasal yapısıdır. Genel olarak uçucu bileşenler arasında α -pinen, β -pinen, limonen, sabinen (monoterpenler) ve β -karyofilen (bir seskiterpen) bulunur. Bu bileşimsel karmaşıklık, sinerjik antimikrobiyal etkinlik sağlar. Lipofilik terpenler, mikrobiyal membranları bozarak etin korunması için gerekli olan geniş spektrumlu antimikrobiyal koruma sağlar (Šojić vd., 2023).

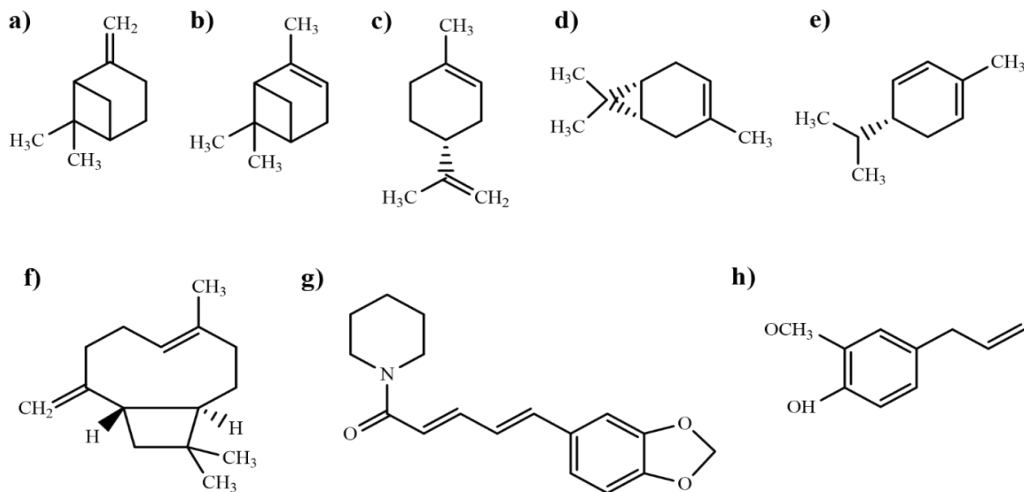
1.15.1. Karabiberin Biyoaktif Fitokomponentleri

BPEO, *Pseudomonas* ve *E. coli* gibi kümes hayvanlarında yaygın olarak görülen Gram negatif bakterilere karşı güçlü antimikrobiyal etkiler gösterir. Hidrofobik terpenler, lipid çift tabakalarına nüfuz ederek yapısal düzensizliğe ve hücre lizisine neden olur (Paul vd., 2020). β -Karyofilen, mikrobiyal hücre duvarlarını dengesizleştirerek çevresel strese karşı duyarlılığı artırır (Di Sotto vd., 2020). Bu mekanizmalar, tavuk etinin raf ömrünü uzatmak için gerekli olan yüksek düzeyde mikrobiyal kontrol sağlar. BPEO'nun antioksidan

potansiyeli de aynı derecede önemlidir. Kümes hayvanı eti yüksek düzeyde çoklu doymamış yağ asitleri (PUFA) içerdiğinden, lipid oksidasyonu hızlıdır (Barroeta, 2007).

BPEO bileşenleri, özellikle fenoller ve β -karyofilen, serbest radikal temizleyiciler olarak işlev görür, ROS'u nötralize eder, TBARS oluşumunu bastırır ve ekşimeyi önler (Wang vd., 2021c; Bi vd., 2019; Zhang vd., 2016; Jeena vd., 2014). Bu, depolama sırasında istenen renk, stabilite ve duyu kaliteyi korur. Uçucu bileşiklere ek olarak, *Piper nigrum* ayrıca uçucu olmayan alkaloidler de içerir (Milenković ve Stanojević, 2021). Karabiberin fitokimyasal analizi, terpenoidler, flavonoidler, alkaloidler, tanenler, glikozitler, antrakınonlar ve steroidler dahil olmak üzere çeşitli ikincil metabolitleri ortaya çıkarmıştır (Nahak ve Sahu, 2011).

Gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi (GC-MS) ile belirlenen BPEO'nun (Şekil 1.1) ana bileşenlerinin β -karyofilen, limonen, 3-karen, sabinen, α -pinen ve β -pinen olduğu bulunmuştur (Wang vd., 2019; Jeena vd., 2014; Kapoor vd., 2009). Ek olarak, çoğunlukla yağ ve oleoresinlerden oluşan alkaloid piperin, ekstraktın biyoaktivitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Singh vd., 2013). Literatürde bulunan guaialol, 6-guaiene ve öjenol gibi diğer bileşenler, koruma potansiyelini artırır (Mashabela vd., 2022; Orav vd., 2004; Pino vd., 1990).



Şekil 1.1: Karabiber esansiyel yağında yaygın olarak bulunan bazı biyoaktif bileşiklerin kimyasal yapıları.

a) β -pinen, b) α -pinen, c) D-limonen, d) 3-karen, e) α -fellandren, f) β -karyofilen, g) piperin, h) öjenol.

Ana uçucu bileşen olan β -karyofilen, güçlü lipofilik membran penetrasyonu gösterir, bakteriyel fosfolipid çift katmanlarını bozar ve gözenek oluşumunu, sitoplazmik sızıntıyı ve proton hareketli kuvvetin depolarizasyonunu tetikler. Gram negatif bakteriler özellikle etkilenir. Ek olarak, β -karyofilen antiinflamatuvar özellikler gösterir (Dahham vd., 2015), bu da onu temiz etiketli gıda uygulamaları için faydalı kılar. Sabinen ve limonen gibi monoterpenler penetrasyon arttırıcılar olarak işlev görür. Küçük molekül boyutları ve uçuculukları, hızlı bakteriyel membran penetrasyonunu mümkün kılar, böylece hücre duvarı geçirgenliğini artırır ve β -karyofilen gibi daha büyük bileşiklerin sinerjik aktivitesini destekler (Tang vd., 2023). Uçucu olmayan bir alkaloid olan piperin, buhar distilasyonu ile edilen EO'dan ziyade esas olarak karabiber oleoresininde bulunsa da, hayati bir antioksidan rol oynamaktadır. Piperin, serbest radikalleri temizler, metal iyonlarını şelatlar ve kümes hayvanı yağlarının oksidasyonunu önler (Brewer, 2011). Ayrıca, eşlik eden bileşiklerin biyoyararlanımını artırarak genel fonksiyonel bütünlüğü korur. Membranı bozan seskiterpenler, penetrasyonu artıran monoterpenler ve radikal temizleyici alkaloidler arasındaki kombine etkileşim, kümes hayvanı etinin bozulmasına karşı kapsamlı bir antimikrobiyal ve antioksidan savunma sağlar.

1.16. EO'nun Etkinliğini Etkileyen Faktörler

BPEO gibi uçucu yağların antimikrobiyal ve antioksidan özellikleri, genellikle tavuk eti gibi karmaşık gıda sistemlerinde kullanılır ve bu sistemler gelişmiş dağıtım sistemleri gerektirir. EO'nun etkinliği, kontaminasyon bölgelerinde aktif fitokomponentlerin biyoyararlanımını etkileyen kimyasal, fiziksel ve çevresel faktörlere bağlıdır (Calo vd., 2015) (Çizelge 1.3). Gıda matrisi etkisi, özellikle yüksek lipit içeriği, lipofilik EO'ların yağ fazında çözünmesine neden olarak *Pseudomonas* (Bahurmiz vd., 2020; Nazzaro vd., 2013) gibi patojenlere karşı aktif konsantrasyonlarını azaltır (Wang vd., 2024).

Ek olarak, EO'ların uçuculuğu ve ısı, oksijen ve ışığa maruz kaldıklarında kimyasal olarak kararsız olmaları, koruyucuların ömrünü sınırlamaktadır (Al-Maqtari vd., 2022; Sousa vd., 2022). Son olarak, güçlü aromalar gıdaları organoleptik olarak kabul edilemez hale getirebileceğinden, duyuusal kısıtlamalar EO dozajını sınırlamaktadır (Hyldgaard vd.,

2012). Bu nedenle, EO'ları stabilize etmek, çözünürlüğü ve biyoyararlanımı artırmak ve lezzet yoğunluğunu azaltmak için kapsülleme çok önemlidir (Ojeda-Piedra vd., 2022).

Çizelge 1.3: Gıda Sistemlerinde Uçucu Yağların Etkinliğini Etkileyen Faktörler

No.	Faktör	EO Etkinliği Üzerindeki Etkisi	Kayn.
1.	Gıda Matrisi (Lipid bileşimi)	Etin lipit açısından zengin bileşimi, lipofilik EO bileşenlerini yağ fazında tutarak, mikrobiyal kontaminasyonun meydana geldiği sulu ortamdaki konsantrasyonlarını azaltır. Bu da antimikrobiyal aktiviteyi azaltır.	(Burt, 2004)
2.	Uçuculuk ve kimyasal kararsızlık	EO'lar uçucudur, kimyasal olarak kararsızdır ve işleme veya depolama sırasında ısı, oksijen veya ışığa maruz kaldıklarında bozulmaya meyillidirler, bu da aktif bileşiklerin kaybına/bozulmasına ve koruyucu etkisinin azalmasına neden olur.	(Hyldgaard vd., 2012)
3.	Duyusal sınırlamalar (Aroma etkisi)	Etkili antimikrobiyal aktivite için gerekli olan yüksek EO konsantrasyonları, istenmeyen aromalar verebilir ve organoleptik özellikleri ve tüketicilerin kabulünü olumsuz etkileyebilir. EO'ların biyoyararlanımı, sulu sistemlerdeki düşük çözünürlükleri ve gıda bileşenleriyle etkileşimleri nedeniyle sınırlıdır ve bu da mikrobiyal kontaminasyon bölgelerine ulaşma yeteneklerini etkiler. Kapsülleme veya nanoemülsiyon sistemleri, dağıtımı ve etkinliği iyileştirebilir.	(Calo vd., 2015)
4.	Biyoyararlanım ve dağıtım kısıtlamaları		(Donsi ve Ferrari, 2016)

1.17. BPEO'ya Nanoteknoloji Entegrasyonu

Nanoteknoloji, gıdalarda temiz etiketli korumanın teşvik edilmesinde önemli bir rol oynar ve nanoemülsiyon formundaki özel bir kolloidal sistem, BPEO gibi lipofilik bileşiklerin tavuk eti gibi ıslak gıdalara aktarılması için uygundur. Nanoemülsiyon, basitçe, termodinamik olarak kararsız ancak kinetik olarak kararlı bir sulu faz ve yağ fazının, aralarındaki emülgatörler tarafından stabilize edilmiş bir süspansiyonu olarak tanımlanabilir. İlk ve en tipik özelliği, genellikle 20 ila 200 nm arasında değişen ultra ince damlacık boyutudur (Barradas ve de Holanda, 2021). Bu küçük boyut, BPEO'nun fonksiyonel aktivitesini iyileştirmede kritik öneme sahip olan optik şeffaflık veya yarı saydamlık ve yüksek yüzey alanı gibi benzersiz fiziksel özellikler oluşturur.

BPEO'nun tavuk eti için koruyucu olarak kullanım potansiyelini en üst düzeye çıkarmak için, elde edilen nanoemülsiyonlar belirli fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmalı ve bunların oluşturulması yalnızca gıda işleme yöntemlerine dayalı olmalıdır. BPEO nanoemülsiyonunun arzu edilen özellikleri arasında, maksimum yüzey alanı ve şeffaflık sağlamak için küçük ortalama damlacık boyutu bulunur, bu da vücutta kolay emilim ve tutulmasını sağlar. 0,10 ile 0,25 arasında değişen PDI, damlacıklarının eşit dağılımını gösterir (Ferreira ve Nunes, 2019). ± 30 mV arasında değişen zeta potansiyeli, güçlü itme kuvveti sayesinde partikül agregasyonuna karşı stabilite sağlar (Amiri-Rigi vd., 2023; Liu vd., 2019).

1.18. Koruma için Entegre Sistemler Aracılığıyla İşlevsel Geliştirme

Son teknoloji koruma sistemi, polisakkarit iskelet/kaplama (örneğin kitosan, nişasta, pektin, kitin), uçucu yağ nanoemülsiyonları ve nanopartiküllerin (NP'ler) gıda kalitesini, özellikle tavuk etini korumak için önemli sinerjik etkiler yaratmak üzere kullanıldığı entegre bir sistem olarak işlev görür (Souza vd., 2020). Bu özenle tasarlanmış kompozitler, tavuk etinin organoleptik özelliklerini korumak ve raf ömrünü uzatmak için kullanılabilen çok katmanlı bir koruma sistemi sunmaktadır. Polisakkaritlerin katyonik yapısı, diğer bileşenlerle güçlü etkileşimler kurarak biyoaktif bileşenlerin sızmasını azaltır ve zaman içinde sürekli salınımı ve daha iyi tutunmayı kolaylaştırır (González-Reza vd., 2021). Sonuç olarak, bu kombinasyonel yöntem, geniş bir antimikrobiyal etki yelpazesi, gelişmiş antioksidan özellikler ve uzatılmış raf ömrü garanti eder ve kümes hayvanlarında görülen tüm önemli bozulma mekanizmalarını önemli ölçüde kapsar (Mathew vd., 2025).

Kombine koruma platformlarının geliştirilmesi, gıda teknolojisinin evriminde önemli bir ilerlemedir (Rahman, 2014), böylece artık tek mekanizmalı koruma (örneğin, termal gıda işleme veya izole kimyasal koruyucular) temelli geleneksel yaklaşımlarla sınırlı değildir. Bu platformlar, biyopolimerler, uçucu yağ nanoemülsiyonları gibi çeşitli aktif maddeleri inorganik nanopartiküllerle (Khezerlou vd., 2021) birleştirilerek, tavuk etinde her türlü gıda bozulmasına karşı ikinci bir savunma seviyesi sağlaması beklenen tek bir birleşik yapı oluşturur (Wang vd., 2021a).

Bu platformların varlıklarının mantığı, sinerjik işlevselliğe sahip olmaktır. Taze et gibi karmaşık biyolojik materyallerde bozulma, mikrobiyal çoğalma, kimyasalların neden olduğu oksidatif bozulma (yağlanma) ve mekanik bozunma (su kaybı) arasında bir rekabettir. Bu üç süreci uzun vadede aynı anda dondurarak durdurabilecek tek bir aktif bileşen neredeyse yoktur. Tersine, hibrit bir platform, diğer şeylerin yanı sıra, mekanik bariyer ve kontrollü salımla ilgilenmek için kitosan iskeleti, hücre zarlarıyla ilgilenmek ve serbest radikalleri temizlemek için karabiber esansiyel yağı nanoemülsiyonu ve güçlü ROS aracılı antimikrobiyal aktiviteye sahip ZnO nanopartikülleri bir araya getirir (Wang vd., 2018; Piayura vd., 2021; Souza vd., 2020).

Bu yöntem, nanokompozit kaplamaların tek tek bileşenlerinden çok daha iyi olduğunu açıkça gösteren son çalışmalarda kanıtlanmaktadır. Polimerik yapı, kapsüllemelerin salım hızını düzenleyerek tedarik zinciri süresince etkinliklerini korur. Kapsüllemelerin boyutu muhtemelen minimum düzeydedir, bu da mikropların kolonileştiği noktada biyoyararlanımlarını en üst düzeye çıkarır. Bu birleşik yaklaşım, sadece yasal gereklilikleri değil, aynı zamanda minimum kimyasal kullanımına yönelik tüketici beklentilerini de karşılayan temiz etiketli, uzun vadeli koruma özellikleri sağlamak için gereklidir (Peng vd., 2025).

Etkili antimikrobiyal ve antioksidan potansiyeli ile tavuk etinin kalitesini ve raf ömrünü korumak ve iyileştirmek için nano formülasyonun üretilmesi amaçlanmaktadır. Genel hedef aşağıdaki parametreleri içermektedir:

- Karabiber esansiyel yağı nanoemülsiyonunun sentezi ve karakterizasyonu.
- Karabiber esansiyel yağı nanoemülsiyonunun stabilizasyon analizi.
- Çinko oksit nanopartiküllerinin sentezi ve karakterizasyonu.
- Yenilebilir nişasta kaplama çözeltisi içeren nano formülasyonların hazırlanması.
- Tavuk etinin fizikokimyasal, duyu ve mikrobiyolojik analizinin araştırılması.
- Tavuk etinin raf ömrü ve duyu özelliklerinin korunmasının belirlenmesi.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Çinko asetat dihidrat ($\text{Zn}(\text{CH}_3 \text{ COO})_2 \cdot 2\text{H}_2 \text{ O}$), Setiltrimetilamonyum bromür (CTAB), Sodyum klorür (NaCl), Kalsiyum klorür dihidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2 \text{ O}$), 2-Tiyobarbitürik asit (TBA), Sodyum hidroksit peletleri (NaOH) ve mısır nişastası analitik sınıfı olup Sigma-Aldrich Almanya tarafından sağlandı. Besin agar (CM0003B), Lauria Bertani besiyeri (CM0996), Mueller Hinton agar (CM0337B), Tamponlu Pepton suyu (CM1049B), Plaka Sayım Agar (NCM0010A), Menekşe Kırmızısı Safra Glikoz Agar (CM0485B), Salmonella-Shigella Agar (CM0099B), De Man, Rogosa Sharpe Agar (CM1153B) ve Patates Dekstroz Agar (CM0139B) Mannitol Tuz Agar (CM0085B) ve Eozin Metilen Mavisi Agar (CM0069B) Oxoid ve Neogen'den temin edildi. Buhar damıtma işlemiyle elde edilen karabiber esansiyel yağı, Çin'deki Shanghai Macklin Biochemical Co. Ltd. şirketinden temin edildi. HLB indeksi 15 olan ve polisorbitat 80 olarak da bilinen Tween 80, Çin'deki Shanghai Macklin Biochemical Co. Ltd. şirketinden temin edildi. Taze tavuk göğüs filetoları yerel pazardan temin edildi ve derhal bir buzlukta laboratuvara transfer edildi.

2.1.1. Ekipman Listesi

1. Otoklav (Hirayama HICLAVE HVA-85, Japonya)
2. Santrifüj makinesi 5810 R (Eppendorf)
3. 4 °C'de soğuk dolap (Model: MPR-1410, SANYO, Japonya)
4. Elektrikli tartı (Shimadzu, Japonya)
6. Dondurarak kurutucu (Sanvac; coolsafe- 110, Danimarka)
8. Sıcak plaka (IKA, Almanya)
9. Kuluçka makinesi (ECOCELL)
10. Laminar akış kabini (Technico Scientific Supply)
11. Manyetik Ocaklı Çoklu Karıştırıcı (IKA, Almanya)
12. Mikropipetler (Witeg)
13. pH metre (Peak Instruments S-610L)

14. pH metre (Testo 205)
15. Tarama Elektron Mikroskobu (Nova; NanoSEM 450)
16. Çalkalama inkübatörü (InnovaR 43 Incubator shaker series)
17. Stomacher (Seward 400)
18. UV-Vis Spektrofotometre (Shimadzu, UV-1800, Japonya)
19. Su deiyonizör (Thermo Scientific Deionizer)
20. X-ışını difraktometresi (Shimadzu, Japonya)
21. Zetasizer Nano ZSP (Malvern)

2.1.2. Reaktif Hazırlama

2.1.2.1. Normal Salin (NS)

%0,9 normal salin çözeltisi hazırlamak için, 9 g sodyum klorür distile suda çözöldü ve hacmi 1000 mL'ye ayarlandı. Çözelti daha sonra bir reaktif şişesinde saklandı (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1: Normal salinin bileşimi.

Sıra No.	İçindekiler	Miktar (g/L)
1	Sodyum klorür	9
2	Distile su	100

2.1.2.2. NaOH çözeltileri

Farklı güçlerde NaOH çözeltileri hazırlamak için, Çizelge 2.2, 2.3 ve 2.4'te gösterildiği gibi, ölçölü miktarda sodyum hidroksit, ölçölü miktarda deiyonize su içinde çözöldü.

Çizelge 2.2: 5M – NaOH bileşimi.

Sıra No.	İçindekiler	Miktar
1	Sodyum hidroksit	20 g
2	Deiyonize H ₂ O	100 mL'ye kadar

Çizelge 2.3: 1M – NaOH bileşimi.

Sıra No.	İçindekiler	Miktar
1	Sodyum hidroksit	4 g
2	Deiyonize H ₂ O	100 mL'ye kadar

Çizelge 2.4: 0,1 M – NaOH bileşimi.

Sıra No	İçindekiler	Miktar
1	Sodyum hidroksit	0,4 g
2	Deiyonize H ₂ O	100 mL'ye kadar

2.1.3. HCl çözeltileri

Farklı güçlerde HCl çözeltileri hazırlamak için, Çizelge 2.5, 2.6 ve 2.7'de gösterildiği gibi, ölçülü miktarda hidroklorik asit, ölçülü miktarda deiyonize su içinde çözüldü.

Çizelge 2.5: 5M – HCl bileşimi.

Sıra No.	İçindekiler	Miktar
1	Hidroklorik asit	41,8 mL
2	Deiyonize H ₂ O	100 mL'ye kadar

Çizelge 2.6: 1M – HCl bileşimi.

No.	İçindekiler	Miktar
	Hidroklorik asit	8,36 mL
2	Deiyonize H ₂ O	100 mL'ye kadar

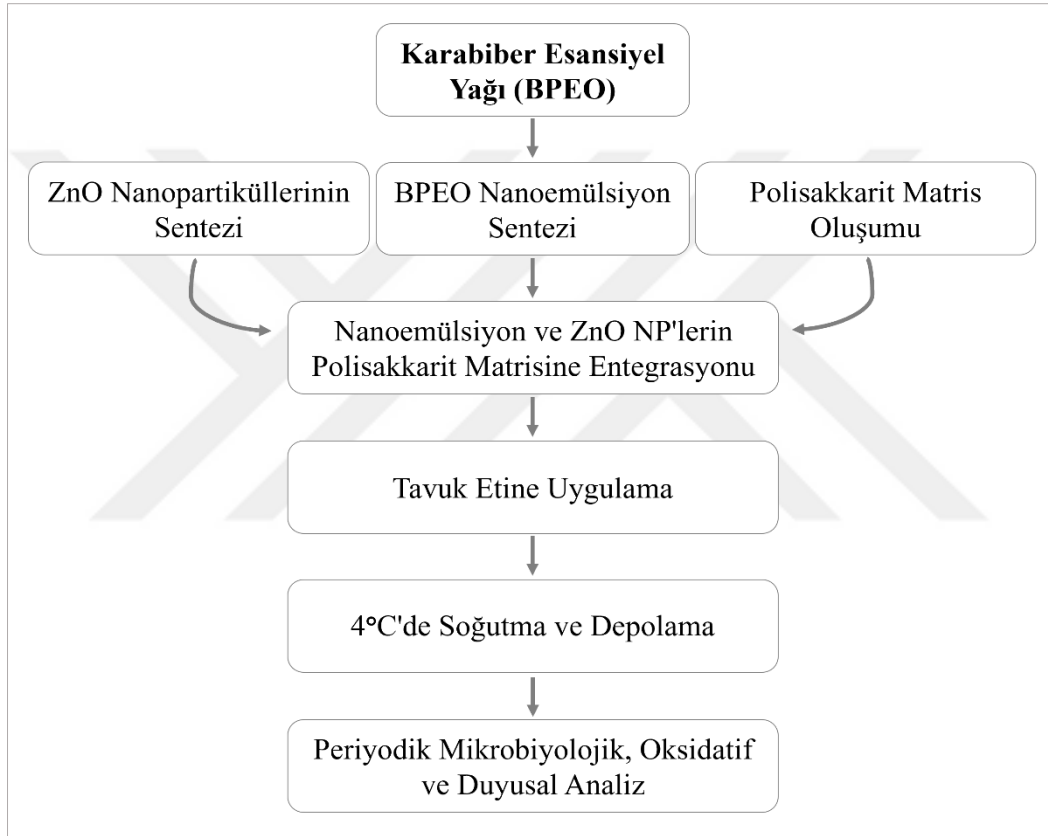
Çizelge 2.7: 0,1 M – HCl bileşimi.

No.	İçindekiler	Miktar
1	Hidroklorik asit	0,83 mL
2	Deiyonize H ₂ O	100 mL'ye kadar

2.2. METOT

2.2.1. Görsel Süreç Akışı

Aşağıda, formülasyon sentezinden yenilebilir kaplamanın uygulanması ve değerlendirilmesine kadar olan genel süreci özetleyen bir akış şeması (Şekil 2.1) bulunmaktadır.



Şekil 2.1: BPEO nanoemülsiyon ve ZnO nanopartikül sentezinden yenilebilir kaplamanın formülasyonuna ve tavuk etine uygulanmasına kadar olan sıralı süreci gösteren akış şeması.

2.3. GC-MS ile Uçucu Bileşenlerin Analizi

Karabiber esansiyel yağı nanoemülsiyonunun kimyasal bileşimi, gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi (Agilent Technologies) kullanılarak belirlenmiştir. BPEO'nun toplam bileşenleri, tepe normalizasyon işlemi kullanılarak analiz edilmiştir. GC-MS kromatogramı, tüm bileşenlerin piklerini ve bunların ilgili yüzdeleri gösterir. BPEO,

1:4 oranında n-heksan içinde çözündürüldü ve kolona enjekte edildi. BPEO nanoemülsiyonunun GC-MS analizi için, suda dağılmış EO, önce eşit miktarda distile su ile seyreltilerek izole edildi. Ardından n-heksan eklendi ve EO'nun polar olmayan bileşenlerini çözündürmek için vorteksleildi. İki sıvı tabakasının uygun şekilde ayrılması için 2 gün bekletildi. n-heksan (üst tabaka) fraksiyonu, bileşen analizi için GC-MS sistemine enjekte edildi.

2.4. Karabiber Esansiyel Yağı Nanoemülsiyon Üretimi

Karabiber esansiyel yağı nanoemülsiyonunun (BPEONE) formülasyonu için düşük enerjili bir teknik olan emülsiyon faz inversiyonu (EPI) kullanılmıştır (Hien vd., 2022; Borrin vd., 2016). Bu çalışmada, nanoemülsiyonların hazırlanmasında %10, %15 ve %20 olmak üzere üç farklı kütle yüzdesinde karabiber esansiyel yağı kullanılmıştır. Nanoemülsiyonu üretmek için, karabiber esansiyel yağı ve Tween 80 (yüzey aktif madde) birlikte eklenmiştir ve yağ-yüzey aktif madde fazının homojen bir şekilde karışmasını sağlamak için Manyetik Sıcak Plaka Çoklu Karıştırıcı (IKA, Almanya) kullanılarak 800 rpm'de 15 dakika boyunca karıştırıldı. Uygun şekilde karıştırıldıktan sonra, distile su yağ-yüzey aktif madde fazına yavaşça titrasyonla eklendi. Su ilavesi 1 mL/dk hızında hassas bir şekilde kontrol edildi. Su ilavesi sistemin viskozitesini ve polaritesini değiştirdiği için yavaş ve kontrollü ilave kritik bir noktadır. Uygun homojenizasyon sağlamak ve yeni oluşan nano boyutlu damlacıkları stabilize etmek için manyetik karıştırıcıda 800 rpm'de 30 dakika daha karıştırmaya devam edildi.

2.5. BPEO Nanoemülsiyonunun Karakterizasyonu

Hazırlanan BPEO nanoemülsiyonlarının fizikokimyasal özelliklerini, etkinliğini ve genel stabilitesini analiz etmek için karakterizasyon gerçekleştirildi. BPEO ve BPEO nanoemülsiyonunun uçucu bileşikleri, gaz kromatografisi kütle spektrometrisi kullanılarak belirlendi. BPEO nanoemülsiyonunun fiziksel özellikleri, ortalama damlacık boyutu ve polidispersite indeksi değerleri belirlenerek karakterize edildi. Fiziksel durumun kararlılığı, bulanıklık ölçümü ile belirlendi. Hazırlanan BPEO nanoemülsiyonunun damlacık morfolojisi, geçirimli elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak belirlendi.

2.5.1. Damlacık Boyutu ve Polidispersite İndeksi Belirlenmesi

Ortalama damlacık boyutu, nanoemülsiyondaki damlacıkların ortalama büyüklüğünü yansıtır ve polidispersite indeksi (PDI), damlacık boyutu dağılımının homojenliğini gösterir. Nanoemülsiyondaki damlacıkların boyutu (nm) ve polidispersite indeksi (PDI), bir Zetasizer (Malvern, Nano ZSP, İngiltere) kullanılarak belirlenmiştir. Hazırlanan BPEONE'nin 20 kat seyreltilmesi, cihazın sinyalini optimize etmek ve çoklu saçılmayı önleyerek tek saçılmayı sağlamak için gerçekleştirilmiştir.

2.5.2. Bulanıklık (Türbidite) Analizi

Bulanıklık değerlendirmesi, BPEO nanoemülsiyonlarının fiziksel durumunu belirlemek için hızlı bir yöntemdir. Damlacık boyutu ve dağılımı, bir nanoemülsiyonun bulanıklığını etkileyebilir; bu nedenle, bulanıklığın değerlendirilmesi, formülasyonun fiziksel stabilitesinin hızlı bir ön değerlendirmesini sağlar. Daha küçük damlacık boyutları ve düzgün dağılım genellikle daha düşük bulanıklığa yol açarken, daha yüksek bulanıklık daha büyük damlacık boyutlarını veya önemli agregasyonu gösterir. BPEO nanoemülsiyonunun optik yoğunluğu, bir UV-Vis spektrofotometre (Shimadzu, UV-1800, Japonya; Nirmal vd., 2018) kullanılarak 600 nm'de ölçülmüştür. BPEO nanoemülsiyonunun bulanıklığını belirlemek için aşağıdaki denklem kullanılmıştır:

$$Türbidite (cm^{-1}) = \frac{2.303 \times Abs}{L}$$

Burada *Abs*, spektrofotometre kullanılarak belirlenen optik yoğunluk/absorbans ve *L*, tanımlanmış mesafe (optik yol uzunluğu) olarak 1 cm'dir.

2.5.3. BPEONE'nin Morfoloji Analizi

Hazırlanan BPEONE'nin mikro yapısı ve damlacık morfolojisi, geçirimli elektron mikroskobu (FEI Nova; NanoSEM 450) kullanılarak belirlenmiştir (Nie vd., 2023). BPEONE numunesi, destekleyici bir film ile bakır ağ ızgarasına eklendi. %2'lik fosfotungstik asit boyası çözeltisi, 30 dakika boyunca negatif boya olarak kullanıldı. Fazla boyayı gidermek için filtre kağıdı kullanıldı ve numune 80 kV voltajda TEM altında incelendi. Boya, daha açık renkli, boyanmamış nanoemülsiyon damlacıkları ile daha koyu

renkli arka plan arasındaki kontrastı artırmak için kullanıldı. Numune içinden elektronları itmek için yüksek voltaj kullanıldı, bu da nanoemülsiyonun damlacıklarının hassas ölçümü ile yüksek çözünürlüklü bir mikro yapı görüntüsünün görselleştirilmesini sağladı.

2.6. Enkapsülasyon Etkinliğinin Belirlenmesi (EE)

Uçucu yağlar, doğal olarak buharlaşan uçucu bileşenler açısından zengindir ve bu da hazırlık süreci ve depolama sırasında, oda sıcaklığında bile kütle kaybına neden olur. Nanoemülsiyon sentez süreci, uçucu bileşiklerin buharlaşmasını ve kütle kaybını önleyerek nanoemülsiyonları sentezlemek için kritik bir prosedürdür. Yağ bileşiklerinin küçük yağ damlacıklarına uygun olmayan şekilde kapsüllenmesi de depolama sırasında çevreye kademeli olarak buharlaşmaya neden olabilir. Bu nedenle, EO kütle yüzdesinin izlenmesi, nanoemülsiyon içinde zamanla ortaya çıkan bu sorunları gidermek için önemli bir adımdır. Nanoemülsiyonun yükleme verimliliği (enkapsülasyon etkinliği), nanoemülsiyonda bulunan uçucu yağın gerçek miktarını belirleyebilen hidrodistilasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. BPEO nanoemülsiyon numunesi su ile karıştırılmış ve kaynama noktasına kadar ısıtılmıştır. Isıtma, karışımın (EO, yüzey aktif madde ve sudan oluşan) ayrılmasına neden olmuş ve BPEO nanoemülsiyonunun uçucu bileşiklerini buhar haline dönüştürmüştür. Bu buharlar daha sonra soğutulmuş ve suyla karışmayan ve toplanıp tartılabilen yoğunlaştırılmış bir sıvıya dönüştürülmüştür.

Nanoemülsiyonun yükleme verimliliğini belirlemek için aşağıdaki denklem kullanılmıştır. Burada EE, hazırlanan BPEO nanoemülsiyonunun yükleme verimliliğinin yüzdesidir, *MEO* (gm) nanoemülsiyonun damıtılmasından sonra elde edilen uçucu yağ kütlesidir ve *MNE* (gm) damıtma işlemi için kullanılan BPEO nanoemülsiyon numunesinin kütlesidir.

$$EE (\%) = \frac{MEO}{0.1 \times MNE} \times 100$$

Analiz, nanoemülsiyonun stabilitesini ölçmek için EO içeriğindeki zamanla değişimi izlemek üzere hidrodistilasyon yöntemi kullanılarak bir ay boyunca (0, 1, 2, 3, 4 hafta) düzenli aralıklarla gerçekleştirilmiştir.

2.7. Stabilite Analizi

Nanoemülsiyonlar genellikle, normalde karışmayan yağ ve su gibi iki sıvının karışımıdır. Nanoemülsiyon formülasyonunda, bir sıvı diğer sıvının içinde daha küçük damlacıklar (nano ölçekte) halinde dağılır. Stabil bir nanoemülsiyonda, küçük yağ damlacıkları eşit şekilde dağılmış halde kalır ve birbirine yapışmaya direnir, böylece fazların ayrı katmanlara ayrılmasını önler. Kararsız bir nanoemülsiyonda ise, küçük yağ damlacıkları ayrılabilir ve birbirine yapışabilir, bu da faz ayrışmasına neden olur. Hazırlanan BPEO nanoemülsiyonunun stabilitesini analiz etmek için üç ana stabilite testi gerçekleştirilmiştir.

2.7.1. Oda Sıcaklığının Etkisi (Görsel Faz Ayrışması İzleme)

Hazırlanan BPEO nanoemülsiyonunun fiziksel stabilitesini değerlendirmek için, oda sıcaklığında 6 ay boyunca saklanan nanoemülsiyonun görsel faz ayrışması izlendi. Görsel faz ayrışması, ince bir şekilde karıştırılmış bir nanoemülsiyonda iki karışmayan sıvının ayrışmasının görsel olarak gözlemlenmesini ifade eder ve bu ayrışma, küçük, kapsüllenmiş damlacıkların birleşmesine neden olur. Faz ayrışması, kremleşme, çökme veya birleşme gibi belirtilerle gözlemlenmiştir ve bu ayrışma, iki ayrı tabakanın oluşumuna neden olmuştur.

2.7.2. Santrifüjleme Etkisi

Hazırlanan BPEO nanoemülsiyon, 5810 R (Eppendorf) santrifüj makinesi kullanılarak 3000 rpm'lik yüksek hızda 5 dakika gibi kısa süreler boyunca santrifüjlenerek faz ayrışması açısından gözlemlendi. Bu yöntem, stabilite analizinin hızlı bir yöntemi olarak benimsendi. Santrifüjleme, yağ damlacıklarına güçlü ve sabit bir kuvvet uygulayarak hazırlanan nanoemülsiyondaki stresi hızlandırır; bu, uzun vadeli yerçekimi kuvvetini taklit eder, ancak çok daha yüksek bir yoğunlukta gerçekleşir. Santrifüjlemenin etkisi, ortalama damlacık boyutu, polidispersite indeksi (PDI) ve bulanıklık ölçülerek değerlendirildi. Santrifüjleme sonrası ortalama damlacık boyutunu elde etmek için küçük damlacıkların ortalama boyutu ölçüldü. BPEO nanoemülsiyonunun santrifüjlenmesinden sonra damlacık boyutunun homojenliği polidispersite indeksi açısından ölçüldü.

Bulanıklık, 3000 rpm'de 5 dakika santrifüjlemeden sonra BPEO nanoemülsiyonunun stabilitesini belirlemek için spektrofotometre kullanılarak bulanıklık veya pusluluk açısından ölçüldü.

2.7.3. 15°C'de Dondurmanın Etkisi

Donmanın etkisi, nanoemülsiyonlarda bozulmaya neden olabilecek -15 °C'lik düşük bir sıcaklıkta hazırlanan BPEO nanoemülsiyonlarının stabilitesini değerlendirmek için incelendi. BPEO nanoemülsiyonları 24 saat boyunca -15 °C'de tutuldu. Saklama koşulları, nanoemülsiyonların bileşenlerini ve birbirleriyle etkileşimlerini etkileyebilir. Donmanın etkisi, 24 saat sonra ortalama damlacık boyutu ve PDI ölçülerek belirlendi. -15 °C'de saklanan BPEO nanoemülsiyonunun ortalama damlacık boyutunu elde etmek için küçük damlacıkların ortalama boyutu ölçüldü. Damlacık boyutunun homojenliği, BPEO nanoemülsiyonunun polidispersite indeksi açısından ölçüldü.

2.8. ZnO Nanopartiküllerinin Sentezi

ZnO nanopartiküllerinin (NP) hazırlanmasında hidrotermal yöntem kullanıldı (Geetha vd., 2010). 0,5 g çinko asetat ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 110 mL suya (deiyonize) karıştırılarak ilave edildi. Zn iyonları ile uygun dağılım ve birleşmeyi sağlamak için, çinko asetat dihidrat çözeltisine 15 dakika boyunca karıştırılarak bir yüzey aktif madde olan CTAB (0,5 g) ilave edildi. İstenen pH aralığı olan 8-11'i elde etmek için karışıma 10 mL NaOH çözeltisi (0,2 ila 0,5 M konsantrasyon) ilave edildi. Hazırlanan çözelti, Teflon kaplı paslanmaz çelik otoklav içine eklendi ve 3 saat boyunca 100 °C'de tutuldu. Süre dolduktan sonra, oda sıcaklığına kadar doğal olarak soğumaya bırakıldı. Reaksiyonun ardından, oluşan katı ürün metanol ile yıkandı, süzüldü ve ardından 60 °C'de kurutuldu ve 350 °C'de 3 saat boyunca kalsine edildi.

2.9. ZnO NP'lerin karakterizasyonu

ZnO NP'lerin karakterizasyonu, Zetasizer (Malvern, Zetasizer Nano ZSP) ile hidrodinamik çap, yüzey potansiyeli ve polidispersite indeksi, X-ışını difraktometresi

(Shimadzu, Japonya) ile yapısal analizinin ve taramalı elektron mikroskobu (Nova; NanoSEM 450) ile yüzey morfolojisi ve homojenliğini belirlemek için gerçekleştirildi.

2.10. Antimikrobiyal Aktivite Analizi

Karabiber (*Piper nigrum*) uçucu yağ nanoemülsiyonunun antibakteriyel özelliklerini değerlendirmek için bir in vitro çalışma gerçekleştirilmiştir. Kullanılan yöntem, nanoemülsiyonların benzersiz özelliklerine ve inkübasyon sırasında mikrobiyal sistemlerle etkileşimlerine uyarlanmış, standart bir antibakteriyel test protokolünün değiştirilmiş bir versiyonudur.

2.10.1. Kültür Hazırlama

BPEO ve BPEONE'nin antimikrobiyal potansiyelini değerlendirmek için in vitro antimikrobiyal analizler gerçekleştirildi. BPEO ve BPEONE'nin çeşitli özelliklerine uyum sağlamak için minimum değişikliklerle standart bir antimikrobiyal analiz protokolü kullanıldı. *S. aureus* (ATCC 29213) ve *E. coli* (ATCC 25922), seçici besiyerleri olan Mannitol Tuz Agar (MSA) besiyeri ve Eozin Metilen Mavisı agar (EMB) besiyerine aşılandı. *S. aureus* ve *E. coli*'nin aktif kültürleri, steril besin agar (NA) ortamına aşılandı. Besin agar ortamı, 121 °C ve 15 psi'de otoklavlandı ve 45-50 °C'ye soğuması bekletildikten sonra petri kaplarına döküldü. Agar ortamı, steril koşullar altında katılaşmaya bırakıldı. Taze bakteri kültürleri elde etmek için, agar yüzeyine bakteri aşılama amacıyla steril aşılama halkaları kullanıldı.

2.10.2. Disk Difüzyon Yöntemi ile Antibakteriyel Test

Her iki bakterinin taze kültürleri 1×10^8 CFU/mL'ye standartlaştırıldı. Bakteri konsantrasyonu ayarlandıktan sonra, pozitif kontrol ve test petri kaplarında eşit bakteri büyümesi elde etmek için inokulumları Mueller-Hinton agar (MHA) yüzeyine eşit olarak yayıldı. Filtre kağıdı (Whatman No. 1) kullanılarak 6 mm'lik diskler hazırlandı. Reaktif sınıfı etanol ($\geq 99,5$ %) kullanılarak farklı BPEO seyreltileri hazırlandı. Diskler, steril forseps yardımıyla agar yüzeyine yerleştirildi. Test petri kaplarındaki diskler 10 µL BPEO seyreltisi eklendi. Kontrol petri kaplarındaki diskler 10 µL %20 etanol çözeltisi

eklendi. Sonuçları elde etmek için tüm petri kapları 37 °C'de 24 saat süreyle inkübe edildi. İnhibisyon bölgeleri (çap) mm cinsinden ölçüldü.

S. aureus ve *E. coli* üzerinde farklı konsantrasyonlarda BPEONE test edildi. Her iki bakterinin taze kültürleri 1×10^8 CFU/mL'ye standartlaştırıldı. Bakteri konsantrasyonu ayarlandıktan sonra, pozitif kontrol ve test petri kaplarında eşit bakteri büyümesi elde etmek için inokulumları Mueller-Hinton agar (MHA) yüzeyine eşit olarak yayıldı. Filtre kağıdı (Whatman No. 1) kullanılarak 6 mm'lik diskler hazırlandı. Diskler, steril ince uçlu forseps yardımıyla agar yüzeyine yerleştirildi. Test petri kaplarındaki disklerin üzerine farklı konsantrasyonlarda 10 µL BPEONE eklendi. Tüm petri kapları, sonuçları elde etmek için 37 °C'de 24 saat inkübe edildi. İnhibisyon bölgeleri (çap) mm cinsinden ölçüldü.

2.10.3. Minimum İnhibisyon Konsantrasyonu Belirlenmesi

BPEONE'nin minimum inhibisyon konsantrasyonunu ölçmek için bulyon seyreltme yöntemi kullanıldı (Ma vd., 2016). Aktif bakteri büyümesi elde etmek için *E. coli* ve *S. aureus*, taze hazırlanmış steril Trypton Soya Bulyon besiyerine aşılandı. 1×10^7 CFU/mL mikrobiyal konsantrasyonları, gece boyunca inkübe edilmiş bulyon besiyeri kullanılarak hazırlandı. Sterilize edilmiş TSB besiyeri (2 mL) içeren on bir adet steril cam tüp hazırlandı. İlk cam tüpe 2 mL %10 BPEONE eklendi. Uygun şekilde karıştırıldıktan sonra, ilk tüpten 2 mL çözelti alındı ve ikinci tüpe aktararak iki katlı seyreltme hazırlandı.

Aynı adım yedinci seyreltmeye kadar tekrarlandı. Dokuz kalan tüpteki BPEO konsantrasyonları şu şekildeydi: %10, 5, 2,5, 1,25, 0,625, 0,31, 0,155, 0,077 ve 0,038 (konsantrasyonları 8,75, 4,375, 2,188, 1,094, 0,547, 0,273, 0,137, 0,068 ve 0,034 g/mL). 1×10^7 CFU/mL konsantrasyonuna ayarlanmış 200 µL bakteri süspansiyonu cam tüplere eklendi. Tüm test tüpleri, pozitif (bakteri içeren besiyeri) ve negatif (besiyeri) kontrolleriyle birlikte 37 °C'de 24 saat süreyle inkübe edildi. BPEO ve BPEONE'nin antimikrobiyal potansiyelini doğrulamak için farklı konsantrasyonlarda bir antibiyotik (tetrasiklin) de test edildi.

2.11. Yenilebilir Nişasta Kaplama Çözeltisinin Hazırlanması

Nişasta, BPEO, yüzey aktif madde ve ZnO NP'ler kullanılarak, kaplamada faydalı temel özelliklere ve önerilen işlevlere sahip bir yenilebilir kaplama çözeltisi formüle edildi (Çizelge 2.8).

Çizelge 2.8: Yenilebilir kaplama formülasyonunda kullanılan bileşenlerin önemli özellikleri ve et muhafazasında işlevleri.

Bileşen	Anahtar Özellik	Kaplamadaki İşlevi
Nişasta bazlı polisakkarit matris	Kaplama çözeltileri ve yenilebilir film oluşturabilme özelliği, toksik olmaması, biyolojik olarak parçalanabilir olması	Mekanik mukavemet sağlar ve bariyer görevi görür, biyoaktif bileşenler ile et arasındaki etkileşimi iyileştirir.
Karabiber esansiyel yağı	Terpenoidler gibi biyoaktif bileşenler açısından zengindir	Mikrobiyal büyümeyi ve oksidatif bozulmayı kontrol etmek/engellemek için etkili antimikrobiyal ve antioksidan potansiyel sunar.
Yüzey aktif madde (Tween 80)	Emülsifikasyonu ve nanoemülsiyon stabilizasyonunu kolaylaştırır	Nanoemülsiyonun homojen dağılımını ve stabilitesini sağlar
Çinko oksit nanopartiküller	Yüksek ROS üretim potansiyeli	Antimikrobiyal etkinliği ve oksidatif stabiliteyi artırır

Yenilebilir mısır nişastası tozu (%4 w/v) ve ekstra pür gliserol (%1,8 v/v; plastikleştirici ajan olarak) 100 mL distile suda çözündürüldü ve uygun jelatinleşme elde edilene kadar yaklaşık 35 dakika boyunca 800 rpm ve 90 °C'de sürekli karıştırıldı (Abbasi vd., 2021). Sürekli karıştırma, ısının eşit olarak dağılmasını sağlayarak nişastanın çözeltinin dibinde topaklanmasını önledi. Kaplama çözeltisi kalın, viskoz ve yarı saydam jel benzeri bir forma dönüştü. Kaplama çözeltisi, işlemlerin bozulmasını önlemek için 40 °C'ye soğutuldu. Kaplama çözeltisine farklı işlemler (Çizelge 2.9) eklendi ve ısıdan etkilenmeden işlemlerin iyice karışmasını sağlamak için oda sıcaklığında 20 dakika boyunca sürekli karıştırıldı.

Çizelge 2.9: Tavuk muhafazası için kaplama formülasyonları.

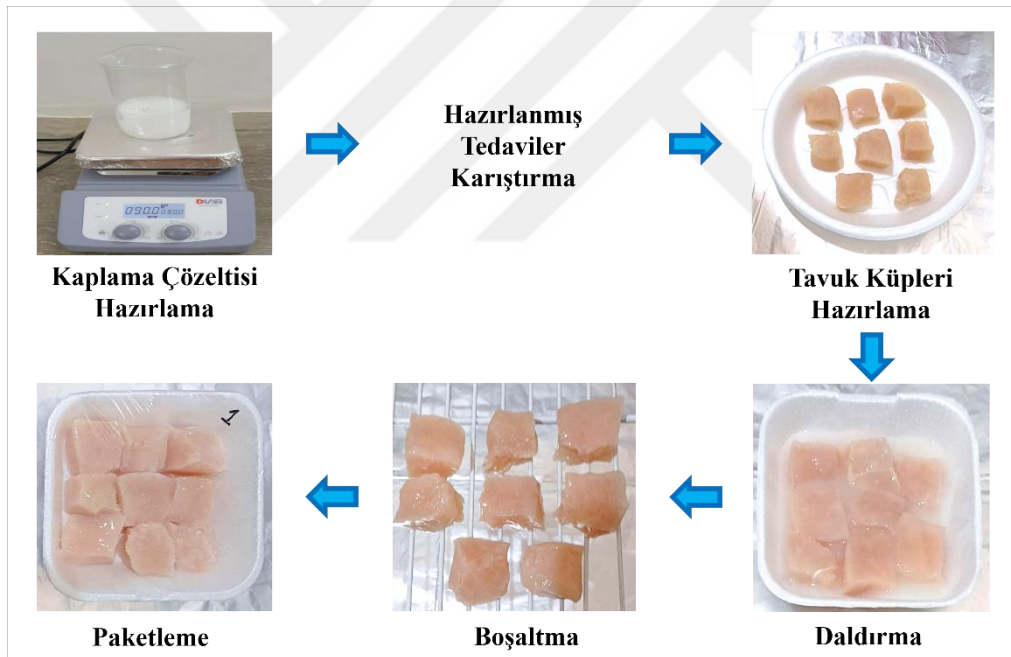
Grup	Açıklama
------	----------

1	Kontrol
2	Yenilebilir Nişasta Kaplama
3	%10 BPEO
4	%10 BPEONE
5	%10 BPEONE + %0,1 ZnO



2.12. Tavuk Muhafazası

Hazırlanan BPEONE'nin tavuk muhafazasına etkisi incelenmiştir. Taze tavuk göğüs filetoları yerel pazardan temin edilmiş ve optimum koşullar altında buzluklar kullanılarak laboratuvara nakledilmiştir. Göğüs eti 25 ± 2 g'lık küpler halinde porsiyonlara ayrılmış ve rastgele beş gruba bölünmüştür. Her grup üç alt gruba ayrılmıştır. Tüm alt gruplar, farklı işlemler içeren hazırlanan kaplama çözeltilerine oda sıcaklığında 5 dakika süreyle daldırılmış, ardından 2 dakika boyunca süzölmüştür. Tüm kaplamalar, laminar akış kabini altında oda sıcaklığında 20 dakika boyunca kurumaya bırakıldı. Kaplanmış tüm numuneler polistiren tepsilere aktarıldı, polietilen filmlerle kaplandı ve 16 gün boyunca 4 °C'de saklandı (Şekil 2.2). Düzenli aralıklarla numuneler alınarak fizikokimyasal, duyu ve mikrobiyolojik analizler yapıldı.



Şekil 2.2: Hazırlanan işlem protokolünün tavuk etine uygulanması.

2.13. Fizikokimyasal Analiz

İşlem görmüş tavuk örneklerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri, herhangi bir olumsuz etki veya bozulma olup olmadığını belirlemek için yakından izlendi.

2.13.1. Lipit Oksidasyonu

Tavuk eti numunelerinin TBARS değerleri, lipit oksidasyon derecesini belirlemek için ölçüldü (Rather vd., 2021). Et numunesi, %7,5 trikloroasetik asit ile karıştırdı ve bir homojenizatör (Homogenizer HG-15D, Witeg, Almanya) kullanılarak malonaldehit (MDA) ekstraksiyonunu sağlamak için 3 dakika boyunca homojenleştirildi. Homojenize edilmiş karışım, Whatman No.1 filtre kağıdı kullanılarak süzüldü. 2 mL sznt, eşit miktarda 2-tiyobarbitürik asit (TBA, 0,02 M) ile karıştırdı ve 95 C'de 40 dakika su banyosunda ısıtıldı. Numuneler 25 C'de su banyosunda soğutuldu ve 532 nm'de absorbansları ölçüldü. MDA içeriği, A: numunenin absorbansı, B: boş numunenin absorbansı ve m: kullanılan et numunesinin ağırlığı (mg) formül kullanılarak belirlendi (Mojaddar Langroodi vd., 2021).

$$TBARS = \frac{50 \times (A - B)}{m}$$

2.13.2. pH Tayini

pH, her tavuk numunesindeki değişiklikleri değerlendirmek için belirlenen zaman aralıklarında bir pH metre (Testo 205) kullanılarak izlenecektir (Jaspal vd., 2021).

2.14. Duyusal Analiz

Çalışmanın 0, 4, 8, 12 ve 16. günlerinde, kontrol ve deney gruplarından duyusal değerlendirme için tavuk eti örnekleri alındı. Renk, lezzet ve doku olmak üzere üç ana faktör, tavuk etinin organoleptik ve duyusal özelliklerini belirlemede çok önemlidir. Taze tavuk filetolarının pembe rengi, doğal, taze pembeden soluk, soluk pembeye veya koyu kırmızımsı pembeye değişebilir ve bu da depolama sırasında yağlanma veya amonyak benzeri koku oluşumuna işaret eder. Tavuk etinin genel kabul oranı, bu özelliklerden tek tek veya toplu olarak etkilenebilir. Deney gruplarından toplanan tüm tavuk eti örnekleri alüminyum folyoya sarıldı ve elektrikli fırında pişirildi. Bu deneyde, renk, koku ve tat dahil olmak üzere duyusal özellikleri analiz etmek için 5 kişilik bir panel (2 kadın ve 3 erkek, 30-40 yaşları arasında) seçildi.

Panelistlerin yanıtlarını kaydetmek ve genel kabul edilebilirliği değerlendirmek için hedonik ölçek (9 puanlık puanlama sistemi; çok iyi ile çok kötü arasında 9-1 şeklinde, kabul edilebilir ile kabul edilemez arasında) kullanılmıştır (Rousseau, 2004). Panelistler, önceki et numunelerinin ağızda bıraktığı tadı gidermek için küçük parçalar halinde ekmek ve içme suyu tükettiler. Panelistler tarafından kullanılan duyuşal değerlendirme formu Çizelge 2.10'da gösterilmektedir.



Çizelge 2.10: Duyusal Değerlendirme Formu

Panelist Personel 1

Tarih

Değerlendirme

Örnekler

Renk

Doku

Lezzet

Puanlama kriterleri								
9	8	7	6	5	4	3	2	1
Çok beğendim	Çok beğenmek	Orta derecede beğeniyorum	Biraz beğeniyorum	Ne beğeniyorum ne de beğenmiyorum	Biraz sevmiyorum	Orta derecede sevmiyorum	Çok sevmiyorum	Son derece sevmiyorum/kabul edilemez

Değerli zamanınızı, istekliliğinizi ve değerlendirme geri bildiriminizi çok takdir ediyoruz.

2.15. Tavuk Etinin Mikrobiyolojik Kalitesi

2.15.1. Seri Seyreltmelerin Hazırlanması

Her deneysel grubtan 10 g tavuk eti numunesi üç kez alındı ve steril stomacher torbalarında (Stomacher, Seward 400) 90 mL steril peptonlu su (0,1% w/v) ile homojenleştirildi. Homojenat numunelerinin 10 kat seyreltmeleri, 10^{-1} – 10^{-6} (pepton suda) arasında hazırlandı.

2.15.2. Mikrobiyolojik Analiz

2.15.2.1. Toplam Canlı Sayım (TVC) Analizi

Toplam canlı sayım analizi PCA agar besiyeri kullanılarak gerçekleştirildi. 100 µL seri seyreltme numuneleri, steril bir yayma aleti kullanılarak PCA agar petri kaplarına aşılandı. Petri kapları, TVC'yi belirlemek için 30 – 37 °C'de 24 saat süreyle inkübe edildi (Hosseini vd., 2021; ISO, 2022).

2.15.2.2. *Enterobacteriaceae* Analizi

Enterobacteriaceae analizi VRBG agar ortamı kullanılarak gerçekleştirildi. 100 µL seri seyreltme numuneleri, steril bir yayma aleti kullanılarak VRBG agar petri kaplarına aşılandı. Petri kapları, *Enterobacteriaceae* varlığını belirlemek için 37 °C'de 24 saat süreyle inkübe edildi (Kačániová vd., 2016; ISO 11133:2014).

2.15.2.3. *Salmonella* spp. Analizi

Salmonella spp. analizi SS agar besiyeri kullanılarak gerçekleştirildi. 100 µL seri seyreltme numuneleri, steril bir yayma aleti kullanılarak SS agar petri kaplarına aşılandı. Petri kapları, *Salmonella* spp. sayısının varlığını belirlemek için $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de 24-48 saat süreyle inkübe edildi (Ashraf vd., 2025).

2.15.2.4. Laktik Asit Bakterileri Analizi

Laktik asit bakterileri analizi, MRS agar besiyeri kullanılarak gerçekleştirildi. 100 µL seri seyreltme numuneleri, steril bir yayma aleti kullanılarak MRS agar petri kaplarına aşılandı. Petri kapları, anaerobik koşullar altında 30-40 °C'de 24-48 saat süreyle inkübe edildi (Shekarforoush vd., 2015).

2.15.2.5. Küf ve Maya Analizi

Küf ve maya analizi PDA besiyeri kullanılarak gerçekleştirildi. 100 µL seri seyreltme numuneleri, steril bir yayma aleti kullanılarak PDA petri kaplarına aşılandı. Petri kapları 25 °C'de 4-5 gün süreyle inkübe edildi (Abbasi vd., 2021).

2.15.2.6. Psikrotrofik Bakteri Analizi

Psikrotrofik analiz PCA besiyeri kullanılarak gerçekleştirildi. 100 µL seri seyreltme numuneleri, steril bir yayma aleti kullanılarak PCA petri kaplarına aşılandı. Petri kapları, psikrotrofik bakterilerin varlığını belirlemek için 7±1 °C'de 7 gün süreyle inkübe edildi (Melo vd., 2012).

2.16. İstatistiksel Analiz

Tüm parametreler üç kez tekrarlanmış olup sonuçlar, varyansın istatistiksel analizi (Tek Yönlü ANOVA) ardından Duncan ve Tukey testleri kullanılarak analiz edilmiştir.

3. SONUÇ

3.1. GC-MS ile Uçucu Bileşenlerin Analizi

Karabiber esansiyel yağının uçucu bileşenlerini analiz etmek için GC-MS analizi kullanılmıştır. Brezilya, Vietnam, Polonya, Malezya, Çin ve Kamerun gibi çeşitli kaynaklardan elde edilen karabiber esansiyel yağları, genellikle terpenler, α -pinen, β -pinen, sabinen, D-limonen, karyofilen, 3-karen, p-simen, α -guaien, β -mirsen, β -elemen, α -fellandren, kopaen ve humulen vb. uçucu organik bileşenleri içeren karmaşık bir kombinasyondan oluşmaktadır (Bastos vd., 2020; Jelen & Gracka, 2015; Jirovetz vd., 2002; Kumoro vd., 2010; Li vd., 2020). GC-MS kromatogramı, BPEO'da bulunan bileşiklerin nispi konsantrasyonunu belirlemek için analiz edildi. Elde edilen spektrumlar ayırt edilebilir pikler ve tutma süresi sergiledi. Pür BPEO, piklerde her biri karşılık gelen kütle fraksiyonuna sahip toplam 25 bileşen sergiledi (Çizelge 3.1).

Kromatogramda gözlemlenen her tepe noktası, test edilen pür BPEO numunesindeki bir bileşene karşılık gelmektedir. Başlıca beş bileşen, 3-Karen, D-Limonen, Karyofilen, β -pinen ve α -pinen olmak üzere yüksek kütle fraksiyonları ile tanımlanmıştır ve konsantrasyonları sırasıyla %20,98, %19,86, %16,65, %8,79 ve %7,35'tir.

Çizelge 3.1: BPEO'nun GC-MS analizi.

No.	Bileşen	Moleküler formül	Moleküler ağırlık (g/mol)	Tutma süresi (dk)	BPEO (%)
1	Kamfen	C ₁₀ H ₁₆	136,24	6,95	0,27
2	Sabinen	C ₁₀ H ₁₆	136,24	8,08	1,92
3	α-pinen	C ₁₀ H ₁₆	136,24	8,79	7,35
4	β-pinen	C ₁₀ H ₁₆	136,23	9,01	8,79
5	α-fellandren	C ₁₀ H ₁₆	136,23	9,44	2,93
6	D-Limonen	C ₁₀ H ₁₆	136,24	10,05	19,86
7	3-Karen	C ₁₀ H ₁₆	136,24	10,68	20,98
8	β-fellandren	C ₁₀ H ₁₆	136,24	11,15	1,26
9	β-mirsen	C ₁₀ H ₁₆	136,24	13,16	2,01
10	β-Simen	C ₁₀ H ₁₄	134,22	14,26	2,02
11	Linalool	C ₁₀ H ₁₈ O	154,25	15,17	0,39
12	δ-Elemene	C ₁₅ H ₂₄	204,35	20,53	1,53
13	β -Elemene	C ₁₅ H ₂₄	204,35	21,8	1,16
14	β -Kübeben	C ₁₅ H ₂₄	204,35	22,32	0,97
15	Kopaen	C ₁₅ H ₂₄	204,36	23,12	1,24
16	Karyofilen	C ₁₅ H ₂₄	204,36	24,11	16,65
17	Naftalin	C ₁₀ H ₈	128,17	25,04	0,86
18	Sikloheksan	C ₆ H ₁₂	84,16	25,86	1,44
19	Humulen	C ₁₅ H ₂₄	204,35	26,14	1,16
20	Spathulenol	C ₁₅ H ₂₄ O	220,35	26,67	0,59
21	Terpinolen	C ₁₀ H ₁₆	136,23	27,35	0,46
22	β-Eudesmene	C ₁₅ H ₂₄	204,35	27,86	0,30
23	Karyofilen oksit	C ₁₅ H ₂₄ O	220,35	28,32	4,34
24	δ-kadinen	C ₁₅ H ₂₄	204,35	29,01	0,61

3.2. Karabiber Esansiyel Yağı Nanoemülsiyon Üretimi

BPEO, Tween 80 (yüzey aktif madde) ve distile sudan oluşan BPEO nanoemülsiyonu, düşük enerjili EPI yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. EPI yöntemi, faz inversiyon sıcaklığı yöntemi gibi diğer yöntemlere kıyasla, homojen ve stabil nanoemülsiyonlar hazırlamak için en uygun yöntemlerden biri olarak gözlemlenmiştir. Bileşenlerin optimum konsantrasyonunu değerlendirmek için BPEO (ağırlıkça %) %10, %15 ve %20 oranlarında değerlendirilmiştir. Ayrıca, yüzey aktif madde-yağ oranı nanoemülsiyon formülasyonları için çok önemli bir parametredir. SOR, test edilen tüm BPEO yüzdeleri için 2,0 olarak tutuldu. Hazırlanan tüm nanoemülsiyonların stabil ve homojen olduğu görüldü.

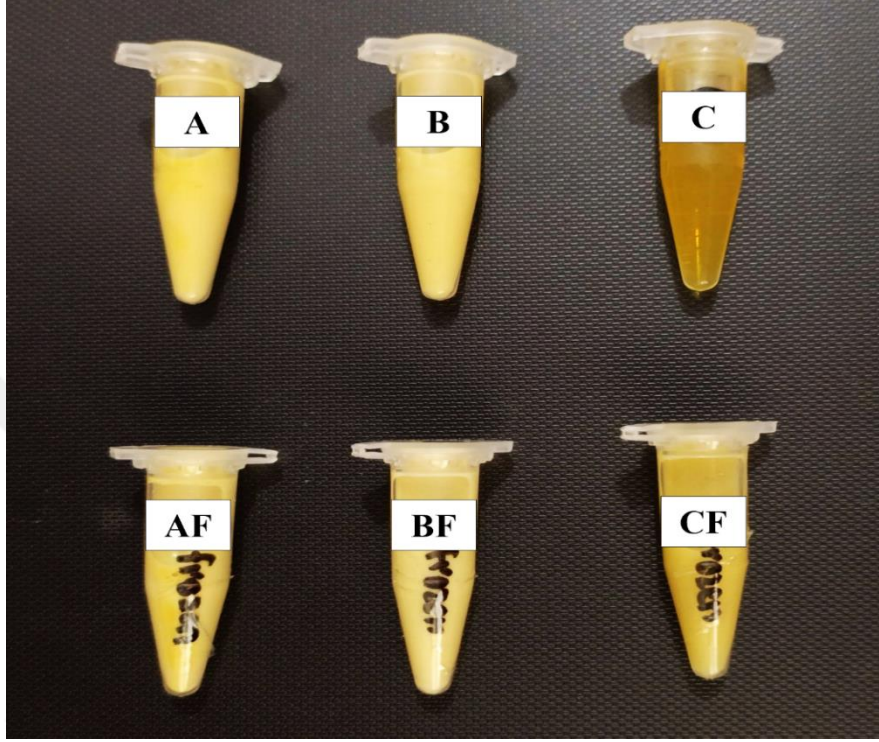
3.3. BPEO Nanoemülsiyonun Karakterizasyonu

Karakterizasyon sonuçları, BPEO nanoemülsiyonun fizikokimyasal özelliklerini, önemini ve stabilitesini ortaya koymuştur. Öncelikle, bu özellikler, antimikrobiyal aktivite, raf ömrü ve organoleptik özelliklerin iyileştirilmesine odaklanarak, hazırlanan BPEO nanoemülsiyonun amaçlanan uygulamaya uygunluğunu değerlendirmek için belirlenmiştir. BPEO nanoemülsiyonun kritik kalite özelliklerini değerlendirmek için aşağıdaki özelliklere odaklanılmıştır: yüzey yükü, damlacık boyutu, polidispersite indeksi, bulanıklık ve damlacık morfolojisi.

3.3.1. Damlacık Boyutu ve Zeta Potansiyeli Belirleme

Ortalama damlacık boyutu ve PDI, BPEO nanoemülsiyonun damlacık boyutu dağılımının homojenliğini ve stabilitesini ortaya koydu. %10, %15 ve %20 EO konsantrasyonlarında hazırlanan tüm BPEO nanoemülsiyonlar, iki set halinde (biri dondurulmamış, diğeri -15 °C'de 24 saat dondurulmuş, Şekil 3.1), damlacık boyutu, PDI ve zeta potansiyeli ölçümlerine tabi tutulmuştur (Şekil 3.2 – 3.5). Dondurulmamış BPEONE ile daha düşük EO konsantrasyonunda (10%) 64,23 nm'lik daha küçük bir damlacık boyutu ve 0,261'lik bir PDI elde edildi. Dondurulmamış BPEONE'lerde daha yüksek EO konsantrasyonlarında (örneğin %15 ve %20), damlacık boyutu sırasıyla 177,9 ve 164,0 µm'ye yükseldi ve PDI değerleri sırasıyla 0,217 ve 0,227 oldu. Üç EO konsantrasyonunun

tümü ile hazırlanan BPEO nanoemülsiyonları, çeşitli damlacık boyutları ve ideal PDI'lar ($< 0,3$) ile homojen ve stabil nanoemülsiyonlar sergilemiş, nanoemülsiyon stabilitesini ve tekrarlanabilirliğini sağlamıştır (Çizelge 3.2).



Şekil 3.1: BPEO Nanoemülsiyonlar.

A) Dondurulmamış %10 BPEONE, B) Dondurulmamış %15 BPEONE, C) Dondurulmamış %20 BPEONE, AF) Dondurulmuş %10 BPEONE, BF) Dondurulmuş %15 BPEONE ve CF) Dondurulmuş %20 BPEONE.

%10 EO konsantrasyonu, homojenlik ve stabilite açısından etkili sonuçlar vermiştir; PDI değeri 0,261 (orta derecede dar boyut dağılımı) ve ortalama damlacık boyutu $64,23 \pm 43,48$ nm'dir. Bu konsantrasyon, en düşük damlacık boyutu ve kabul edilebilir, tekrarlanabilir PDI değerlerine sahip, homojen ve yarı saydam bir kolloidal sistem geliştirmiştir; bu durum daha iyi kinetik stabiliteyi göstermektedir. %10, %15 ve 20% BPEONE'lerden oluşan bir set, yaklaşık 24 saat boyunca -15 ± 5 °C'de donduruldu. Ardından, %10, %15 ve 20% BPEONE'lerin damlacık boyutu, PDI ve zeta potansiyeli ölçüldü (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2: Damlacık boyutu, polidispersite indeksi ve zeta potansiyeli belirleme.

Nanoemülsiyonlar	Zeta Potansiyeli (mV)	Parçacık boyutu (nm)	PDI
A	$-26,0 \pm 3,94$	$64,23 \pm 43,48$	0,261
B	$-28,0 \pm 6,27$	$177,9 \pm 76,47$	0,217
C	$-34,7 \pm 6,33$	$164,0 \pm 73,22$	0,227
AF	$-22,4 \pm 7,33$	$190,4 \pm 80,44$	0,261
BF	$-38,3 \pm 7,05$	$188,0 \pm 63,11$	0,105
CF	$-44,8 \pm 6,33$	$191,6 \pm 67,51$	0,169

Nanoemülsiyonların açıklaması: A) Dondurulmamış %10 BPEONE, B) Dondurulmamış %15 BPEONE, C) Dondurulmamış %20 BPEONE, AF) Dondurulmuş %10 BPEONE, BF) Dondurulmuş %15 BPEONE ve CF) Dondurulmuş %20 BPEONE. (Mean $\pm$ SD)

3.3.1.1. Donmamış BPEONE'nin Damlacık Boyutu ve Zeta Potansiyeli

Oda sıcaklığında saklanan %10, %15 ve %20 oranlarında hazırlanmış BPEO nanoemülsiyonları için zeta potansiyeli, Z-ortalama çapı ve PDI ölçülmüş ve homojenlik, damlacık dağılımı ve kinetik stabiliteyi belirlemek için bir set numune 24 saat boyunca dondurulmuştur. Sonuçlar, BPEO konsantrasyonlarının nanoemülsiyonun stabilitesini önemli ölçüde kontrol ettiğini ortaya koymuştur (Çizelge 3.2). Hazırlanan donmamış %10, %15 ve %20 BPEO nanoemülsiyonlarının ortalama damlacık boyutu sırasıyla $64,23 \pm 43,48$, $177,9 \pm 76,47$ ve $164,0 \pm 73,22$ nm olarak ölçülmüştür, bu da hepsinin stabil nanoemülsiyon damlacık boyutu aralığı olan (20-200 nm) içerisinde olduğunu göstermektedir (Şekil 3.2). Hazırlanan %10, %15 ve %20 BPEO nanoemülsiyonlarının polidispersite indeksi (sırasıyla 0,261, 0,217 ve 0,227), eşik değerin (0,3) altında olup, homojen ve monodispers dağılımı doğrulamıştır.

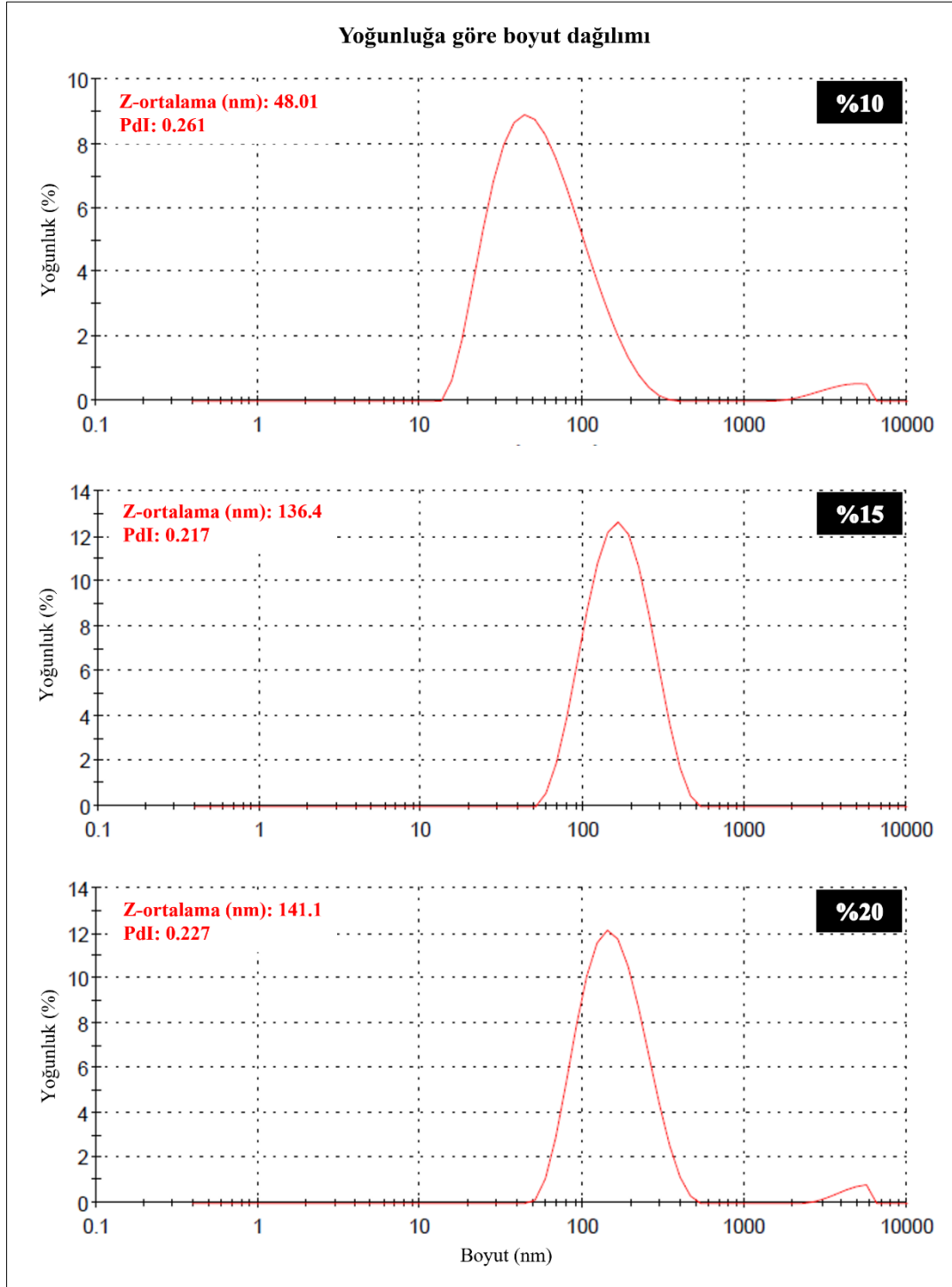
%10 BPEO nanoemülsiyonunun yoğunluk bazlı boyut dağılım analizi iki tepe noktası ortaya çıkarmıştır: nanoemülsiyonun büyük bölümünü oluşturan $64,23 \pm 43,48$ nm'de (yoğunluk %97) tepe 1 ve büyük agregatların küçük bir kısmını içeren 3976 ± 1097 nm'de (yoğunluk %3) tepe 2, bu da stabil ve homojen bir nanoemülsiyon olduğunu göstermektedir.

Ek olarak, %10 BPEO nanoemülsiyonunun zeta potansiyel analizi (Şekil 3.3), damlacıklar üzerinde net negatif yüzey yükü sergilemiş ve $-26,0 \pm 3,94$ mV'de (alan %100'ü) tek bir tepe noktası göstererek tek modlu ve homojen bir dağılım olduğunu doğrulamıştır. %15 BPEO nanoemülsiyonunun yoğunluk bazlı boyut dağılım analizi, $177,9 \pm 76,47$ nm'de (100% yoğunluk) tek bir tepe noktası gösterdi ve bu da homojen ve tekdüze bir nanoemülsiyon olduğunu gösterdi. %15 BPEO nanoemülsiyonunun zeta potansiyeli analizi, damlacıklar üzerinde homojen bir negatif yüzey yükü sergiledi ve $-28,0 \pm 6,27$ mV'de (100% alan) tek bir tepe noktası gösterdi, bu da tek modlu ve homojen bir dağılımı doğruladı.

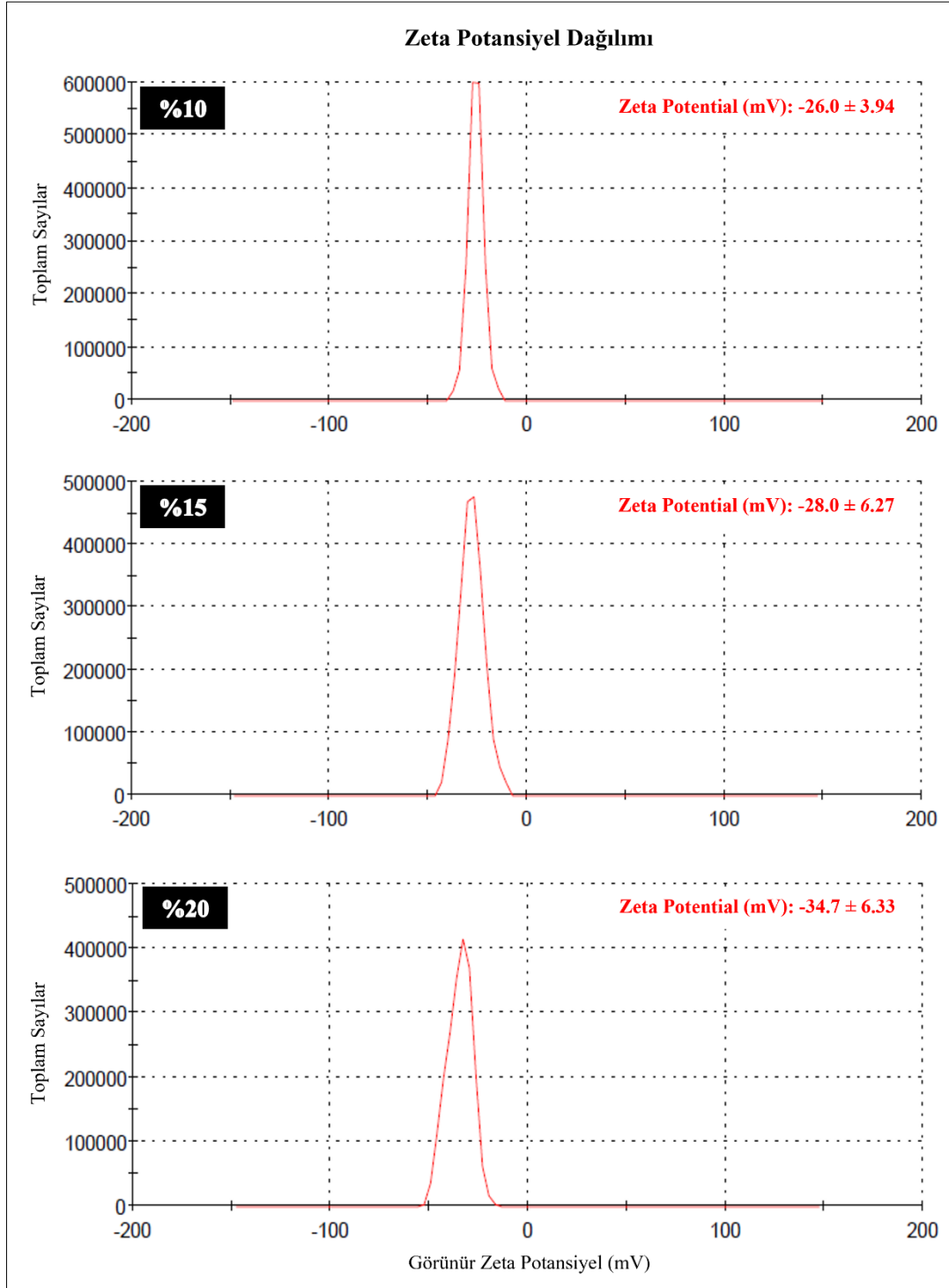
%20 BPEO nanoemülsiyonunun yoğunluk bazlı boyut dağılım analizi iki tepe noktası ortaya çıkardı: $164,0 \pm 73,22$ nm'de (yoğunluk %97,1) tepe-1, nanoemülsiyonun büyük

bölümünü oluştururken, $4501 \pm 877,2$ nm'de (yoğunluk %2,9) tepe-2, ortalama çapı 141,1 nm olan küçük bir büyük agrega popülasyonu içerir ve bu da stabil ve tekdüze bir nanoemülsiyon olduğunu gösterir. Ayrıca, %20 BPEO nanoemülsiyonun zeta potansiyel analizi, damlacıklar üzerinde net negatif yüzey yükü gösterdi ve $-34,7 \pm 6,38$ mV'de (alanın %100'ü) tek bir tepe noktası ile tek modlu ve homojen bir dağılım olduğunu doğruladı. Önemli olarak, yüksek elektrostatik stabilite, ZP ($-34,7 \pm 6,38$ mV) büyüklüğü ile kanıtlanmıştır. Bu değer, ortak eşik değeri olan ± 30 mV'den yüksek olup, damlacıklar arasında agregasyonu önleyen ve yüksek stabilite sağlayan güçlü itme kuvvetlerini varlığını göstermektedir.

BPEO konsantrasyonunun %10'dan %20'ye çıkarılması, ortalama damlacık boyutunun 64,23 nm'den 164,0 nm'ye yükselmesine neden olmuş ve aynı zamanda daha yüksek bir mutlak ZP değeri ($-26,0$ ila $-34,7$ mV, sırasıyla) ile sonuçlanmıştır; bu durum, daha yüksek yüklemelerde elektrostatik stabilizasyonun arttığını göstermektedir. Sonuçlar, hazırlanan üç nanoemülsiyonun da yüksek homojenliğe, önemli ölçüde uzun vadeli stabiliteye, tekrarlanabilirliğe ve gıda, ilaç ve kozmetik sektörlerinde uygulama için potansiyel uygunluğa sahip olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 3.2: %10, %15 ve %20 BPEO nanoemülsiyonlarının damlacık boyutu ve polidispersite indeksi sonuçları.



Şekil 3.3: %10, %15 ve %20 BPEO nanoemülsiyonlarının zeta potansiyeli sonuçları.

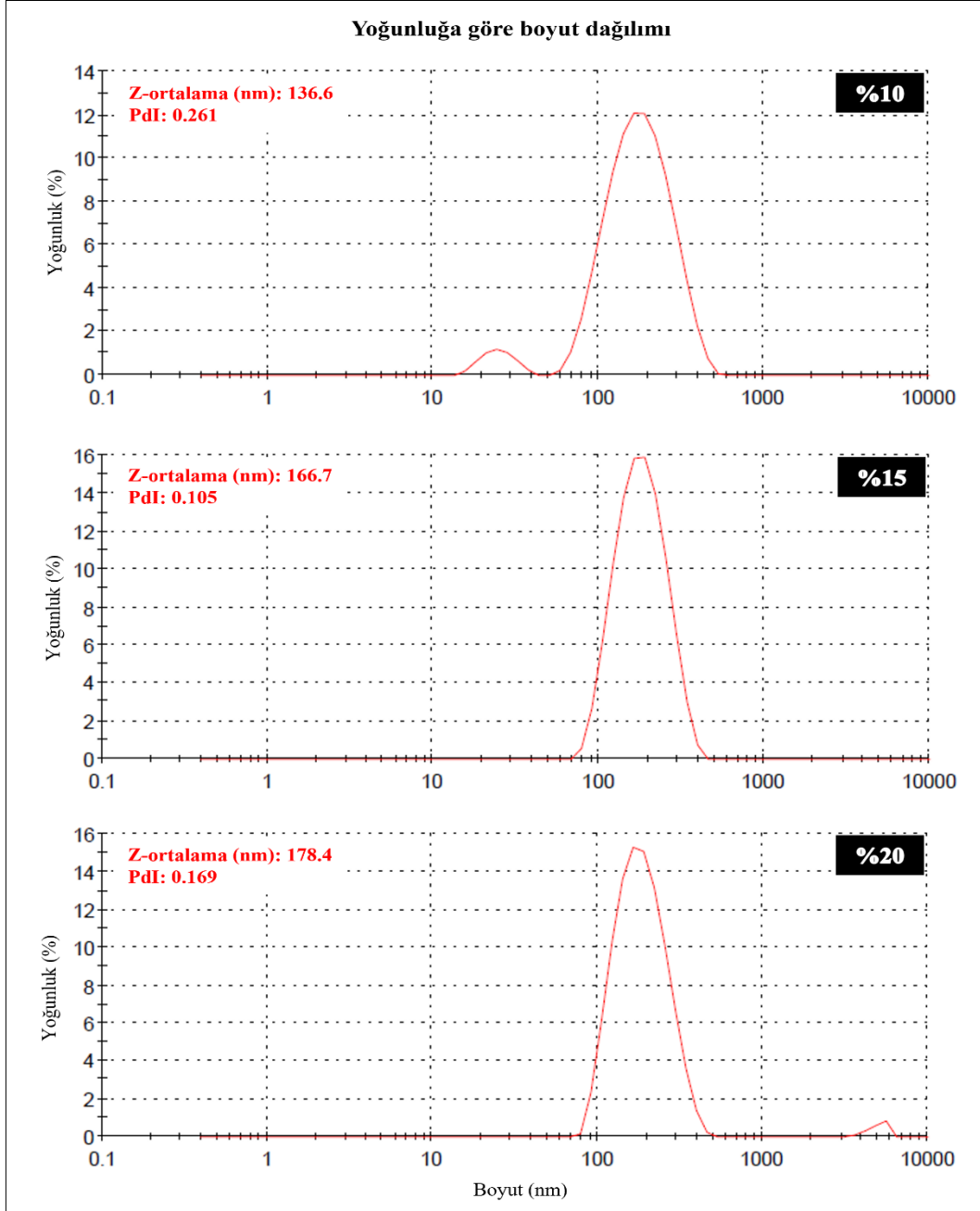
3.3.1.2. Donmuş BPEONE'nin Damlacık Boyutu ve Zeta Potansiyeli

Hazırlanan dondurulmuş %10, %15 ve %20 BPEO nanoemülsiyonlarının ortalama damlacık boyutu sırasıyla $190,4 \pm 80,44$, $188,0 \pm 63,11$ ve $191,6 \pm 67,51$ nm olarak ölçülmüştür, bu da hepsinin stabil nanoemülsiyon damlacık boyutu aralığı olan (20-200 nm) içerisinde olduğunu göstermektedir (Şekil 3.4). Hazırlanan %10, %15 ve %20 BPEO nanoemülsiyonlarının polidispersite indeksi (sırasıyla 0,261, 0,105 ve 0,169), eşik değerin (0,3) altında olup, homojen ve monodispers dağılımı doğrulamıştır. %10 BPEO nanoemülsiyonunun yoğunluk bazlı boyut dağılımı analizi iki tepe noktası ortaya çıkarmıştır: $190,4 \pm 80,44$ nm'de (yoğunluk %94,9) nanoemülsiyonun büyük bölümünü oluşturan tepe 1 ve $25,14 \pm 5,57$ nm'de (yoğunluk %5,1) büyük agregatların küçük popülasyonlarını içeren tepe 2, bu da stabil ve homojen bir nanoemülsiyon olduğunu göstermektedir.

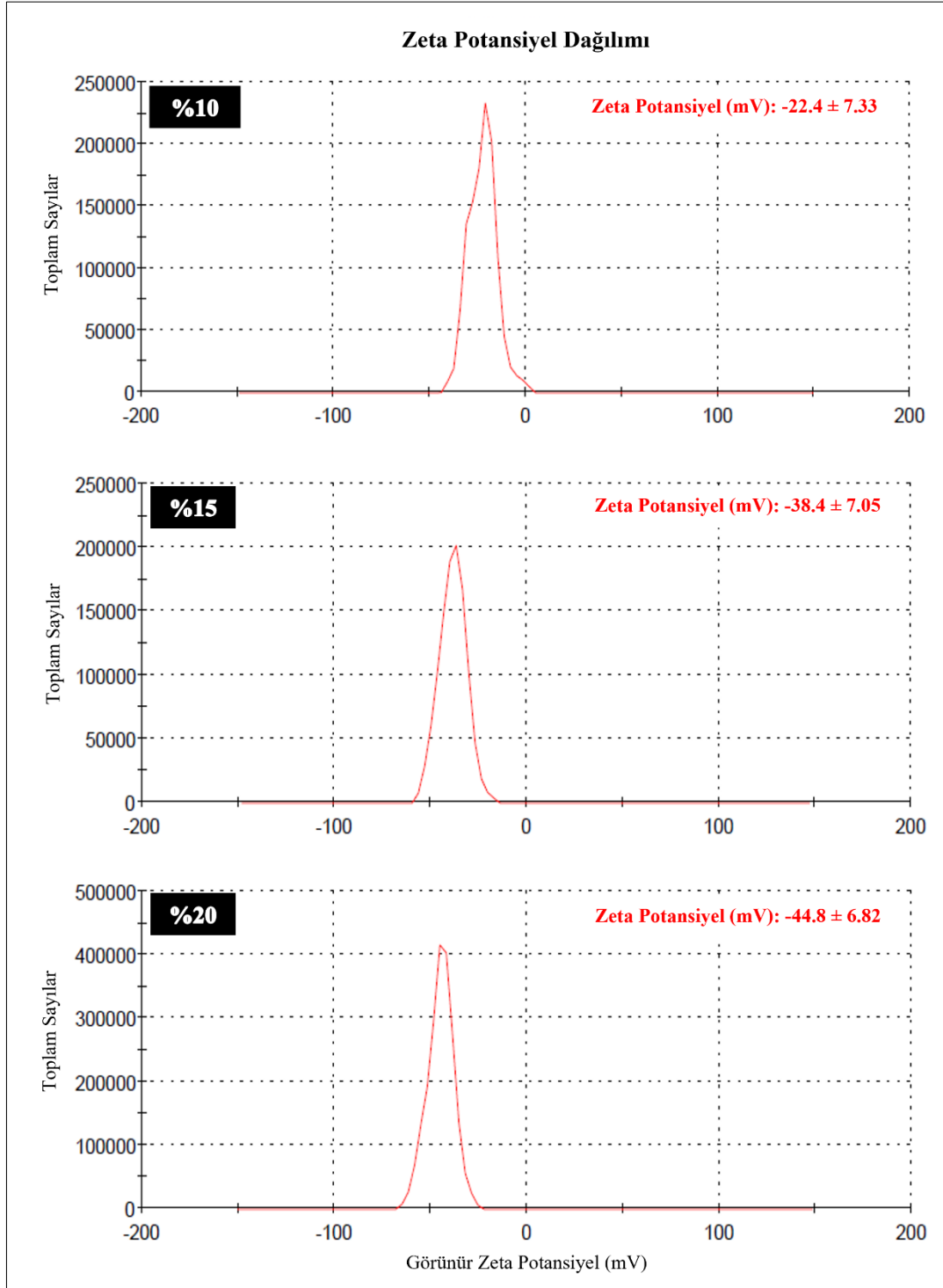
Ek olarak, %10 BPEO nanoemülsiyonunun zeta potansiyeli analizi, damlacıklar üzerinde net negatif yüzey yükü olduğunu ve $-22,4 \pm 7,33$ mV'de (alanın %100'ü) tek bir tepe noktası olduğunu ortaya koydu, bu da tek modlu ve homojen bir dağılım olduğunu doğruladı. 15% BPEO nanoemülsiyonunun yoğunluk bazlı boyut dağılım analizi, $188,0 \pm 63,11$ nm'de (%100 yoğunluk) tek bir tepe noktası gösterdi ve bu da homojen ve tekdüze bir nanoemülsiyon olduğunu gösterdi. %15 BPEO nanoemülsiyonunun zeta potansiyeli analizi, damlacıklar üzerinde homojen bir negatif yüzey yükü gösterdi ve $-38,3 \pm 7,05$ mV (alanın %100'ü) değerinde tek bir tepe noktası ile tek modlu ve homojen bir dağılım olduğunu doğrulamıştır. %20 BPEO nanoemülsiyonunun yoğunluk bazlı boyut dağılım analizi iki tepe noktası ortaya çıkardı: $191,6 \pm 67,51$ nm'de (yoğunluk %98,1) tepe-1, nanoemülsiyonun büyük bölümünü oluştururken, $4964 \pm 624,8$ nm'de (yoğunluk %1,9) tepe-2, büyük agregatların küçük bir kısmını içermekte ve stabil ve tekdüze bir nanoemülsiyon olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, %20 BPEO nanoemülsiyonunun zeta potansiyel analizi (Şekil 3.5), damlacıklar üzerinde net negatif yüzey yükü gösterdi ve $-44,8 \pm 6,82$ mV'de (alanın %100'ü) tek bir tepe noktası ile tek modlu ve homojen bir dağılım olduğunu doğruladı. Önemli olarak, yüksek elektrostatik stabilite, %15 ve %20 BPEONE'nin ZP büyüklüğü (sırasıyla

38,3±7,05 ve -44,8±6,82 mV) ile kanıtlanmıştır. Bu değerler, ±30 mV'lik ortak eşik değerinden daha yüksekti ve damlacıklar arasında agregasyonu önleyen ve yüksek stabilite sağlayan yüksek itme kuvvetlerini göstermektedir. Sonuçlar, hazırlanan üç nanoemülsiyonun da muazzam bir tekdüzelik, önemli uzun vadeli stabilite, tekrarlanabilirlik ve gıda, ilaç ve kozmetik sektörlerinde uygulama için potansiyel uygunluğa sahip olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 3.4: Dondurulmuş %10, %15 ve %20 BPEO nanoemülsiyonlarının damlacık boyutu ve polidispersite indeksi sonuçları.



Şekil 3.5: Dondurulmuş %10, %15 ve %20 BPEO nanoemülsiyonlarının zeta potansiyeli sonuçları.

3.3.2. Bulanıklık (Türbidite) Analizi

Hazırlanan tüm nanoemülsiyon numuneleri üç kez çoğaltıldı ve her bir çoğaltmanın absorbandsı ölçülerek bulanıklıkları hesaplandı (Çizelge 3.3). Hazırlanan nanoemülsiyon kolloidal sistemlerinin optik özellikleri, belirlenen Z-ortalama damlacık boyutu ile doğrudan bağlantılıydı ve bu da dağılık faz konsantrasyonunun fiziksel özellikler üzerindeki etkisini doğruladı. Özellikle, ortalama bulanıklıkta %10 nano formülasyondan ($4,44 \pm 0,44 \text{ cm}^{-1}$, $p < 0,05$) %15 nano formülasyona ($6,08 \pm 0,63 \text{ cm}^{-1}$) doğru gözlenen belirgin artış, 190,4 nm'den 191,6 nm'ye yükselen Z-ortalama çapındaki artışla tutarlıydı. Bu değişim, %10 nano formülasyonun, minimum ışık saçılımı ve kinetik stabilite nedeniyle oldukça kararlı, düşük bulanıklığa sahip bir nanoemülsiyon oluşturduğunu göstermektedir. Bu konsantrasyonun aşılması, damlacıkların birleşmesine veya yetersiz emülgatör kaplamasına neden olarak daha büyük damlacık boyutlarına yol açmıştır. Bununla birlikte, hazırlanan nanoemülsiyonların bulanıklığı %20 konsantrasyonda ($6,86 \pm 0,54 \text{ cm}^{-1}$) hafifçe artmaya devam etmiştir; bu artış, %15 nano formülasyonla karşılaştırıldığında istatistiksel olarak anlamlı değildir ($p = 0,263$). Bu nedenle, BPEO konsantrasyonunun %10'un üzerine çıkması, damlacık çapında küçük bir değişiklik ile birlikte PDI ve bulanıklıkta istenmeyen artışlara neden olmuş ve böylece nanoemülsiyonun kinetik stabilitesinin azalmasıyla sonuçlanmıştır.

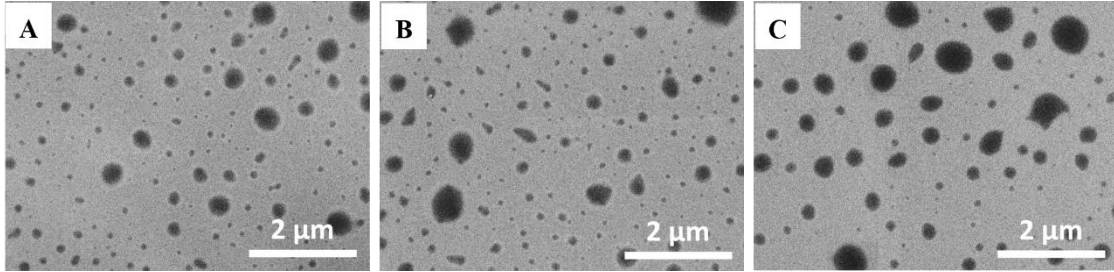
Çizelge 3.3: %10, %15 ve %20 BPEO nanoemülsiyonlarının bulanıklık analizi.

No.	Nano formülasyonlar	Bulanıklık (cm^{-1}) = $2,303 \times \text{Abs/L}$
1	%10 BPEO	$4,44 \pm 0,44^a$
2	%15 BPEO	$6,08 \pm 0,63^b$
3	%20 BPEO	$6,86 \pm 0,54^b$
	p-değeri	0.004

3.3.3. Nanoemülsiyon Morfoloji Analizi

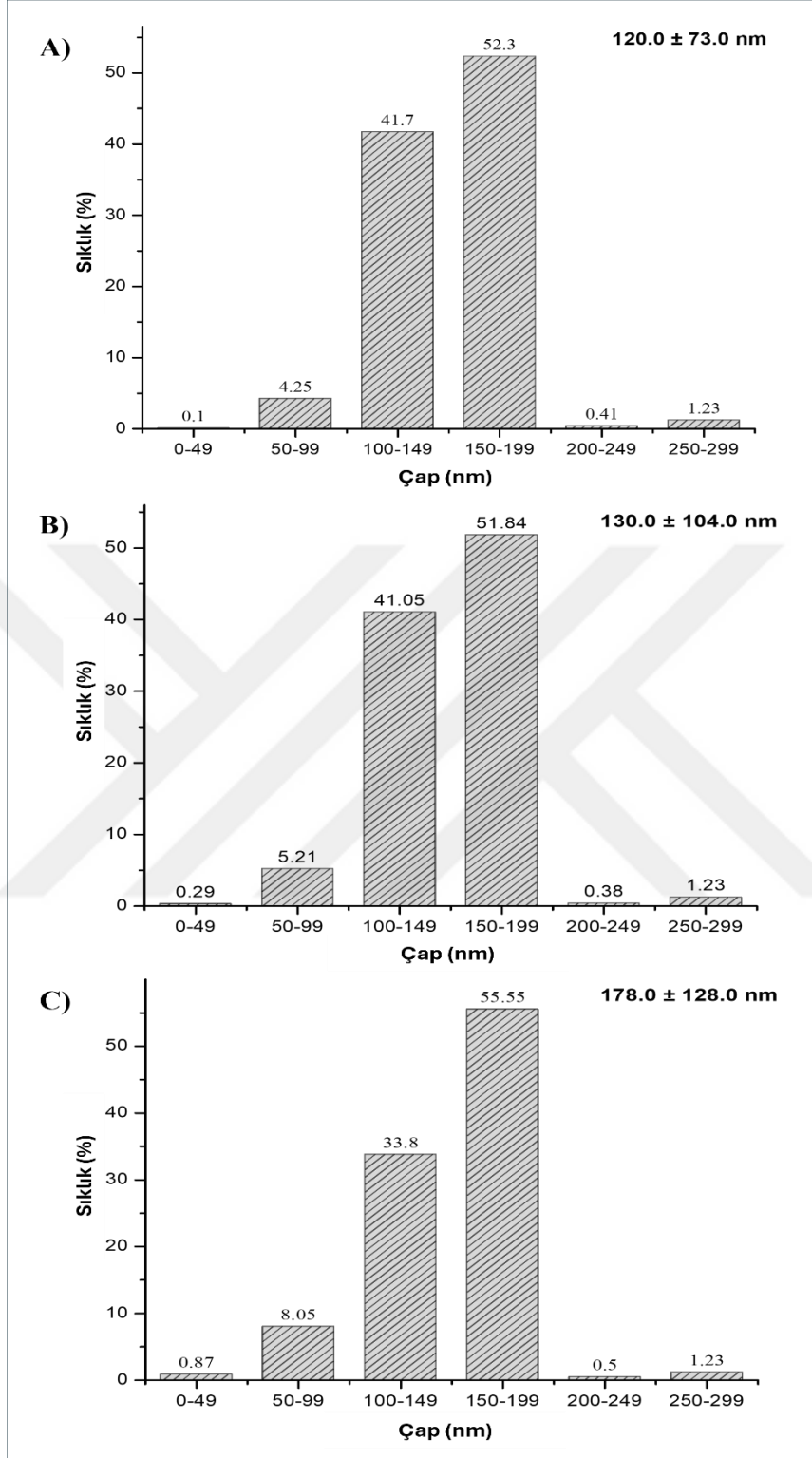
Yüzey morfolojisini, parçacık boyutunu ve boyut dağılımını belirlemek için geçirimli elektron mikroskobu analizi yapılmıştır (Bouchemal vd., 2004). Şekil 3.6A, 3.6B ve 3.6C, farklı BPEO konsantrasyonlarında (%10, %15 ve %20) hazırlanan BPEO nanoemülsiyonlarının TEM mikrograflarını göstermektedir. Görüntüler, nanoemülsiyon damlacıklarının küresel şekilli olduğunu ve boyutlarının nanometre aralığında (<200 nm) olduğunu göstermiştir. Her damlacığın çapı, hem enine hem de boyuna olmak üzere her iki yönde belirlenmiştir.

Ayrıca, mikrograflarda gözlemlenen parçacık boyutu, dinamik ışık saçılımı sonuçlarıyla örtüşmektedir. Belirli bir büyütme aralığındaki damlacıkların miktarı tablolştırılmış haline getirilmiş ve histogramları çizilmiştir, bu da her aralıkta gözlemlenen damlacıkların yüzdesini temsil eden damlacık boyutu dağılım sıklığının doğru ayrıntılarını sağlamıştır (Şekil 3.7A, 3.7B, 3.7C). %10, %15 ve %20 BPEONE'lerin damlacık boyutları, ImageJ yazılımı kullanılarak TEM mikrografları ile ölçülmüş ve sırasıyla $120,0 \pm 73,0$, $130,0 \pm 104,0$ ve $178,0 \pm 128,0$ nm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.6: Hazırlanan nanoemülsiyonların geçirimli elektron mikrogramları.

A) %10 BPEO Nanoemülsiyon, B) %15 BPEO Nanoemülsiyon, C) %20 BPEO Nanoemülsiyon, 2 µm büyütme oranında.



Şekil 3.7: Damlacık boyutu dağılım sıklığının histogramları.

A) %10 BPEO nanoemülsiyon, B) %15 BPEO nanoemülsiyon ve C) %20 BPEO nanoemülsiyon, her boyut aralığındaki damlacıkların yüzdesini temsil eder.

3.4. Enkapsülasyon Etkinliğinin Belirlenmesi

Nanoemülsiyonlar, antioksidanlar, antimikrobiyaller, besin açısından zengin bileşikler ve ilaçlar gibi biyoaktif bileşenleri çeşitli ticari ürünlere dahil etmek için verimli bir dağıtım sistemi olarak kullanılmaktadır. Daha küçük damlacık boyutları, bu biyoaktif bileşenlerin çözünürlüğünü ve biyoyararlanımını artırarak, ilaçlarda (ilaç taşıyıcıları gibi), gıdalarda (güçlendirilmiş içecekler gibi) ve kozmetiklerde (cilt emilimini iyileştirme gibi) önemli işlevlerini yerine getirmelerini sağlar. Nanoemülsiyon uygulamaları, genellikle emilmesi veya çözünmesi zor olan bileşiklerin başarılı bir şekilde kullanılması ve stabil bir formda tutulmasını sağladığı için önemlidir. Bu nedenle, yükleme verimliliğinin belirlenmesi nanoemülsiyonlar için önemli bir ölçüttür.

BPEO nanoemülsiyonu, karışımın bileşenlerini uçuculuklarına göre ayırmak ve ölçmek için damıtma yöntemiyle analiz edilmiştir. EE (%), nanoemülsiyon formülasyonunda kullanılan EO'nun (ağırlıkça %10) başlangıç miktarına göre kapsüllenmiş bileşiğin yüzdesi olarak hesaplanmıştır. Uçuculuğa göre damıtma sonrası toplanan EO kütlesi, hesaplama sırasında nanoemülsiyonda kapsüllenmiş EO miktarını temsil etmiştir. EO'nun EE'si (Çizelge 3.4), 24 saatlik nanoemülsiyon hazırlığı sonrasında %88 olarak ölçülmüştür. Stabilitate izleme 4 hafta boyunca devam etti ve ilk haftadan sonra buharlaşma nedeniyle EO miktarında hafif bir azalma gözlemlendi. Sonraki haftalarda (2 - 4), EO kütle kaybında önemsiz bir azalma gözlemlendi, bu durum, 25 ± 5 °C'de saklama sırasında nanoemülsiyonun mükemmel kapsüllenme performansını ve uzun vadeli stabilitesini göstermiştir.

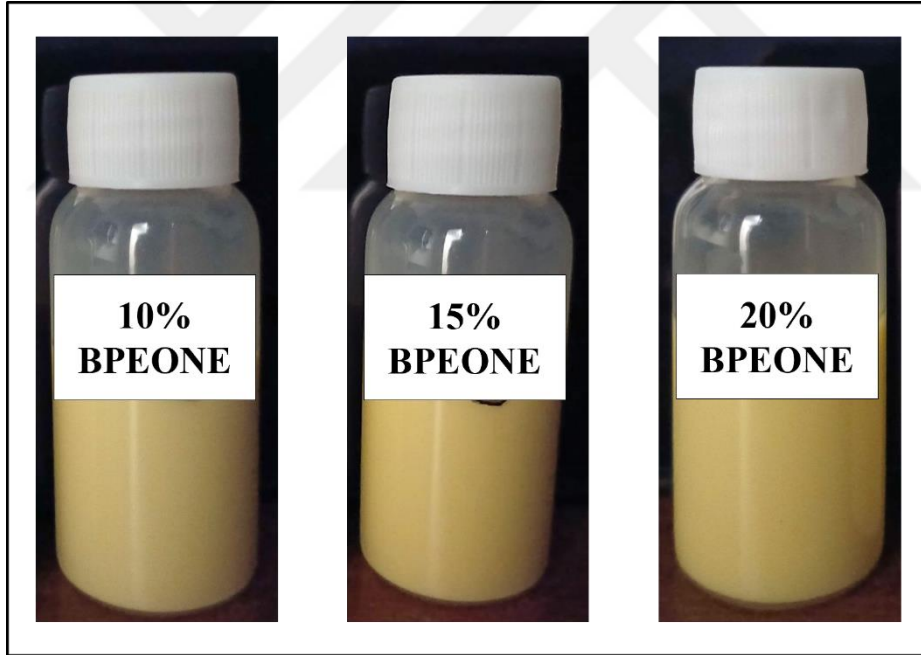
Çizelge 3.4: 4 haftaya kadar BPEO nanoemülsiyonunun yükleme verimliliğinin sonuçları.

Depolama süresi	Kapsülleme verimi (%)
24 saat	88,34 ^a ±2,32
1 hafta	76,20 ^b ±2,69
2 hafta	77,66 ^b ±3,75
3 hafta	73,15 ^b ±3,23
4 hafta	71,07 ^b ±2,08
p-değeri	0.000

3.5. Stabilite Analizi

3.5.1. Görsel Faz Ayırması

Faz ayrımı, karışmayan sıvıların kolloidal karışımının farklı katmanlara fiziksel olarak ayrılması anlamına gelir. BPEO nanoemülsiyonunun görsel gözlemi, oda sıcaklığında uzun süre saklanan emülsiyon şişesini doğrudan gözlemlenmesiyle gerçekleştirilmiş ve emülsiyonda herhangi bir değişiklik gözlenmeksiniz, yüksek derecede homojenlik ve stabilite sergilendiği tespit edilmiştir. Görsel faz ayrımı analizi için herhangi bir analitik cihaz kullanılmamıştır. Kremleşme, birleşme veya çökelme gibi herhangi bir kararsızlık belirtisi gözlemlenmemiştir (Şekil 3.8). Görsel gözlemler, hazırlanan BPEO nanoemülsiyonunun faz ayrışmaya karşı oldukça dirençli olduğunu ortaya koymuş ve normal saklama koşullar altında uzun vadeli stabilitesini doğrulamıştır.



Şekil 3.8: Faz ayrışması belirtisi göstermeyen BPEO nanoemülsiyonu.

3.5.2. Santrifüjün Etkisi

Santrifüj faz ayrıştırma testi, ilaç, kozmetik ve gıda gibi çeşitli sektörlerde kullanılan nanoemülsiyon kolloidal sistemlerin uzun vadeli stabilitesini belirlemek için fiziksel stabilite testi için hızlı bir yöntemdir. Santrifüj kuvveti stresi hızlandırarak yalnızca birkaç dakika içinde iki ayrı katman oluşturarak faz ayrışmasına neden olabilir. Birkaç çalışmada, stabiliteyi hızlı bir şekilde belirlemek için amacıyla santrifüjleme kullanılmıştır. BPEO nanoemülsiyonunun bulanıklık tutarlılığı değerleri, 3000 rpm'de 5 dakika boyunca yalnızca küçük bir değişiklik göstermiş ve stabil kalmıştır, bu durum küçük damlacıkların ayrılmaya veya topaklanmaya karşı etkili bir direnç sergilediğini göstermektedir (Çizelge 3.5). Görünür bir faz ayrışması gözlemlenmemiştir; bu da nanoemülsiyonun stabilitesini doğrulamaktadır. Yağ damlacıkları yukarı doğru hareket etmemiş ve topaklanarak kremleşme, çökme veya birleşme meydana getirmemiştir. Bulanıklık verilerinde ve faz ayrışmasında önemli bir değişiklik gözlemlenmemesi, hazırlanan BPEO nanoemülsiyonunun, küçük yağ damlacıklarının homojen dağılımı sayesinde yüksek stabilite sergilediğini göstermektedir.

Çizelge 3.5: Santrifüjlemenin BPEO nanoemülsiyonlarının bulanıklığına etkisi.

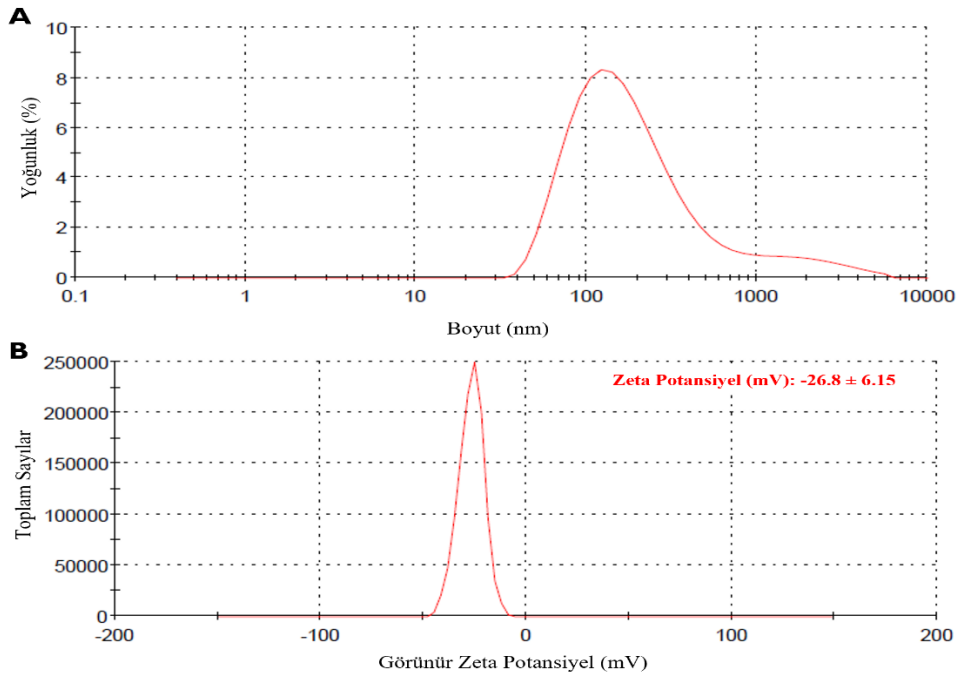
BPEO Nanoemülsiyon		Bulanıklık (cm ⁻¹)
Santrifüjleme öncesi	%10	4,44±0,44 ^a
	%15	6,09±0,63 ^{bc}
	%20	6,86±0,54 ^c
Santrifüjleme sonrası	%10	4,70±0,58 ^{ab}
	%15	6,28±0,56 ^c
	%20	7,18±0,53 ^c
	p-değeri	0.000

3.6. ZnO Nanopartiküllerinin Sentezi ve Karakterizasyonu

Hidrotermal yaklaşım kullanılarak ZnO NP'lerin başarılı bir şekilde sentezlendiği, DLS, zeta potansiyeli, XRD ve SEM analizleriyle doğrulanmıştır.

3.6.1. Parçacık Boyutu ve Zeta Potansiyeli Analizi

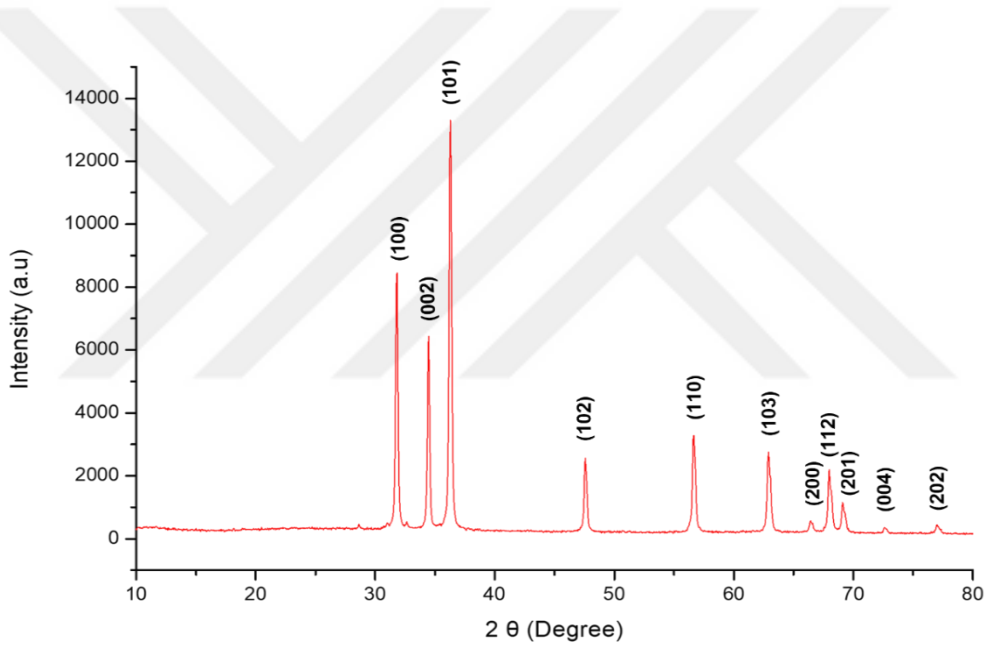
Dinamik ışık saçılımı (DLS) ve zeta potansiyeli yöntemleri, sentezlenen ZnO nanopartiküllerinin hidrodinamik özelliklerini ve yüzey yükünü belirlemek için kullanıldı (Şekil 3.9A, 3.9B). Yoğunluk bazlı boyut dağılımı analizi, $351,8 \pm 632,0$ nm'de (%100 yoğunluk) büyük bir popülasyon tepesi göstermiştir. DLS sonuçlarında Z-ortalama hidrodinamik çap 137,4 nm olarak elde edilmiştir. ZnO NP'lerin PDI değeri 0,366 olarak belirlenmiştir. Hidrotermal olarak sentezlenen ZnO NP'lerin zeta potansiyeli analizi $-26,8 \pm 6,15$ mV olarak ölçülmüştür (Şekil 3.9B). Zeta potansiyeli analizi, alanın %100'ü ile $-26,8$ mV 'de tek bir tepe noktası göstermiştir. Yüksek negatif değer, parçacıklar arasında güçlü bir elektrostatik itme olduğunu gösterdi; bu da aglomerasyonu önler ve kararlı ZnO NP'lerin oluşumunu kolaylaştırmaktadır.



Şekil 3.9: A) ZnO NP'lerin parçacık boyutu ve polidispersite indeksi sonucu, B) ZnO NP'lerin Zeta Potansiyeli sonucu.

3.6.2. XRD Analizi

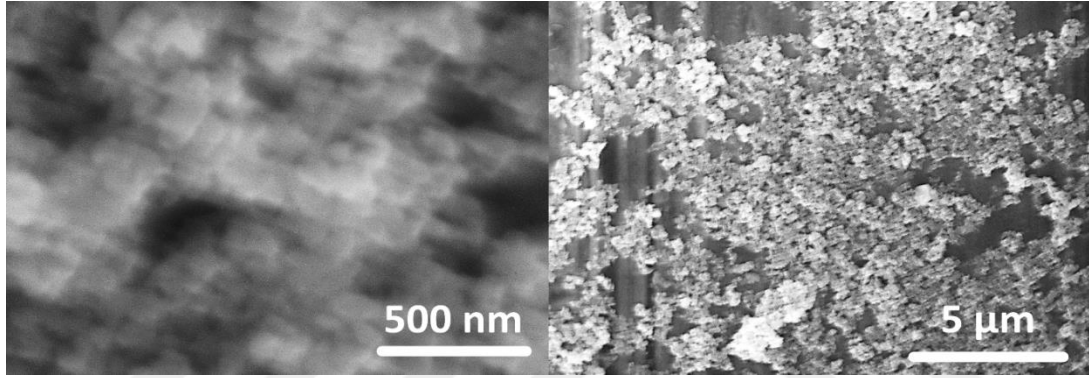
Şekil 3.10, hidrotermal yöntemle hazırlanan ZnO NP'lerin X-ışını difraksiyon desenini göstermektedir. XRD spektrumunda daha dar difraksiyon piklerinin varlığı, malzemenin yüksek saflıkta olduğunu göstermiştir. Gözlemlenen yansıma pikleri, ZnO NP'lerin başarılı bir şekilde sentezlendiğini ortaya koymuştur. Yoğunluk verileri 20-80° aralığında (2θ aralığı) belirlenmiştir. Gözlemlenen XRD pikleri, bildirilen verilere (JCPDS Kart No. 00-036-1451) benzerlik göstermiştir. Sonuç olarak, XRD analizi, hazırlanan malzemenin ZnO nanopartiküllerinden oluştuğunu doğrulamıştır.



Şekil 3.10: Hidrotermal yöntemle sentezlenen ZnO NP'lerin X-ışını difraktogramı.

3.6.3. SEM Analizi

Tarama Elektron Mikroskobu ve Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektroskopisi (EDX) kullanılarak sentezlenen ZnO NP'lerin morfolojik ve elementel bileşimi incelenmiştir. SEM mikrografları (Şekil 3.11), ağırlıklı olarak küresel morfolojiye sahip çinko oksit nanopartiküllerinin başarılı bir şekilde sentezlendiğini doğrulamıştır. Belirli bir aglomerasyon seviyesi gözlemlense de, büyütme oranı artırıldığında (5 μm ölçek çubuğu) tek tek parçacıklar ayırt edilebilmiştir. ZnO NP'lerin çapı $47,94 \pm 8,39$ nm olarak belirlenmiştir.

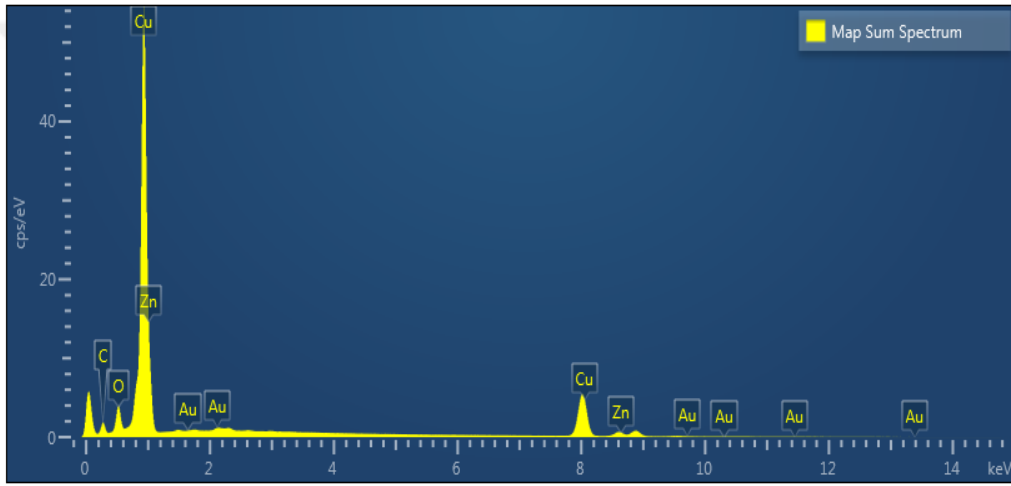


Şekil 3.11: Hazırlanan ZnO NP'lerin taramalı elektron mikrografı: daha yüksek büyütmede (500 μm) ve 5 μm büyütmede.

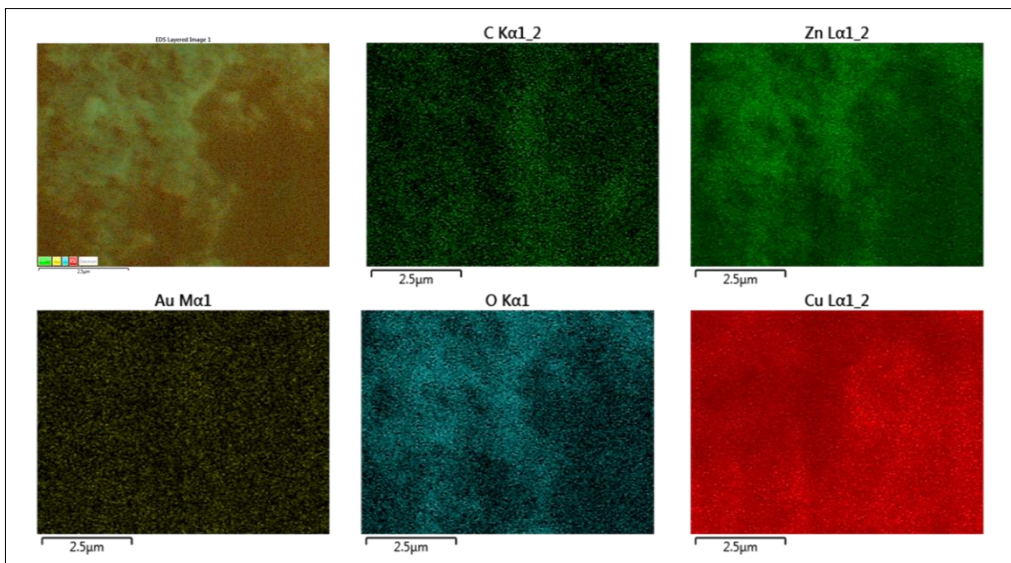
3.6.4. Enerji Dağıtıcı X-ışını spektroskopisi

EDX, sentezlenen ZnO nanopartiküllerinin element bileşimini belirlemek için kullanıldı ve veriler Şekil 3.12'de gösterilmektedir. Spektrum, ana bileşikler olan Çinko (Zn) ve Oksijen (O) varlığını doğruladı ve bu da istenen ZnO malzemesinin başarılı bir şekilde üretildiğini kanıtladı. Zn ve O piklerinin yanı sıra, EDX spektrumunda Karbon (C), Bakır (Cu) ve Altın (Au) elementlerine ait karakteristik düşük yoğunluklu sinyaller de gözlemlenmiştir. Bu pikler ZnO kristal yapısına özgü olmayıp, genellikle numune hazırlama veya ölçüm sürecinden kaynaklanan artefaktları temsil etmektedir. Karbon sinyali büyük olasılıkla, iletken olmayan ZnO numunesinin SEM incelemesine tabi tutulabilmesi için yerleştirildiği karbon bazlı yapışkan bant veya destekten kaynaklanmaktadır. İkincil bir katkı, sentez sürecinde kalmış ve kalsine edilmemiş CTAB (yüzey aktif madde) kalıntılarından ileri gelmiş olabilir. Standart numune kaplama

prosedürü, Au varlığını açıklamaktadır. ZnO tozunun iletken olmayan yapısı nedeniyle, SEM ve EDX ölçümlerini olumsuz etkileyebilecek yük birikimini önlemek amacıyla numune yüzeyi genellikle iletken bir malzeme olan altın (Au) ile ince bir tabaka halinde kaplanmıştır. Cu piki ise genellikle EDX analiz odasında kullanılan bakır numune tutucu veya ızgaradan kaynaklanan enstrümantal bir artefaktır. Element haritalama (Şekil 3.13), Au, C ve Cu gibi dış elementlerin tespit edilmesine rağmen, anahtar elementlerin (Zn ve O) taranan alan boyunca homojen ve düzgün bir şekilde dağıldığını ortaya koymuştur; bu durum, iyi yapılandırılmış ve yüksek saflıkta bir ZnO malzemesinin elde edildiğini göstermektedir.



Şekil 3.12: ZnO NP'lerin element piklerini gösteren EDX spektrumu.



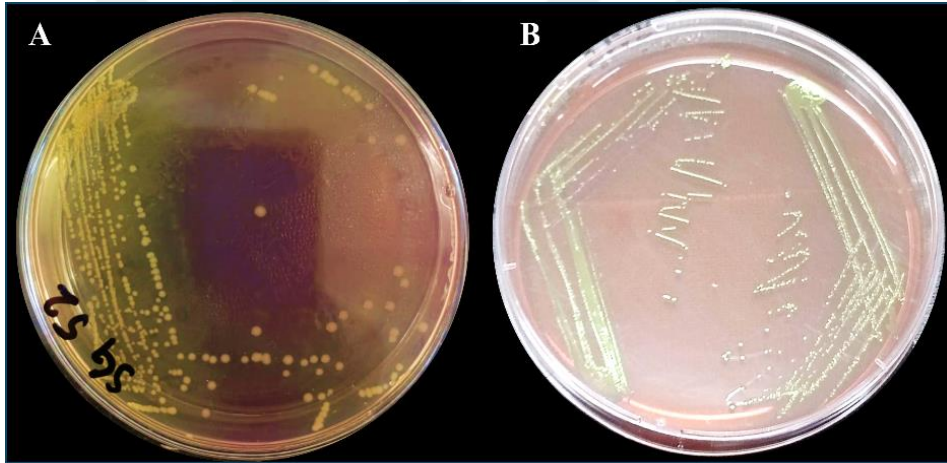
Şekil 3.13: Hidrotermal olarak hazırlanan ZnO NP'lerin EDX haritalaması.

3.7. Antimikrobiyal Aktivite Analizi

BPEO ve BPEO nanoemülsiyonunun antimikrobiyal potansiyeli, optimize edilmiş koşullar altında in vitro olarak araştırılmıştır.

3.7.1. Kültür Hazırlama

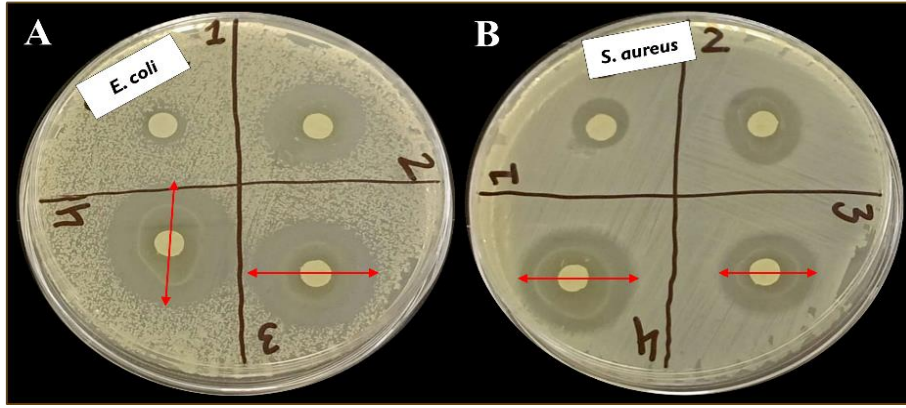
S. aureus ve *E. coli* bakteriyel kültürleri, seçici besiyerleri olan mannitol tuz agar ve eozin metilen mavisi agar üzerine aşılandı. MSA üzerinde sarımsı koloniler ve EMB agar üzerinde yeşil metalik parlaklık gösteren koloniler, sırasıyla *S. aureus* ve *E. coli*'nin seçici ve aktif büyümesini doğruladı (Şekil 3.14). Daha sonra, bu kültürler, büyümeleri için uygun koşullar sağlamak amacıyla steril besin agar ortamına yayılmıştır.



Şekil 3.14: *Staphylococcus aureus* ve *Escherichia coli* bakteriyel kültürleri.

3.7.2. Disk Difüzyon Yöntemi ile Antibakteriyel Test

Disk difüzyon değerlendirmesinde (Şekil 3.15), BPEONE, *E. coli* ve *S. aureus*'a karşı konsantrasyona bağlı antimikrobiyal aktivite göstermiştir (Çizelge 3.6). Test edilen her iki mikroorganizma için de inhibisyon bölgesi (ZIN), konsantrasyon arttıkça genişlemiş ve %40 konsantrasyonda maksimum inhibisyon göstermiştir (*E. coli* için 29 mm ve *S. aureus* için 25 mm). Test edilen tüm seyreltiler, BPEONE'nin Gram-negatif bakteri *E. coli*'ye karşı biraz daha etkili olduğunu göstermiştir.



Şekil 3.15: BPEONE'nin MHA üzerinde A) *E. coli* ve B) *S. aureus*'a karşı antibakteriyel etkisi.

Çizelge 3.6: BPEONE seyreltilerinin inhibisyon bölgeleri.

BPEONE seyreltileri	<i>E. coli</i> (ZIN, mm)	<i>S. aureus</i> (ZIN, mm)
%5	11	9
%10	20	15
%20	25	19
%40	29	25

3.7.3. Minimum İnhibisyon Konsantrasyonu Tayini

BPEO ve BPEONE'nin *E. coli* ve *S. aureus*'a karşı MIC değerleri belirlenmiştir (Çizelge 3.7). BPEO ve BPEONE'nin antibakteriyel aktivitesini doğrulamak için bir antibiyotik (tetrasiklin) de kullanılmıştır. Hazırlanan nanoemülsiyon, test edilen her iki bakteriye karşı da önemli antibakteriyel aktivite göstermiştir. BPEO, BPEONE ve tetrasiklin, Gram-negatif bakteri *E. coli*'ye karşı sırasıyla 0,547, 0,273 ve 0,068 mg/mL MIC değerleri ile daha yüksek antibakteriyel potansiyel sergilemiştir. BPEO, BPEONE ve tetrasiklin, Gram-pozitif bakteri *S. aureus*'a karşı sırasıyla 1,094, 0,547 ve 0,068 mg/mL konsantrasyonlarında daha yüksek MIC değerleri göstermiştir.

Çizelge 3.7: Minimum inhibitör konsantrasyon belirleme.

Grup	<i>E. coli</i>	<i>S. aureus</i>
BPEO (mg/mL)	0,547	1,094
BPEONE (mg/mL)	0,273	0,547
Tetrasiklin (mg/mL)	0,068	0,068

3.8. Tavuk Koruma

3.8.1. Fiziksel-kimyasal analiz

3.8.1.1. Lipit Oksidasyonu

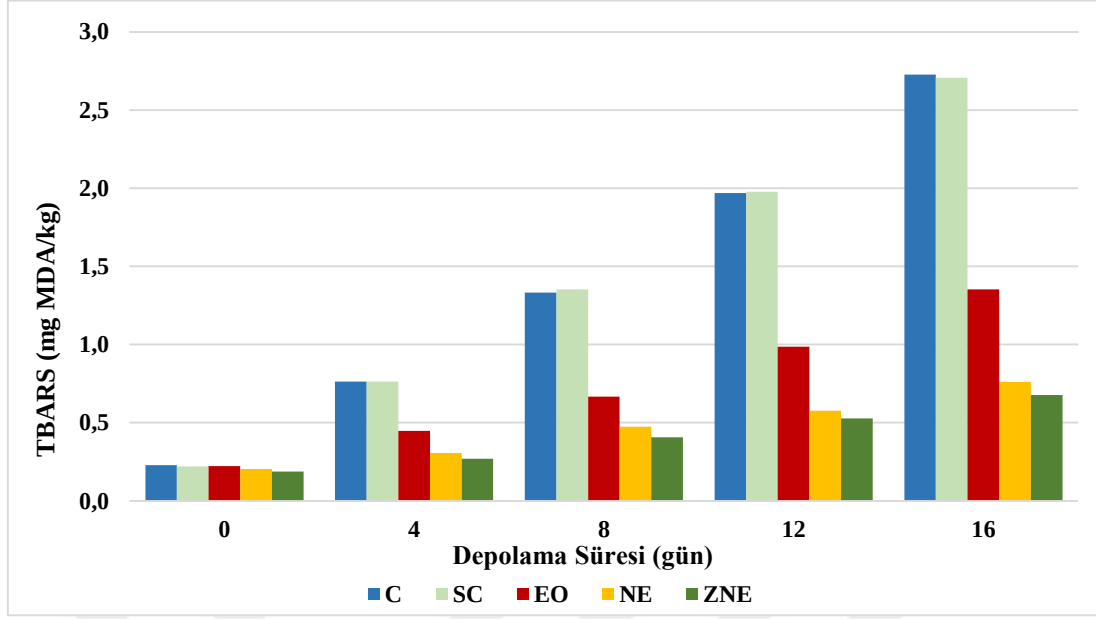
Etin stabilitesi ve kalitesi TBARS analizi ile belirlenmiştir (Wang vd., 2021b). 16 günlük saklama süresi için kullanılan her formülasyonun değerlendirilen TBARS analizi Şekil 3.16'da gösterilmektedir. TBARS analizi, tüm formülasyonların malondialdehit içeriğini (mg MDA/kg) ve önemli antioksidan potansiyellerini ortaya koymuştur (Çizelge 3.8). TBARS cinsinden ölçülen lipit oksidasyonu, 0-16 gün arasındaki depolama süresinin ilerlemesiyle tüm deneysel gruplarda önemli bir artış olduğunu ortaya koymuştur. MDA içeriğindeki en yüksek artış, depolamanın 16. gününde kontrol grubunda $2,73 \pm 0,13$ mg MDA/kg olarak gözlemlenmiştir. Buna karşılık, tek başına BPEONE uygulanan grup ve ZnO NP'lerle kombinasyon halinde uygulanan deneysel grup, lipit oksidasyonunu en güçlü şekilde inhibe etmiş ve depolama süresi boyunca en düşük TBARS değerlerini koruyarak sonunda sırasıyla $0,76 \pm 0,10$ ve $0,68 \pm 0,09$ mg MDA/kg değerlerine ulaşmıştır. Gözlemlenen sonuçlar, BPEONE'nin güçlü antioksidan özelliklerini ve BPEONE ile ZnO NP'lerin birleştirilmiş nano formülasyonunun dikkate değer sinerjik etkilerini ortaya koymuştur.

Çizelge 3.8: Tiyoarbitürik asit (mg MDA/kg), farklı formülasyonlarla işlenmiş tavuk etinin değerleri.

Grup	0. Gün	4. Gün	8. Gün	12. Gün	16. Gün
C	$0,23 \pm 0,01$	$0,76 \pm 0,07^c$	$1,33 \pm 0,09^c$	$1,97 \pm 0,03^c$	$2,73 \pm 0,13^c$
SC	$0,22 \pm 0,03$	$0,76 \pm 0,06^c$	$1,35 \pm 0,05^c$	$1,98 \pm 0,10^c$	$2,71 \pm 0,05^c$
EO	$0,22 \pm 0,03$	$0,45 \pm 0,07^b$	$0,67 \pm 0,04^b$	$0,99 \pm 0,07^b$	$1,35 \pm 0,09^b$
NE	$0,20 \pm 0,04$	$0,31 \pm 0,04^{ab}$	$0,47 \pm 0,05^a$	$0,58 \pm 0,02^a$	$0,76 \pm 0,10^a$
ZNE	$0,19 \pm 0,03$	$0,27 \pm 0,06^a$	$0,41 \pm 0,03^a$	$0,53 \pm 0,05^a$	$0,68 \pm 0,09^a$
SEM	0,007	0,05	0,11	0,17	0,24
p-değeri	0,457	0,000	0,000	0,000	0,000

Grupların açıklaması: C- pozitif kontrol, SC- yenilebilir nişasta kaplama, EO- %10 karabiber esansiyel yağı, NE- %10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE- BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

SEM: Standart hata ortalaması.



Şekil 3.16: Farklı formülasyonlarla işlenmiş tavuk etinin tiyobarbitürik asit (mg MDA/kg) değerleri.

C-pozitif kontrol, SC-yenilebilir nişasta kaplama, EO-%10 karabiber esansiyel yağı, NE-%10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE-BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

3.8.1.2. pH Tayini

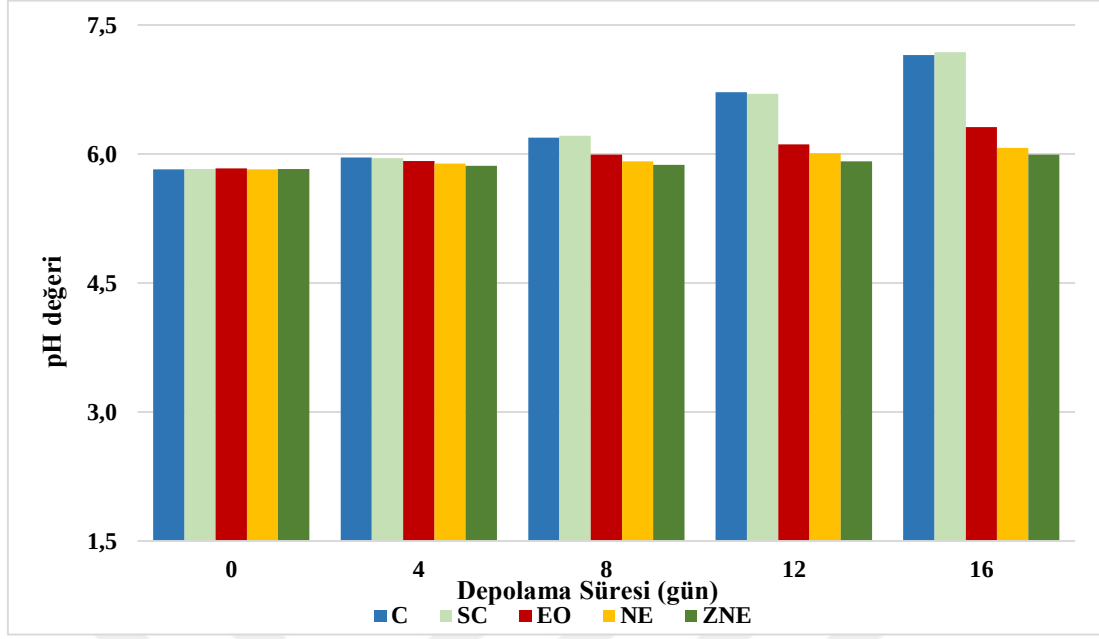
pH, et kalitesini değerlendirmek için oldukça önemli bir parametredir. Uygulanan formülasyonlar, 16 gün boyunca etin pH değerini önemli ölçüde etkilemiştir (Şekil 3.17; Çizelge 3.9). pH değerlerinde kademeli bir düşüş gözlemlenmiştir. BPEONE ile ZnO NP'lerin kombinasyonu ile işlenen et numuneleri, saklama süresi boyunca kontrol grubuna kıyasla daha düşük bir pH düşüşü sergilemiştir. Sonuçlar, 0. günden 16.güne kadar etin pH değerinde hafif bir düşüş olduğunu göstermiştir. BPEONE, ZnO NP'lerle birlikte kullanıldığında, BPEONE ve BPEO'ya kıyasla hafif bir düşüş göstermiş ve bu da sinerjik bir etki olduğunu ortaya koymuştur. Pösö ve Puolanne (2005), saklama süresi boyunca pH'nın düşmesinin etin bozulmasının bir göstergesi olduğunu bildirmiştir. pH analizinin bulguları, %2 kekik esansiyel yağının (TEO) %1 TEO'ya kıyasla pH'ı düşürmede daha etkili olduğunu bildiren Iulietto vd. (2015) tarafından yapılan çalışma ile uyumludur.

Çizelge 3.9: Formülasyonların tavuk etinin pH'ı üzerindeki etkisi.

Grup	0. Gün	4. Gün	8. Gün	12. Gün	16. Gün
C	5,82±0,03	5,96±0,18	6,19±0,04 ^b	6,72±0,05 ^b	7,15±0,16 ^c
SC	5,83±0,04	5,95±0,17	6,21±0,06 ^b	6,70±0,14 ^b	7,18±0,06 ^c
EO	5,83±0,04	5,92±0,08	5,99±0,20 ^{ab}	6,11±0,11 ^a	6,31±0,04 ^b
NE	5,82±0,06	5,89±0,05	5,92±0,08 ^a	6,01±0,13 ^a	6,07±0,10 ^{ab}
ZNE	5,83±0,06	5,86±0,07	5,87±0,04 ^a	5,91±0,02 ^a	5,99±0,08 ^a
SEM	0,01	0,02	0,04	0,09	0,14
p-değeri	0,996	0,846	0,005	0,000	0,000

Grupların açıklaması: C- pozitif kontrol, SC- yenilebilir nişasta kaplama, EO- %10 karabiber esansiyel yağı, NE- %10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE- BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

SEM: Standart hata ortalaması.

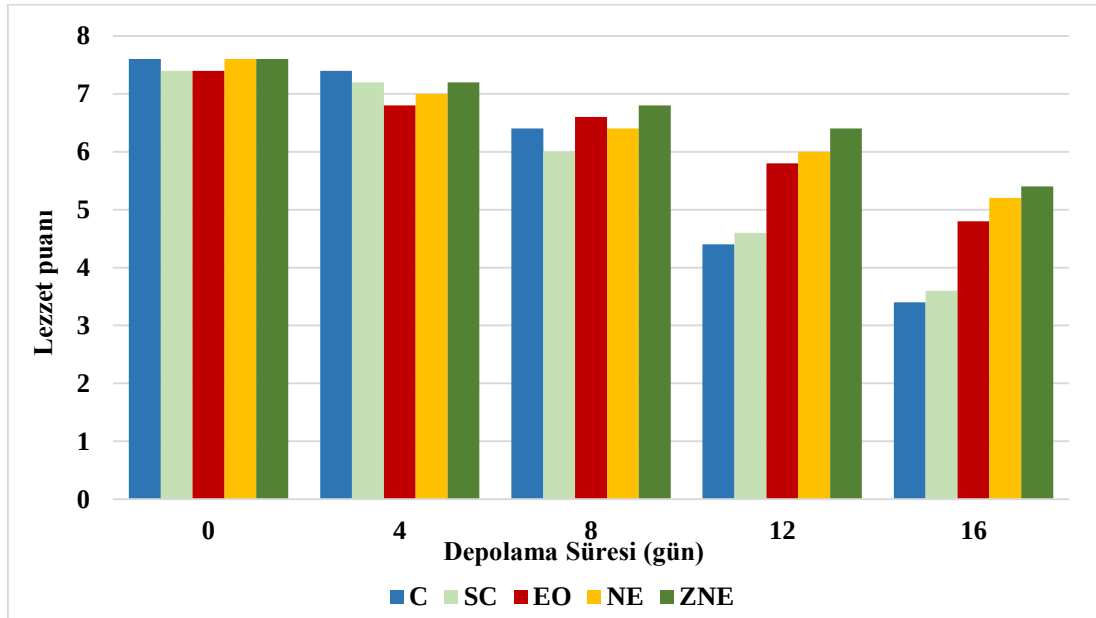


Şekil 3.17: Formülasyonların tavuk etinin pH'ı üzerindeki etkisi.

C-pozitif kontrol, SC-yenilebilir nişasta kaplama, EO-%10 karabiber esansiyel yağı, NE-%10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE-BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

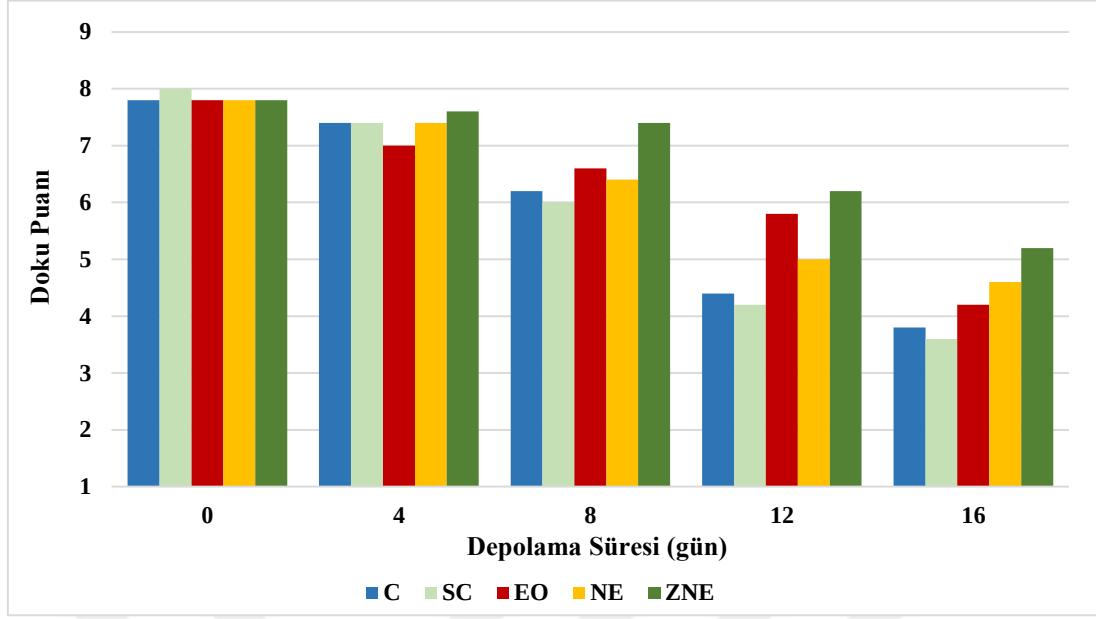
3.8.2. Duyusal analiz

Tüm deneysel grupların genel kabul edilebilirliği duyusal analiz yoluyla değerlendirildi. Çeşitli formülasyonların etkisi özellikle tavuk etinin tadı, dokusu ve renginde belirgindi. Genel kabul edilebilirlik, deneysel grupların (C, herhangi bir deneysel işlem uygulanmamış pozitif kontrol; SC, sadece yenilebilir nişasta kaplaması ile işlem görmüş; EO, %10 karabiber esansiyel yağı ile işlem görmüş; NE, %10 BPEO nanoemülsiyon ile işlem görmüş; ZNE, BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu ile işlem görmüş) duyusal özellikler üzerindeki etkileri ile belirlenmiştir (Şekil 3.18 – 3.20).



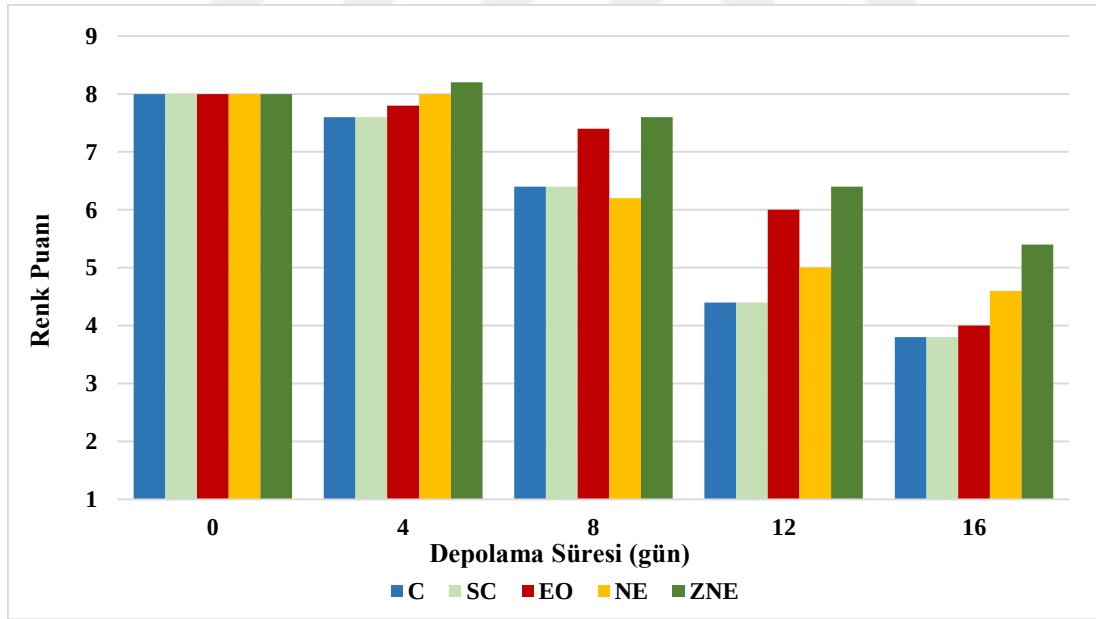
Şekil 3.18: Formülasyonların tavuk etinin lezzeti üzerindeki etkisi.

C- pozitif kontrol, SC- yenilebilir nişasta kaplama, EO- %10 karabiber esansiyel yağı, NE- %10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE- BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.



Şekil 3.19: Formülasyonların tavuk etinin dokusu üzerindeki etkisi.

C- pozitif kontrol, SC- yenilebilir nişasta kaplama, EO- %10 karabiber esansiyel yağı, NE- %10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE- BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.



Şekil 3.20: Formülasyonların tavuk etinin rengi üzerinde etkisi.

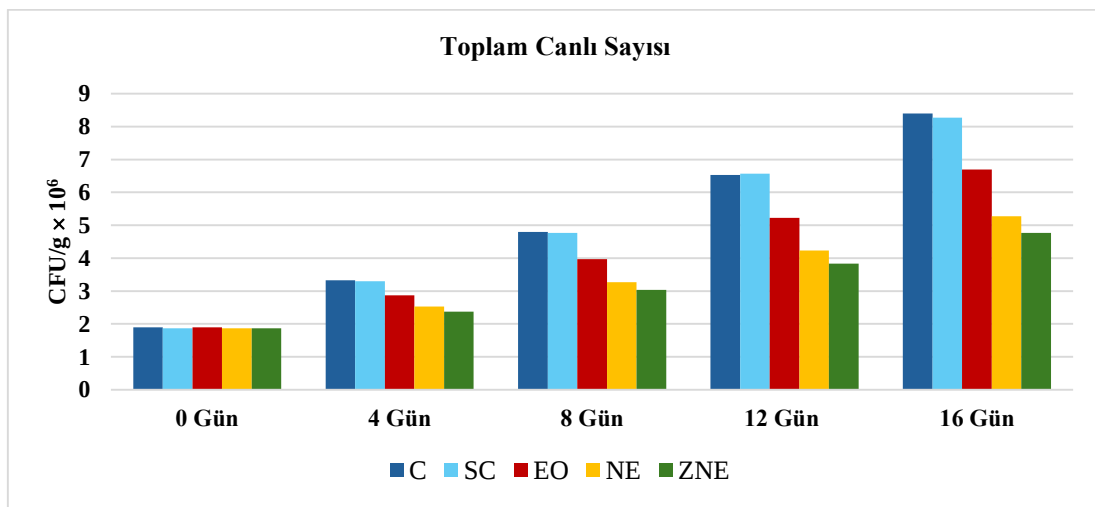
C- pozitif kontrol, SC- yenilebilir nişasta kaplama, EO- %10 karabiber esansiyel yağı, NE- %10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE- BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

3.9. Mikrobiyolojik Analiz

Mikrobiyolojik analiz için plaka sayım yöntemi kullanılarak çeşitli yararlı ve farklı bakteri gruplarının sayıları ölçüldü. Deneysel formülasyonların deneysel tasarımı aşağıdakileri içeriyordu: C, herhangi bir deneysel işlem uygulanmamış pozitif kontrol; SC, sadece yenilebilir nişasta kaplaması ile işlem görmüş; EO, %10 karabiber esansiyel yağı ile işlem görmüş; NE, %10 BPEO nanoemülsiyon ile işlem görmüş; ZNE, BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu ile işlem görmüş. Tasarlanan formülasyonlar, toplam canlı sayımı, Enterobacteriaceae, Salmonella spp., laktik asit bakterileri, küf ve maya ile psikrotrofik bakteri sayımı açısından önemli sonuçlar verdi.

3.9.1. Toplam Canlı Sayısı (TVC)

TVC, 16 günlük soğutmalı depolama süresi boyunca düzenli aralıklarla analiz edilmiştir (Şekil 3.21; Çizelge 3.10). Test edilen tüm deneysel gruplarda bakteri sayısında artış gözlemlenmiştir. BPEONE formülasyonu ve BPEONE + ZnO NP'lerin kombine formülasyonu, pozitif kontrol ve yenilebilir nişasta kaplama grubuna kıyasla istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar göstermiştir. 16. günde, en düşük TVC ZNE ($4,77 \times 10^6$ CFU/g) ve NE ($5,27 \times 10^6$ CFU/g) gruplarında bulundu ve bu değerler C ve SC gruplarından (sırasıyla $8,40 \times 10^6$ ve $8,27 \times 10^6$ CFU/g) önemli ölçüde daha düşüktü.



Şekil 3.21: Formülasyonların toplam canlı sayı üzerindeki etkisi.

C- pozitif kontrol, SC- yenilebilir nişasta kaplama, EO- %10 karabiber esansiyel yağı, NE- %10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE- BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

Çizelge 3.10: Formülasyonların 16 günlük saklama süresi boyunca toplam canlı sayısına etkisi.

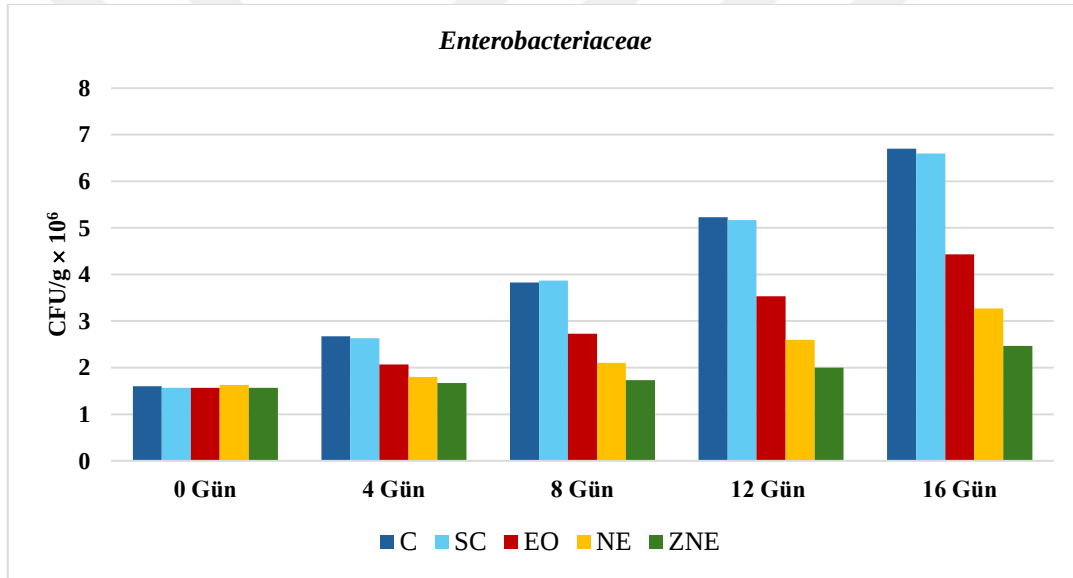
Grup	0. Gün (CFU/g× 10⁶)	4 Gün (CFU/g× 10⁶)	8 Gün (CFU/g× 10⁶)	12 Gün (CFU/g× 10⁶)	16 Gün (CFU/g× 10⁶)
C	1,90	3,33	4,80 ^b	6.53 ^c	8.40 ^c
SC	1,87	3,30	4,77 ^b	6,57 ^c	8,27 ^c
EO	1,90	2,87	3,97 ^{ab}	5,23 ^{bc}	6,70 ^b
NE	1,87	2,53	3,27 ^{ab}	4,23 ^{ab}	5,27 ^a
ZNE	1,87	2,37	3,03 ^a	3,83 ^a	4,77 ^a
SEM	0,06	0,15	0,23	0,32	0,41
p-değeri	1,000	0,135	0,009	0,000	0,000

Grupların açıklaması: C- pozitif kontrol, SC- yenilebilir nişasta kaplama, EO- %10 karabiber esansiyel yağı, NE- %10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE- BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

SEM: Standart hata ortalaması

3.9.2. *Enterobacteriaceae* Analizi

Enterobacteriaceae analizi, düzenli değerlendirme aralıklarıyla 16 günlük soğuk hava deposunda saklama süresi boyunca gerçekleştirildi (Şekil 3.22, Çizelge 3.11). Test edilen tüm deneysel gruplarda bakteri sayısında artış gözlemlendi. BPEONE formülasyonu ve BPEONE + ZnO NP'lerin kombine formülasyonu, pozitif kontrol ve yenilebilir nişasta kaplama grubuna kıyasla istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar gösterdi. ZNE deneysel grubu, 16. günde en düşük *Enterobacteriaceae* sayısına ($2,47 \times 10^6$ CFU/g) sahipti ve bu fark, kontrol grubu ($6,70 \times 10^6$ CFU/g) ile karşılaştırıldığında istatistiksel olarak anlamlıydı.



Şekil 3.22: Formülasyonların *Enterobacteriaceae* üzerindeki etkisi.

C- pozitif kontrol, SC- yenilebilir nişasta kaplama, EO- %10 karabiber esansiyel yağı, NE- %10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE- BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

Çizelge 3.11: 16 günlük saklama süresi boyunca *Enterobacteriaceae* üzerinde formülasyonların etkisi.

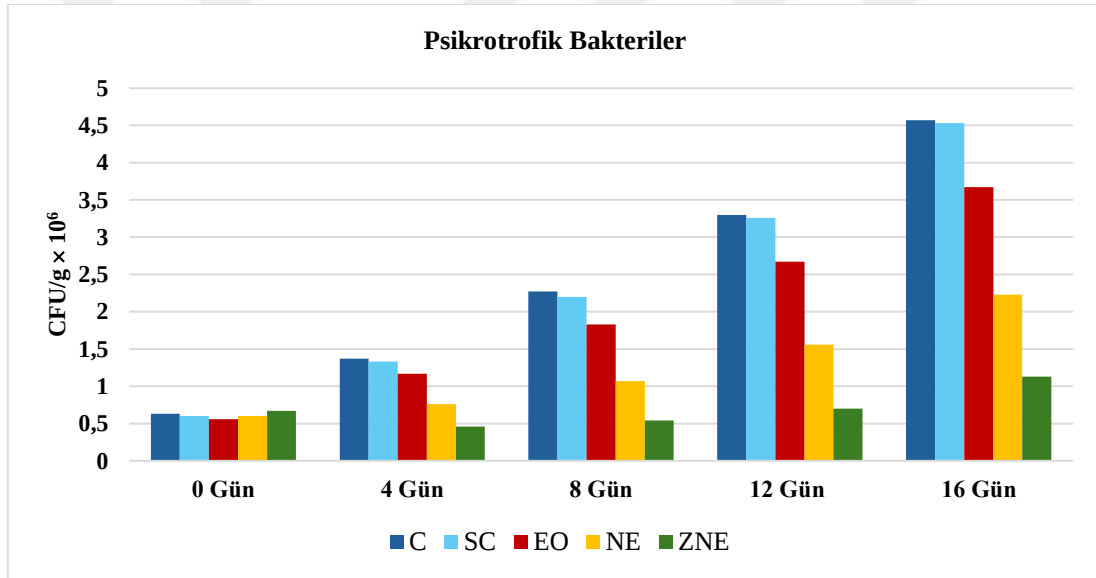
Grup	4 Gün (CFU/g×10 ⁶)	8 Gün (CFU/g×10 ⁶)	12 Gün (CFU/g×10 ⁶)	16 Gün (CFU/g×10 ⁶)
C	2,67 ^b	3,83 ^b	5,23 ^c	6,70 ^c
SC	2,63 ^{ab}	3,87 ^b	5,17 ^c	6,60 ^c
EO	2,07 ^{ab}	2,73 ^{ab}	3,53 ^b	4,43 ^b
NE	1,80 ^{ab}	2,10 ^a	2,60 ^{ab}	3,27 ^{ab}
ZNE	1,67 ^a	1,73 ^a	2,00 ^a	2,47 ^a
SEM	0,13	0,27	0,36	0,47
p-değeri	0,021	0,005	0,000	0,000

Grupların açıklaması: C- pozitif kontrol, SC- yenilebilir nişasta kaplama, EO- %10 karabiber esansiyel yağı, NE- %10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE- BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

SEM: Standart hata ortalaması

3.9.3. Psikrotrofik Bakteriyel Analiz

Psikrotrofik bakteri analizi, 16 günlük soğuk hava deposunda saklama süresi boyunca düzenli analiz aralıklarıyla gerçekleştirildi (Şekil 3.24, Çizelge 3.13). Test edilen tüm deneysel gruplarda bakteri sayısında artış gözlemlendi. BPEONE formülasyonu ve BPEONE + ZnO NP'lerin kombine formülasyonu, pozitif kontrol ve yenilebilir nişasta kaplama grubuna kıyasla istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar gösterdi. ZNE grubu ($1,13 \times 10^6$ CFU/g) ve NE grubu ($2,23 \times 10^6$ CFU/g), kontrol ve SC gruplarına kıyasla (sırasıyla $4,57 \times 10^6$ ve $4,53 \times 10^6$ CFU/g) 16. günde istatistiksel olarak en düşük psikrotrofik bakteri sayılarına sahipti.



Şekil 3.23: Formülasyonların psikrotrofik bakteriler üzerindeki etkisi.

C- pozitif kontrol, SC- yenilebilir nişasta kaplama, EO- %10 karabiber esansiyel yağı, NE- %10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE- BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

Çizelge 3.12: Formülasyonların 16 günlük depolama süresince psikrotrofik bakteriler üzerindeki etkisi.

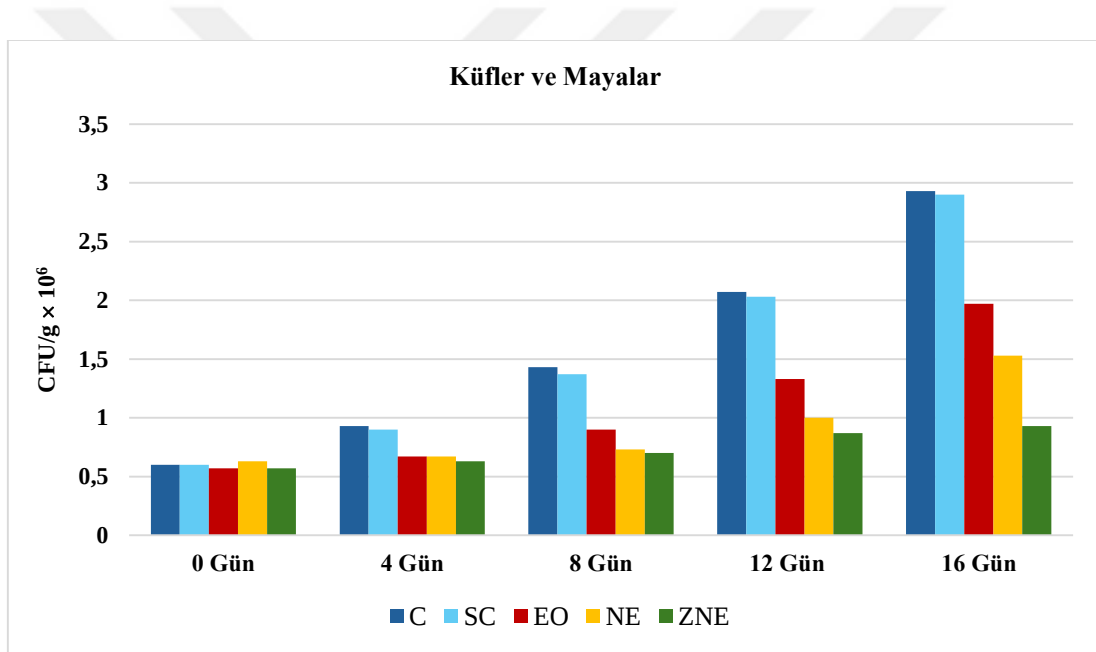
Grup	0. Gün (CFU/g×10 ⁶)	4 Gün (CFU/g×10 ⁶)	8 Gün (CFU/g×10 ⁶)	12 Gün (CFU/g×10 ⁶)	16 Gün (CFU/g×10 ⁶)
C	0,63	1,37	2,27	3,30 ^c	4,57 ^c
SC	0,60	1,33	2,20	3,26 ^c	4,53 ^c
EO	0,56	1,17	1,83	2,67 ^{bc}	3,67 ^{bc}
NE	0,60	0,76	1,07	1,56 ^{ab}	2,23 ^{ab}
ZNE	0,67	0,46	0,54	0,70 ^a	1.13 ^a
SEM	0,05	0,09	0,20	0,27	0,37
p-değeri	0,997	0,057	0,042	0,001	0,000

Grupların açıklaması: C- pozitif kontrol, SC- yenilebilir nişasta kaplama, EO- %10 karabiber esansiyel yağı, NE- %10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE- BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

SEM: Standart hata ortalaması

3.9.4. K f ve Maya

Küf ve maya analizi, 16 günlük soğuk hava deposunda saklama süresi boyunca düzenli analiz aralıklarıyla gerçekleştirilmiştir (şekil 3.24,  izelge 3.13). Test edilen tüm deneysel gruplarda mikrobiyal sayıda artış gözlemlenmiştir. BPEONE formülasyonu ve BPEONE + ZnO NP'lerin kombine formülasyonu, pozitif kontrol ve yenilebilir nişasta kaplama grubuna kıyasla istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar göstermiştir. En düşük k f ve maya sayıları ($0,93 \times 10^6$ CFU/g) 16. günde ZNE formülasyonunda kaydedildi ve bu, kontrol ve SC gruplarından (sırasıyla $2,93 \times 10^6$ ve $2,90 \times 10^6$ CFU/g) istatistiksel olarak daha düşüktü.



şekil 3.24: Formülasyonların k f ve mayalar üzerindeki etkisi.

C- pozitif kontrol, SC- yenilebilir nişasta kaplama, EO- %10 karabiber esansiyel yağı, NE- %10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE- BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

Çizelge 3.13: 16 günlük depolama süresince formülasyonların küf ve mayalar üzerindeki etkisi.

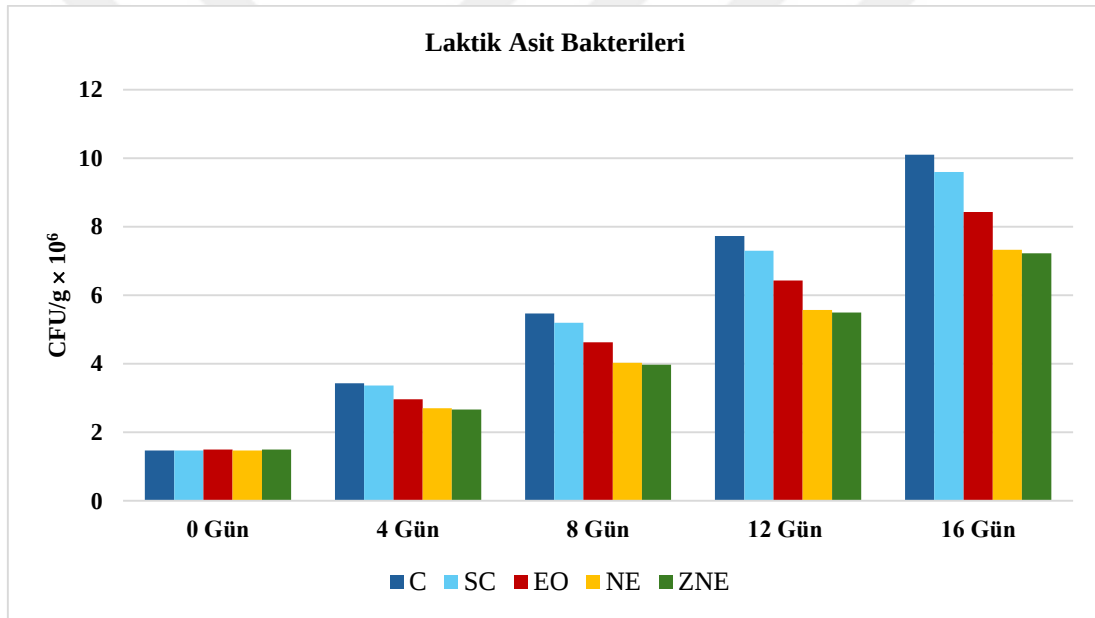
Grup	0. Gün (CFU/g×10 ⁶)	4. Gün (CFU/g×10 ⁶)	8. Gün (CFU/g×10 ⁶)	12. Gün (CFU/g×10 ⁶)	16. Gün (CFU/g×10 ⁶)
C	0,60	0,93	1,43	2,07 ^b	2,93 ^b
SC	0,60	0,90	1,37	2,03 ^b	2,90 ^b
EO	0,57	0,67	0,90	1,33 ^{ab}	1,97 ^{ab}
NE	0,63	0,60	0,73	1,00 ^{ab}	1,53 ^a
ZNE	0,57	0,63	0,70	0,87 ^a	0,93 ^a
SEM	0,04	0,05	0,12	0,16	0,22
p-değeri	0,994	0,214	0,161	0,011	0,001

Grupların açıklaması: C- pozitif kontrol, SC- yenilebilir nişasta kaplama, EO- %10 karabiber esansiyel yağı, NE- %10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE- BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

SEM: Standart hata ortalaması

3.9.5. Laktik Asit Bakterileri (LAB)

LAB analizi, düzenli değerlendirme aralıklarıyla 16 günlük soğuk hava deposunda saklama süresi boyunca gerçekleştirildi (Şekil 3.25, Çizelge 3.14). Test edilen tüm deneysel gruplarda bakteri sayısında artış gözlemlenmiştir. BPEONE formülasyonu ve BPEONE + ZnO NP'lerin kombinasyonu, pozitif kontrol ve yenilebilir nişasta kaplama grubuna kıyasla istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar vermiştir. 12. günde ZNE ($5,50 \times 10^6$ CFU/g) ve NE gruplarında ($5,57 \times 10^6$ CFU/g) en düşük LAB sayıları gözlemlenmiş ve bu değerler kontrol (C) ve SC gruplarından (sırasıyla $7,30$ ve $7,73 \times 10^6$ CFU/g) önemli ölçüde düşüktü.



Şekil 3.25: Formülasyonların laktik asit bakterileri üzerindeki etkisi.

C- pozitif kontrol, SC- yenilebilir nişasta kaplama, EO- %10 karabiber esansiyel yağı, NE- %10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE- BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

Çizelge 3.14: Formülasyonların 16 günlük depolama süresince laktik asit bakterileri üzerindeki etkisi.

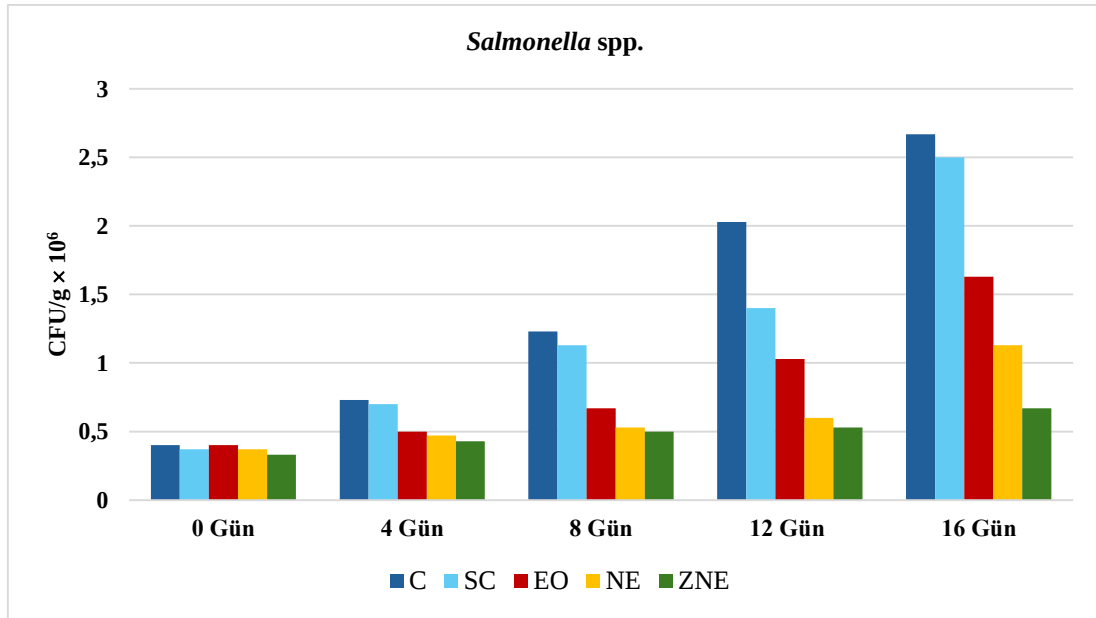
Grup	0. Gün (CFU/g×10 ⁶)	4 Gün (CFU/g×10 ⁶)	8 Gün (CFU/g×10 ⁶)	12 Gün (CFU/g×10 ⁶)	16 Gün (CFU/g×10 ⁶)
C	1,47	3,37	5,20 ^{ab}	7,30 ^b	9,60
SC	1,47	3,43	5,47 ^a	7,73 ^b	10,1
EO	1,50	2,97	4,63 ^{ab}	6,43 ^{ab}	8,43
NE	1,47	2,70	4,03 ^b	5,57 ^a	7,33
ZNE	1,50	2,67	3,97 ^b	5,50 ^a	7,23
SEM	0,10	0,14	0,19	0,27	0,76
p-değeri	1,000	0,337	0,012	0,002	0,295

Grupların açıklaması: C- pozitif kontrol, SC- yenilebilir nişasta kaplama, EO- %10 karabiber esansiyel yağı, NE- %10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE- BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

SEM: Standart hata ortalaması

3.9.6. *Salmonella* spp.

Salmonella spp. analizi, 16 günlük soğutmalı depolama süresi boyunca düzenli aralıklarla gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.26, Çizelge 3.15). Test edilen tüm deneysel gruplarda bakteri sayısında artış gözlemlenmiştir. BPEONE formülasyonu ve BPEONE + ZnO NP'lerin kombinasyonu, pozitif kontrol ve yenilebilir nişasta kaplama grubuna kıyasla istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar vermiştir. En düşük *Salmonella* spp. sayısı, ZNE deneysel grubunda ($0,67 \times 10^6$ CFU/g) gözlemlenmiştir ve bu değer, kontrol ($2,67 \times 10^6$ CFU/g) ve SC gruplarına ($2,50 \times 10^6$ CFU/g) kıyasla 16. analiz gününde önemli ölçüde daha düşüktür.



Şekil 3.26: Formülasyonların *Salmonella* spp. üzerindeki etkisi.

C- pozitif kontrol, SC- yenilebilir nişasta kaplama, EO- %10 karabiber esansiyel yağı, NE- %10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE- BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

Çizelge 3.15: Formülasyonların 16 günlük depolama süresince *Salmonella* spp. üzerindeki etkisi.

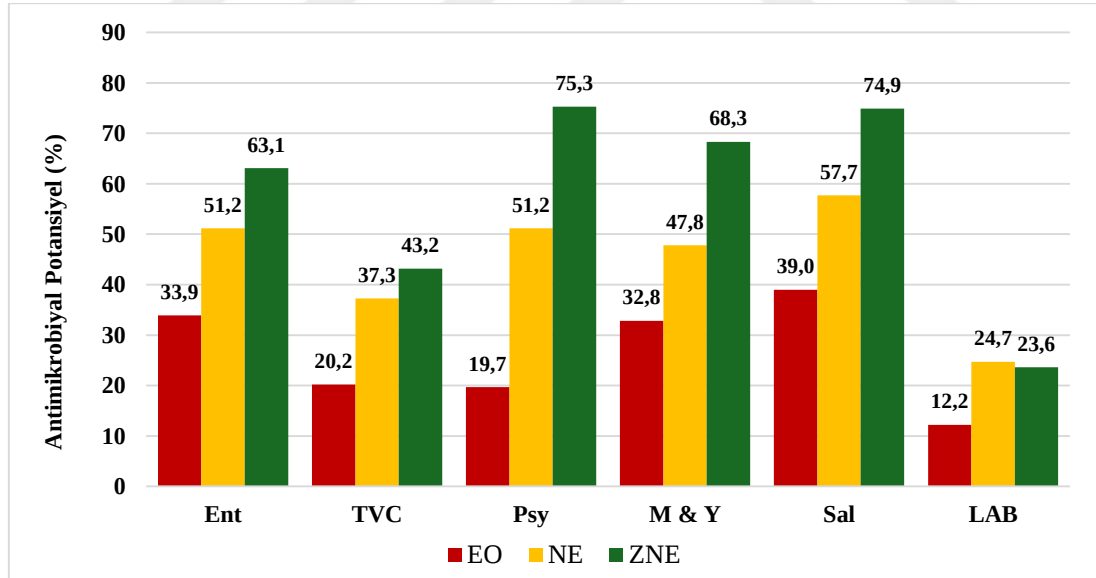
Grup	0. Gün (CFU/g×10 ⁶)	4 Gün (CFU/g×10 ⁶)	8 Gün (CFU/g×10 ⁶)	12 Gün (CFU/g×10 ⁶)	16 Gün (CFU/g×10 ⁶)
C	0,40	0,73	1,23	2,03	2,67 ^b
SC	0,37	0,70	1,13	1,40	2,50 ^b
EO	0,40	0,50	0,67	1,03	1,63 ^{ab}
NE	0,37	0,47	0,53	0,60	1,13 ^a
ZNE	0,33	0,43	0,50	0,53	0,67 ^a
SEM	0,05	0,04	0,10	0,20	0,22
p-değeri	0,997	0,077	0,02	0,106	0,000

Grupların açıklaması: C- pozitif kontrol, SC- yenilebilir nişasta kaplama, EO- %10 karabiber esansiyel yağı, NE- %10 BPEO nanoemülsiyon ve ZNE- BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

SEM: Standart hata ortalaması.

3.9.7. Antimikrobiyal Potansiyel

Antimmikrobiyal potansiyel (%), nano formülasyon gruplarından elde edilen mikrobiyal sayım sonuçlarının, kontrol gruplarından elde edilenlerle karşılaştırılmasıyla belirlenmiştir.



Şekil 3.27: Tüm formülasyonların karşılaştırmalı antimmikrobiyal potansiyel (%).

EO, %10 karabiber esansiyel yağı; NE, %10 BPEO nanoemülsiyon; ZNE, BPEO nanoemülsiyon ve ZnO NP'lerin kombinasyonu.

Mikrobiyal açıklamalar: Ent- *Enterobacteriaceae*, TVC- Toplam canlı sayı, Psy- Psikrotrofik bakteriler, M & Y- küf ve mayalar, Sal- *Salmonella* spp. ve LAB- laktik asit bakterileri.

4. TARTIŞMA

4.1. GC-MS ile Uçucu Bileşenlerin Analizi

Karabiber esansiyel yağının kimyasal bileşimi, biyoaktif bileşiklerin bolluğunu ortaya koyan GC-MS analizi kullanılarak değerlendirilmiştir (Çizelge 3.1). Biyoaktif bileşiklerin konsantrasyonlarındaki değişiklikler, genotip, coğrafi farklılıklar, yetiştirme uygulamaları, ekolojik değişiklikler ve toprak bileşimi gibi birkaç temel faktöre bağlı olabilir. Yağın bileşimindeki değişiklikler de BPEO'nun organoleptik özelliklerini etkileyebilir. En bol bulunan bileşikler 3-karene (%20,98), D-Limonen (%19,86), karyofilen (%16,65), β -pinen (%8,79) ve α -pinen (%7,35) idi, bunları kamfen (%0,27), sabinene (%1,92), α -phellandrene (%2,93), β -phellandrene (%1,26), β -myrcene (%2,01), β -cymene (%2,02), linalool (%0,39), δ -elemen (%1,53), β -elemen (%1,16), β -kubeben (%0,97), kopan (%1,24), karyofilen (%16,65), naftalen (%0,86), sikloheksan (%1,44), humulen (%1,16), spathulenol (%0,59), terpinolen (%0,46), β -eudesmen (%0,30), karyofilen oksit (%4,34) ve δ -kadinen (%0,61).

Sonuçlar, BPEO'nun bazıları eser miktarda bulunan önemli biyoaktif bileşiklerin bir karışımı olduğunu ortaya koymuştur. BPEO'nun GC-MS analizi, en yüksek kütle fraksiyonuna sahip ana bileşiğin 3-karene olduğunu ortaya koymuştur. 3-karene, birçok bitkide doğal olarak bulunan bir monoterpenedir. Uçucu yağlar, önemli antimikrobiyal potansiyele sahip 3-karene bileşiği bakımından zengindir. Çalışmalar, 3-karenin hücrel aktiviteleri engelleyerek, hücre duvarlarını ve zarlarını bozarak, metabolik bozukluklara neden olarak, DNA hasarına yol açarak ve hatta hücre lizisine yol açarak gıda kaynaklı patojenlere karşı etkili antimikrobiyal aktiviteye sahip olduğunu ortaya koymuştur (Shu vd., 2019). 3-karene, hücre duvarı oluşumu ile bağlantılı MurA (UDP-N-asetilglukozamin enolpiruvil transferaz), OmpW (dış membran proteini W) ve enerji üretimi ve metabolik fonksiyonlarla ilişkili AtpD (ATP sentaz alt birimi beta) gibi bazı hayati proteinlerin işlevini bozabilir (Tang vd., 2021).

D-limonen (monoterpen), BPEO'da bulunan ikinci önemli bileşiktir. Yüksek kütle fraksiyonları (yaklaşık %9 – 37 arasında değişen) doğal olarak BPEO'da bulunur. Bu

bileşik, potansiyel antimikrobiyal, antioksidan ve kemopreventif aktivitelere katkıda bulunur (Manafı vd., 2025; Al-Sayed vd., 2021; Espina vd., 2013; Kuttan vd., 2011; Uedo vd., 1999). Karyofilen (seskiterpen), doğal bitkilerden, özellikle karabiber gibi baharatlardan elde edilen çeşitli uçucu yağların ana bileşenlerinden biridir (Francomano vd., 2019) ve gıda ve etin korunmasına önemli ölçüde katkıda bulunabilecek olağanüstü antioksidan ve antimikrobiyal özelliklere sahiptir.

Karyofilen gibi uçucu yağ bileşenlerinin lipofilik yapısı, geçirgenliği artırarak ve hücre yapısını bozarak bakteriyel hücre zarlarının lipit çift katmanlarına nüfuz etmelerini sağlar, bu da hücre içeriğinin sızmasına ve nihayetinde hücre ölümüne yol açar. Bazı araştırmalar, BPEO'nun et ürünlerinde mikrobiyal büyümeyi etkili bir şekilde inhibe edebildiğini ve lipit oksidasyonunu geciktirebildiğini bildirmiştir (Zhang vd., 2017a; Zhang vd., 2016).

Bisiklik terpenler olan pinenlerin, alfa ve beta-pinen olmak üzere iki tür yapısal izomerden oluşan BPEO'da büyük bir kütle fraksiyonuna sahip olduğu bulunmuştur. Bu bileşikler, uçucu yağlardaki başlıca uçucu bileşikler arasındadır ve uçucu yağlara aroma kattıkları iyi bilinmektedir. Antimikrobiyal (Zengin ve Baysal, 2014), antienflamatuar (Kim vd., 2015) ve nöroprotektif potansiyel (Khoshnazar vd., 2020) dahil olmak üzere çok çeşitli yararlı ve terapötik özelliklere sahip oldukları bulunmuştur. Bir araştırmada, pinenin pozitif enantiyomerlerinin metisiline dirençli *Staphylococcus aureus* (MRSA), *Cryptococcus neoformans*, *Candida albicans* ve *Rhizopus oryzae*'ye karşı etkili bir antimikrobiyal etkiye sahip olduğu bildirilmiştir (da Silva Rivas vd., 2012).

4.2. BPEO Nanoemülsiyon Üretimi

Emülsifikasyon fazı tersine çevirme stratejisi kullanılarak BPEO nanoemülsiyonlarının başarılı bir şekilde üretilmesi, düşük enerjili sentez yöntemlerinin kararlı, homojen yağ-su emülsiyonları oluşturmada daha etkili olduğunu doğruladı (Gupta vd., 2017). Düşük enerjili yöntemler, yüksek basınçlı homojenizasyon veya sonikasyon gibi yüksek enerjili yöntemlere kıyasla nanoemülsiyonların üretiminde daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun nedeni, bu yöntemlerin malzeme üzerindeki stresi minimum düzeyde tutması, sentez için daha az enerji gerektirmesi ve karmaşık ve maliyetli ekipmanların kullanımını

en aza indirmesidir (Komaiko vd., 2016). Nanoemülsiyon sentezinde yüksek BPEO konsantrasyonuna (%20) rağmen gözlemlenen nanoformülasyonların homojenliği ve kinetik stabilitesi, yüzey aktif madde-yağ oranına (SOR=2) bağlıdır. Kararlılık, çoğunlukla Tween-80 gibi noniyonik yüzey aktif maddelere bağlıdır, çünkü bunların amfifilik yapısı, yağ ve su molekülleri arasındaki arayüzey kohezyonunu hızla azaltarak, damlacık birleşmesi ve Ostwald olgunlaşması dahil olmak üzere destabilizasyon mekanizmalarına karşı iyi gelişmiş bir koruma stratejisi oluşturur (Luz vd., 2023).

4.3. BPEO Nanoemülsiyon Karakterizasyonu

Karakterizasyon sonuçları, başarıyla hazırlanan BPEO nanoemülsiyonlarının kinetik olarak stabil olduğunu, tüm donmamış formülasyonların damlacık çapının kabul edilebilir 20-200 nm (64,23 ila 177,9 nm) aralığında olduğunu ve düşük polidispersite indeksine ($PDI < 0,3$) sahip olduğunu göstermiştir. Bu küçük ortalama damlacık çapı, Stokes Yasası'nda açıklandığı gibi yerçekimi ayrışmasını (sedimentasyon veya krema oluşumu) azaltarak ve aktif bileşenlerin yüzey alanını genişleterek geleneksel mikroemülsiyonlara göre yüksek kinetik avantaj sağladığı için önemlidir (Xu vd., 2024a). 10% EO nanoemülsiyonda ölçülen 64,23 nm'lik en düşük damlacık boyutu, Marchese vd. (2020) tarafından elde edilen sonuçlarla yakından örtüşmektedir. Bu araştırmacılar, 100 nm'den küçük parçacıkların yüksek hücrel penetrasyon ve şeffaflık elde etmede önemli bir rol oynadığını bildirmiştir.

Sonuçlar, damlacık boyutu ile BPEO konsantrasyonu arasında açık bir korelasyon olduğunu ortaya koymuştur (Nie vd., 2023). En düşük BPEO konsantrasyonu (%10) küçük damlacık boyutu (64,23 nm) ile sonuçlanmış ve böylece biyoyararlanım için en yüksek potansiyeli sağlamıştır. Öte yandan, BPEO konsantrasyonunun %15'ten %20'ye oransal artışı, ortalama çapın (177,9 nm) buna paralel olarak artmasına neden olmuştur. Bu gözlem, Hauzin vd. (2024) tarafından diğer yağ-su sistemlerinde belgelenen fenomenle tutarlıdır ve sistemin sabit SOR'da daha yüksek yağ konsantrasyonlarını tutmak için daha büyük boyutlu damlacıklar geliştirmek zorunda olduğunu göstermektedir. Boyutlar değişmekle birlikte, tüm konsantrasyonlarda olağanüstü düşük PDI değerleri (0,105-0,261), Hien vd. (2022) tarafından stabil bir BPEO formülasyonu

için elde edilen bulgularla benzerdir ve tüm yağ konsantrasyonlarında dar ve monodispers boyut dağılımı ve homojen, yüksek kaliteli hazırlık olduğunu doğrulamaktadır.

Ayrıca, zeta potansiyel analizi, sistemin elektrostatik bir mekanizma ile stabilize edildiğini göstermiştir. Donmamış %20 BPEONE, -34,7 mV'lık mutlak bir ZP değeri sergilemiştir ve bu değer, yüksek stabiliteli kolloidal sistemleri sağlamak için tipik olarak gerekli olan yaklaşık ± 30 mV'lık kritik stabilite eşiğinden önemli ölçüde yüksektir (Marchese vd., 2020). Bu sağlam ölçüm, Xu vd. (2024a) tarafından bildirilen vanilya nanoemülsiyon sisteminin -29,2 mV stabilitesini de aştı ve %20 BPEONE formülasyonunda flokülasyona karşı önemli ölçüde daha iyi bir elektrostatik bariyer olduğunu ortaya koydu. Donma-çözülme döngüsü, bu stabilizasyonun kararlılığını doğruladı; dondurulmuş %15 ve %20 BPEONE'lerin ZP değerleri çok düşüktü (sırasıyla -38,3 ve -44,8 -mV). Bu, sıcaklık değişimine rağmen kararlılığı korudu ve daha yüksek yağ konsantrasyonlarında bile termal olarak indüklenen destabilizasyona karşı etkili direnç ve kararlılık sergiledi (Ouyang Wuqing, 2011).

Verimli nano-emülsifikasyon, emülsifiye edilmemiş uçucu yağlara kıyasla uçucu yağların biyolojik işlevini güçlendirmeye yardımcı olduğu için hayati önem taşır. Emülsifiye edilmemiş uçucu yağlar, yüksek uçuculuk ve düşük suda çözünürlük gibi çeşitli sınırlamalara sahiptir ve bu da sulu uygulamalarda etkinliklerini ciddi şekilde kısıtlamaktadır (Ribes vd., 2017). Buna kıyasla, uçucu yağların nano-emülsifikasyonu, kontrollü salım sağlayarak ve antioksidan ve antimikrobiyal aktiviteler gibi biyolojik özellikleri iyileştirerek bu sınırlamaları aşar. BPEO nanoemülsiyonu, serbest uçucu yağa kıyasla *E. coli* ve *Salmonella enterica* dahil olmak üzere tipik gıda kaynaklı patojenlere karşı önemli ölçüde daha yüksek antimikrobiyal aktivite sergilemiştir (Hien vd., 2022). Daha iyi emilim, daha küçük damlacık boyutuna atfedilir; bu, biyoaktif bileşenlerin mikroorganizmaya ulaştırılmasının ardından bakteri hücre duvarlarıyla birleşmeyi kolaylaştırarak daha etkili bakteriyostatik ve bakterisidal etkiler sağlar (Marchese vd., 2020; Hien vd., 2022). Bu nedenle, mevcut çalışmanın sonuçları, bu kararlı, düşük PDI BPEO nanoemülsiyonlarının, geleneksel BPEO kullanımına kıyasla, doğal koruyucu veya hedefe yönelik bir dağıtım sistemi olarak ilaç ve gıda endüstrilerinde kullanım için çekici ve ölçeklenebilir bir platform sunduğunu göstermektedir.

BPEO konsantrasyonundaki artış (10-20%) ile Z-ortalama damlacık boyutunun artışı ve bulanıklığın artışı arasındaki doğrudan bağlantı, kolloidal sistemlerin temel ışık saçılma teorisi ile uyumludur. Bulanıklık (τ) ışık zayıflama ölçümü temel olarak konsantrasyon ve dağılmış damlacıkların boyut dağılımı ile ilgilidir ($\tau \propto \text{konsantrasyon} \times \text{boyut}$) (McClements, 2002; Alade vd., 2021). Bu çalışmada, %10 BPEO nanoemülsiyon en düşük bulanıklığı ($4,44 \pm 0,44 \text{ cm}^{-1}$) sergilemiş ve yüksek kinetik stabilitesini doğrulamıştır. Bu, küçük, düzgün dağılımlı damlacıklar (190,4 nm) aracılığıyla minimum ışık saçılmasıyla sağlanmıştır.

Bu optimal konsantrasyon, literatüre kıyasla önemli bir bulgudur ve kritik emülgatör konsantrasyonu aşıldığında, genellikle yüksek yağ konsantrasyonları nedeniyle, nanoemülsiyonların kinetik stabilitesinin hızla bozulabileceğini göstermektedir (Pavoni vd., 2020; Hassanzadeh vd., 2022). %20 BPEO'da $6,86 \pm 0,54 \text{ cm}^{-1}$ 'e kadar bulanıklığın önemli ölçüde artması ve çapın hafifçe artması, bu daha yüksek uçucu yağ konsantrasyonunda mevcut emülgatör kaplamasının yetersiz olduğunun güçlü göstergeleridir. Bu eksik kaplama, genellikle damlacık birleşmesi veya bazen Ostwald olgunlaşması (OR) gibi destabilizasyon süreçleri riskini artırır ve bu da partikül boyutunun doğrudan büyümesine ve ardından bulanıklığın artmasına neden olur (Hassanzadeh vd., 2022; Petralito vd., 2024). OR, nanoemülsiyonların birincil kinetik kararsızlık süreçlerinden biri olarak bilinir ve (soya fasulyesi yağı gibi sabit yağların aksine) birkaç uçucu yağ bileşeninin suda nispeten yüksek çözünürlüğü tarafından tetiklenir, bu da daha küçük yağ damlacıklarının sürekli sulu ortama yayılmasına neden olur, damlacık birikimine yol açar ve ortalama parçacık boyutu ve polidispersite indeksinde kademeli bir artışa neden olur. Bu nedenle, başlangıçtaki damlacık boyutu küçük olsa bile, uzun vadeli stabilite üzerinde zararlı bir etkiye sahip olabilir.

Bazı araştırmacılar, OR'yi azaltmak için önemsiz bir suda çözünürlüğe sahip yardımcı yağ olgunlaşma inhibitörleri (orta zincirli trigliseritler gibi) kullanmıştır (Petralito vd., 2024). EO bileşenlerinin difüzyon hızı, BPEO ile düşük konsantrasyonda bile olsa bu tür bir inhibitör eklenerek yavaşlatılabilir. Böylece, nanoemülsiyonun nihai işlevselliğini ciddi şekilde etkilemeden uzun vadeli kolloidal stabilite iyileştirilebilir. Genel olarak,

doğru optik hassasiyet için 80 nm'den (Flekka vd., 2024; Donsi vd., 2011) daha küçük bir parçacık boyutu gerekir. 190,4 nm'de ($4,44 \pm 0,44 \text{ cm}^{-1}$) belirlenen %10 BPEONE'nin düşük bulanıklığı, başarılı kinetik stabilizasyonu göstermiştir. Bu etkili stabilizasyon, daha az veya kararsız makroemülsiyonlarla bağlantılı τ 'deki hızlı ve önemli artışı geciktirmiştir. Nano-metrik partikül boyutu ($<200 \text{ nm}$) yüzey alanını önemli ölçüde artırır. Bu artan yüzey alanı, BPEO'daki biyoaktif bileşenlerin daha etkili ve hızlı bir şekilde emilimini sağlar (örneğin, cilt veya gastrointestinal sistem yoluyla verimli teslimatı kolaylaştırarak) (Pavoni, 2020; Dizaj vd., 2016).

Kekik, kurkumin ve karabiber gibi uçucu yağ bazlı nanoemülsiyonlar, pür yağlar veya geleneksel emülsiyonlara kıyasla, birçok gıda kaynaklı patojene karşı önemli antimikrobiyal potansiyel göstermiştir (Ahmed vd., 2012). Küçük boyutlu yağ damlacıkları, bakteri zarlarıyla daha verimli bir şekilde etkileşime girme, geçirgenliklerini artırma ve nihayetinde hücre ölümüne neden olma (ilaç ve gıda koruma uygulamalarının temel bir özelliği) yeteneğine sahiptir (Hassanzadeh vd., 2022; McClements, 2013). Bu bulgu, %10 BPEO formülasyonunu yüksek kinetik stabilite (düşük τ) ve iyi fonksiyonel etkinlik ile karakterize edilen stabil ve etkili bir taşıyıcı sistem haline getirmektedir.

Başlangıçta, %10, %15 ve %20 (w/w) BPEO nanoemülsiyon içeren tüm formülasyonlar, iyi geliştirilmiş nanoemülsiyonların karakteristik özelliği olan tek modlu damlacık boyutu dağılımları sergilemiştir (Peng vd., 2019). Ancak, BPEO konsantrasyonunun %10'dan %20'ye (w/w) artmasıyla ortalama çapta hafif bir değişiklik meydana gelmiştir. Geçirimli elektron mikroskobu görüntüleri, nanometrik aralıkta (120,0-178,0 nm) küresel şekilli damlacıklar ortaya çıkarmış ve biyolojik aktiviteler için başarılı nanoemülsiyon üretiminin geçerliliğini doğrulamıştır (Bouchemal vd., 2004). TEM ile elde edilen sonuçlar, tekil damlacıkların görselleştirilmesi, boyut doğrulaması, dağılım onayı ve agrega etkisinin olasılığının azalması nedeniyle, genellikle DLS bulguları ile elde edilen sonuçlardan daha verimli kabul edilir (Filippov vd., 2023).

Farklı BPEO konsantrasyonları (ağırlıkça %10-20) arasında damlacık çapında minimum varyasyon gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, yüzey aktif madde sistemi ve düşük enerjili emülsifikasyon protokolünün verimli ve optimize olduğunu ve arayüzey doygunluğunu

koruduğunu ortaya koyan bir stabilite profili göstermiştir. Bu bulgular, damlacık çapının yağ fazı fraksiyonu ile arttığını gösteren bazı çalışmalarla çelişmektedir. Bu çalışmalarda, stabilizatörün yetersiz erişilebilirliği, birleşmeyi veya Ostwald olgunlaşmasını kolaylaştırdığı öne sürülmektedir (Shaikh Arbaz, 2024). DLS ve TEM sonuçları arasındaki tutarlılık, hazırlanan BPEO nanoemülsiyonlarının yüksek kinetik stabilitesini ve minimum agregat oluşumunu göstermiştir (Grapentin vd., 2015; Klang vd., 2012).

4.4. Enkapsülasyon Etkinliğinin

BPEONE'nin enkapsülasyon verimliliği (%88), gıda matrislerinde uçucu yağ bileşenlerinin etkili koruyucu etkisinin ön koşulu olarak Kabul edilen verimli bir kapsülleme düzeyini göstermiştir. Yüksek kapsülleme verimliliği ve etkili kinetik stabilite, biyolojik koruma fenomenini destekleyen önemli faktörlerdi. Sonuçlar, Moadab vd. (2025) ile Zixiang vd. (2021) tarafından yapılan çalışmalarla uyumlu bulunmuştur. Bu çalışmalar, *Eryngium campestre* ve karanfil esansiyel yağı nanoemülsiyonunun önemli ölçüde kapsüllenmesinin, soğutulmuş et ürünlerinin daha yüksek oksidatif stabilitesi ve mikrobiyal inhibisyonu ile doğru orantılı olduğunu bildirmişlerdir. Ek olarak, tipik uzun vadeli stabilite profili, Agnish vd. (2022) ile Maurya vd. (2021) tarafından bildirildiği üzere, pür uçucu yağların yüksek uçuculuk ve hızlı bozulması gibi tipik dezavantajlarını ortadan kaldırması nedeniyle benzersiz bir teknik avantaj sağlamıştır. Elde edilen BPEONE LE, BPEO'nun biyoaktif bileşenlerini stabilize etme ve kontrollü şekilde serbest bırakma konusunda önemli bir yeteneğe sahip olduğunu göstermiştir ve BPEONE'nin et korumasını geliştirmede stabil ve yüksek etkinlikli bir nano taşıyıcı olduğunu doğrulamıştır.

4.5. ZnO NP'lerin Sentezi ve Karakterizasyonu

Belirlenen 0,366 PDI değeri, küçük agregatların oluşumuna atfedilebilecek orta derecede bir boyut dağılımını ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Kim vd. (2014) tarafından yüzey modifiye edilmiş ZnO NP'ler üzerinde yapılan çalışmada, kolloidal sistemlerde orta derecede dağılımın karakteristik özelliği olan benzer bir PDI aralığı (0,2–0,4) bildirilmiştir. Daha yüksek bir yoğunluk ağırlıklı tepe ($351,8 \pm 632,0$ nm) ve daha düşük

bir Z-ortalaması (137,4 nm) varlığı, süspansiyonda aglomeratların varlığını göstermiştir. Bu gözlem, ZnO NP'lerin sulu çözeltide tipik olarak 160 nm'den büyük agregalar oluşturma eğiliminde olduğunu ve bunun DLS sinyalinin domine ettiğini bildiren Khan vd. (2024) çalışmasıyla uyumludur.

ZnO NP'lerdeki net negatif yüzey yükü, gözlemlenen $-26,8 \pm 6,15$ mV zeta potansiyeli değeri ile doğrulandı. Bu, negatif yükün nötr suda ZnO yüzeyinde hidroksil iyonu (OH^-) adsorpsiyonunun evrensel bir mekanizmasının sonucu olmasıyla açıklanabilir (Kim vd., 2014). Katyonik bir yüzey aktif madde olan CTAB, stabilizatör olarak kullanılmıştır. CTAB, partikül büyümesini düzenleyen ve sentez sırasında anlık agregasyonu engelleyen etkili bir kaplama maddesidir (Rana, 2017). CTAB kullanımına rağmen ölçülen $-26,8$ mV'lik nihai zeta potansiyeli, katyonik CTAB tabakasının etkisini göstermektedir. Katyonik yüzey aktif maddelerin adsorpsiyonunun, ZnO parçacıklarının zeta potansiyelini daha küçük negatif değerlere veya hatta pozitif değerlere çıkardığı ve dolayısıyla elektriksel çift tabaka yapısını etkilediği bildirilmiştir (Anand vd., 2017). Zeta potansiyelinin derecesi, süspansiyonun elektrostatik itme ve kolloidal stabilitesinin anahtarıdır. Gözlemlenen $-26,8$ mV değeri, parçacıklar arasındaki elektrostatik itmeler yoluyla güçlü uzun vadeli kolloidal stabiliteyi korumak için kullanılan genel kabul görmüş ± 30 mV değerinden biraz daha düşüktü (Németh vd., 2022).

XRD spektrumu, yüksek derecede kristalize, faz saflığı yüksek wurtzite ZnO NP'lerin oluştuğunu doğruladı ve gözlemlenen tüm yansımalar JCPDS Kart No. 00-036-1451'deki standart referansa karşılık geliyordu. Batterjee vd. (2022) ve Madathil vd. (2007), hidrotermal sentez yoluyla hazırlanan ZnO NP'ler hakkında benzer bulgular bildirmiş ve böylece yapısal tutarlılığı ortaya koymuştur. Yoğun tepe noktasının (101) dar yarı maksimum genişliği (FWHM), kafes içinde daha küçük gerilmeler ve daha yüksek kristallik olduğunu göstermiştir; bu, bu düzenlenmiş sentez yoluyla sentezlenen yüksek kaliteli tozlar için tipik bir özelliktir (Abd vd., 2019).

Tarayıcı elektron mikroskobu, ortalama parçacık boyutu $47,94 \pm 8,39$ nm olan ZnO NP'lerin etkili sentezini kanıtlamıştır. Bazı aglomerasyon fenomenlerine rağmen, genel şekil ve boyut, yüzey aktif madde/kaplama maddesi (CTAB) gibi sentez parametreleriyle

güçlü bir şekilde ilişkiliydi. Nanopartikülleri kontrol altına almak için gerekli olan literatürdeki önemli bir fenomen, nanopartiküllerin boyutunu ve şeklini ayarlamak için katyonik yüzey aktif maddenin (CTAB) uygulanmasıdır. Wang vd. (2011), solvotermal/hidrotermal yaklaşımlarda CTAB konsantrasyonunun değiştirilmesinin ZnO'nun morfolojisini (nanorodlar, çiçek benzeri ve küresel yapılar) potansiyel olarak değiştirebileceğini göstermiş ve yüzey aktif maddenin etkili bir büyüme düzenleyicisi olarak etkinliğini doğrulamıştır.

47,94 nm'lik ortalama çap değeri, bildirilen ortalama değerler aralığına girmiştir, bu da ZnO NP'lerin ıslak kimyasal yöntemler ve ardından kalsinasyon işlemi kullanılarak elde edildiğini göstermektedir. Hidrotermal ZnO sentezini inceleyen Droepenu vd. (2022), 34,74 nm ila 78,21 nm arasında değişen kristalit boyutlarına yol açan benzer sentez koşullarını (100-150 °C'de 1-5 saat otoklavlama) tartışmıştır. Ortalama parçacık boyutu $47,94 \pm 8,39$ nm olan hidrotermal olarak hazırlanmış ZnO nanopartiküller, nano ölçekli ürünler elde etmede seçilen sıcaklık (100 °C) ve reaksiyon süresinin (3 saat) e etkinliğini göstermektedir.

4.6. Fiziko-kimyasal Analiz

BPEONE tek başına ve ZnO NP'lerle birlikte tavuk etindeki lipit oksidasyon süreci üzerinde önemli bir inhibe edici etki göstermiştir; sırasıyla $0,76 \pm 0,10$ ve $0,68 \pm 0,09$ mg MDA/kg. Bu bulgu, bitki bazlı ve nano yapıli antioksidanlar üzerine yapılan önceki çalışmalarla tutarlıdır. Benzer sonuçlar, *Elettaria cardamomum* EO içeren kitosan kaplama ile işlenmiş tavuk butlarında lipit oksidasyonunda (TBARS) etkili bir azalma gözlemleyen Khorshidi vd. (2021) tarafından da bildirilmiştir. Dakheel vd. (2021), tavuk etinde lipit oksidasyonunu önemli ölçüde azaltan bir biyonanokompozit (jelatin-ZnO NP'ler) kaplama kullanarak benzer bulgular bildirmiş ve aktif korumada inorganik NP'lerin kullanılmasını önermiştir. Bu çalışmada BPEONE ve ZnO NP'lerin sinerjik etkisi, Mosavinia vd. (2022) tarafından yapılan gözlemlerle uyumludur. Bu araştırmacılar, kitosan filmlerde bulunan *Zataria multiflora* EO ve ZnO NP'lerin önemli antimikrobiyal ve antioksidan etkiler sergilediğini ve sonuç olarak levrek filetolarının raf ömrünü uzattığını bildirmişlerdir. Bu araştırmalar, nano formülasyonların/nano

kompozitlerin, et ürünlerinde lipit oksidasyonunu azaltan önemli bir doğal koruma yaklaşımı olarak etkinliğini vurgulamıştır.

BPEONE tek başına ve ZnO NP kaplaması ile birlikte kullanıldığında pH artışını etkili bir şekilde azaltarak önemli koruyucu etkilerini göstermiştir. Bu pH kontrolü/stabilizasyonu, nano formülasyonların potansiyel antimikrobiyal özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu özellikler, et bozulması sırasında normalde pH'ı artıran mikroorganizmalar tarafından alkali bileşiklerin oluşumunu sınırlar. Mevcut çalışmanın sonuçları, Hussain vd. (2025) tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarıyla uyumludur.

4.7. Duyusal Analiz

Formülasyonları genel kabul aralığı, duyusal verilere dayalı olarak belirlendi. Uçucu yağ formülasyonları, özellikle karabiber uçucu yağ nanoemülsiyonu ve karabiber uçucu yağ nanoemülsiyonu ile ZnO nanopartiküllerini içeren kombinasyon nanoformülasyon, analiz 12. gününe kadar duyusal özellikleri (lezzet, doku ve renk) korumuştur. Bu, tüketici tercihinin temel belirleyicisi olan kontrol ve serbest uçucu yağ grubu ile karşılaştırılmıştır (Ayoub vd., 2023; da Silva vd., 2022). Kontrol grubunun tavuk eti en az beğenilen ve 8. analiz gününden sonra kabul edilemez hale gelen grup olmuştur. Serbest uçucu yağ ile işlenmiş tavuk etinin kabul oranı da NE ve ZNE'den (sırasıyla BPEONE ve BPEONE + ZnO NP'lerin kombinasyonu) daha düşüktü (Ayoub vd., 2023). 16.günün ardından elde edilen genel bulgular, nano formülasyon kaplamalarının doku ve renk özelliklerini etkileyebileceğini göstermiştir. Bu bulgular, yenilebilir kaplamaların et ürünlerinin duyusal özelliklerini değiştirdiğini gösteren önceki çalışmalarda da ortaya konmuştur (Ujilestari vd., 2023; Maciel vd., 2020).

4.8. Mikrobiyolojik Analiz

Mikrobiyolojik bulgular, ZNE (BPEO nanoemülsiyon + ZnO NP'ler) işleminin, Toplam Canlı Sayısı, *Enterobacteriaceae*, *Salmonella* spp., Laktik Asit Bakterileri, Küf ve Mayalar ile Psikrotrofik Bakteriler dahil olmak üzere test edilen neredeyse tüm bakteri gruplarında en yüksek antimikrobiyal aktiviteyi sergilediğini güçlü bir şekilde

göstermektedir. Karabiber esansiyel yağı (BPEO) nanoemülsiyonu ile çinko oksit nanopartiküller (ZnO NP'ler) arasındaki sinerjik etki, bu yüksek performansı açıklayabilir. NE ve ZNE (sırasıyla BPEONE ve BPEONE + ZnO NP'lerin bir kombinasyonu) formülasyonlarının TVC analizi, serbest uçucu yağ ve kontrol grubuna kıyasla istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar sergilemiştir (Mavalizadeh vd., 2022). 16. günde, en düşük TVC ZNE ($4,77 \times 10^6$ CFU/g) ve NE ($5,27 \times 10^6$ CFU/g) gruplarında bulundu ve bu değerler C, SC ve EO (sırasıyla $8,40 \times 10^6$, $8,27 \times 10^6$ ve $6,70 \times 10^6$ CFU/g) gruplarından önemli ölçüde düşük bulunmuştur.

NE ve ZNE formülasyonlarında *Enterobacteriaceae* analizi, Abbasi vd. (2021) tarafından bildirilen sonuçlara benzer şekilde, serbest uçucu yağ ve kontrol gruplarına kıyasla istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar göstermiştir. 16.günde, en düşük *Enterobacteriaceae* ZNE ($2,47 \times 10^6$ CFU/g) ve NE ($3,27 \times 10^6$ CFU/g) gruplarında tespit edilmiştir. Bu değerler, sırasıyla C, SC ve EO gruplarında tespit edilen değerlerden ($6,70 \times 10^6$, $6,60 \times 10^6$ ve $4,43 \times 10^6$ CFU/g) önemli ölçüde düşüktür. NE ve ZNE formülasyonlarının küf ve maya analizinde, serbest uçucu yağ ve kontrol gruplarına kıyasla istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar gözlemlenmiş olup, bu bulgular Borhani vd. (2024) tarafından bildirilenlerle uyumludur. 16. günde, en düşük küf ve maya sayıları ZNE'de ($0,93 \times 10^6$ CFU/g) ve NE ($1,53 \times 10^6$ CFU/g) gruplarında en düşük küf ve maya sayıları tespit edildi; bu sayılar C, SC ve EO (sırasıyla $2,93 \times 10^6$, $2,90 \times 10^6$ ve $1,97 \times 10^6$ CFU/g) gruplarından önemli ölçüde düşüktür.

NE ve ZNE formülasyonlarındaki *Salmonella* spp., Keykhosravy vd. (2020) tarafından elde edilen bulgularla tutarlı olarak, serbest uçucu yağ ve kontrol gruplarına kıyasla istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar sergilemiştir. 16.günde, en düşük *Salmonella* sayıları ZNE ($0,67 \times 10^6$ CFU/g) ve NE ($1,13 \times 10^6$ CFU/g) gruplarında tespit edildi; bu değerler C, SC ve EO gruplarındaki değerlerden (sırasıyla $2,67 \times 10^6$, $2,50 \times 10^6$ ve $1,63 \times 10^6$ CFU/g) önemli ölçüde düşük bulunmuştur. NE ve ZNE formülasyonlarının LAB analizi, Pajohi-Alamoti (2025) bulgularına benzer şekilde, serbest uçucu yağ ve kontrol gruplarına kıyasla istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar gösterdi. 12.günde, en düşük LAB sayıları ZNE ($5,50 \times 10^6$ CFU/g) ve NE ($5,57 \times 10^6$ CFU/g) gruplarında tespit edilmiştir ve bu

değerler C, SC ve EO gruplarındaki değerlerden (sırasıyla $7,30 \times 10^6$, $7,73 \times 10^6$ ve $6,43 \times 10^6$ CFU/g) önemli ölçüde düşüktür.

Ayrıca, NE ve ZNE formülasyonlarının psikrotrofik bakteri analizi, serbest uçucu yağ ve kontrol gruplarına kıyasla istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar gösterdi (Abbasi vd., 2021). 16. günde, en düşük psikrotrofik bakteri sayıları ZNE ($1,13 \times 10^6$ CFU/g) ve NE ($2,23 \times 10^6$ CFU/g) gruplarında tespit edildi; bu değerler C, SC ve EO gruplarından (sırasıyla $4,57 \times 10^6$, $4,53 \times 10^6$ ve $3,67 \times 10^6$ CFU/g) önemli ölçüde daha düşük bulunmuştur. Genel olarak, nano formülasyonlar, özellikle ZNE, 16 günlük et depolama süresince bozulma fenomeninin artışını ve farklı mikroorganizmaların büyümesini belirgin şekilde bastırdığı için tavuk etinde güçlü bir koruyucu ajan olarak uygulama potansiyeline sahiptir.

5. SONUÇ

Çinko oksit (ZnO) nanopartikülleri ve polisakkarit kaplı yüzeylerle güçlendirilmiş nanoemülsiyonların (karabiber esansiyel yağı bazlı) yeni bir üretim yöntemi, kümes hayvanı etinin organoleptik özelliklerini ve raf ömrünü iyileştirmek için umut verici ve sürdürülebilir bir yaklaşımdır. Bu çalışma, mikrobiyal bozulmayı azaltmak ve toksisiteye ve direnç gelişimine yol açabilen sentetik koruyuculara bağımlılığı en aza indirmek için doğal bir koruma sistemi geliştirme ihtiyacının giderek arttığını vurgulamaktadır. BPEO gibi uçucu yağların (EO) konsantrasyonu, önemli antimikrobiyal ve antioksidan etkilere sahiptir; ancak, zayıf çözünürlükleri, uçuculuk ve güçlü aroma, bu yağların sektördeki kullanımını sınırlamaktadır. Nanoenkapsülasyon, stabiliteyi artırarak, biyoaktif bileşiklerin salınımını kontrol ederek ve gıda matrisleriyle gıda uyumluluğunu iyileştirerek bu tür dezavantajların üstesinden gelebilen mükemmel bir teknolojidir.

Nanoemülsiyonların antimikrobiyal aktivitesi ve stabilitesi, nanoemülsiyonlar üzerinde sinerjik bir etki yaratan ZnO ve polisakkarit kaplamaların eklenmesiyle daha da artırılır. ZnO nanopartiküllerinin varlığı, doğal antibakteriyel özellikleri ve mikropların zarlarını dengesizleştiren reaktif oksijen türleri üretme kabiliyetleri nedeniyle ek bir koruyucu tabaka sağlar. Aynı zamanda, biyouyumlu oldukları kanıtlanmış olan kitosan ve aljinat gibi polisakkarit kaplamalarla kapsülleme verimliliği de artırılabilir ve bu kaplamalar hem uçucu hem de uçucu olmayan bileşiklerin biyoaktif salım kinetiğini kontrol edebilir. Bu nedenle, ortaya çıkan nanoemülsiyon sistemi dengeli bir etki yaratarak mikrobiyal inhibisyon, antioksidan özellikler ve tavuk eti ürünlerinde duyu özelliklerde minimum değişiklik sağlamaktadır.

Bu nanoemülsiyonlar, nano boyutlarına atfedilen gelişmiş antimikrobiyal aktiviteye sahiptir, bu da mikropların hücre zarlarıyla etkileşime girmelerine ve biyoaktif maddeleri etkili bir şekilde iletmelerine olanak tanır. Homojenizasyon parametreleri, yüzey aktif madde türü, pH ve sıcaklık, üretilen nanoemülsiyonların damlacık boyutu, stabilitesi ve salım profilini belirleyen temel faktörlerdir. Kontrollü salım davranışı, daha uzun saklama süreleri boyunca kalıcı bir antimikrobiyal etki sağlar ve böylece kümes hayvanları gibi bozulabilir gıda maddelerinin raf ömrünü uzatır. Ek olarak, kapsüllenmiş BPEO saklama

sırasında oksidatif ekşimeyi ve mikrobiyolojik bozulmayı engellediği için, istenen duyusal özellikler (lezzet, renk ve doku) korunabilir.

Bunlar umut verici sonuçlar olsa da, ticari düzeye ölçeklendirme için daha fazla optimizasyon ve test yapılması gerekmektedir. Nano formülasyonların çevresel, biyogüvenlik ve potansiyel sitotoksitesi, insan ve ekolojik güvenliği sağlamak için kapsamlı bir değerlendirme gerektirmektedir. Ayrıca, kimyasal stabilizatörlerin minimum kullanımıyla yüksek yükleme kapasiteleri elde etmek için kapsülleme parametrelerinin optimize edilmesi, önemli bir araştırma önceliğidir. Üretimin ekonomik yönü ve mevcut gıda işleme hatlarına entegrasyonu da dikkatle değerlendirilmelidir. Uzun vadeli stabilite ve biyouyumluluk sağlayan, maliyet etkin, vejetaryen bazlı kapsülleme ajanları geliştirmek ve bu tür nanoemülsiyonların bağırsak mikrobiyotası ve genel insan sağlığı üzerindeki etkisini araştırmak için daha fazla çalışma yapılmalıdır.

Genel olarak, ZnO ve polisakkarit katmanları ile yüklü BPEO bazlı nanoemülsiyonlar, doğal gıdaların korunmasında geleneksel polimer kullanımına kıyasla potansiyel olarak avantajlı çözümle sunulmaktadır. Bu çok yönlü sistem, daha temiz, daha güvenli ve daha çevre dostu koruma prosedürlerini tercih eden tüketicilerin beklentileriyle uyumludur.

6. KAYNAKLAR

- Abadula, T. A., Jilo, S. A., Hussein, J. A., Abadura, S. Z. (2022). Poultry production status, major constraints, and future prospective. *Journal of World's Poultry Science*, 1: 22–28.
- Abbasi, Z., Aminzare, M., Hassanzad Azar, H., Rostamizadeh, K. (2021). Effect of corn starch coating incorporated with nanoemulsion of *Zataria multiflora* essential oil fortified with cinnamaldehyde on microbial quality of fresh chicken meat and fate of inoculated *Listeria monocytogenes*. *Journal of Food Science and Technology*, 58(7): 2677–2687.
- Abd, M. A., Razeg, K. H., Al-haddad, R. M. (2019). Preparation and Characterization of ZnO Nano particles Prepared by Hydrothermal Method. *Tikrit Journal of Pure Science*, 24(3), 91-94.
- Abdalbeygi, S., Aminzare, M., Hassanzad Azar, H. (2022). Chitosan edible coating incorporated with resveratrol and *Satureja bachtiarica* essential oil as natural active packaging: In vitro antibacterial and antioxidant properties, and its impact on the shelf life of fresh chicken fillet and growth of inoculated *Escherichia coli* O157:H7. *International Journal of Food Engineering*, 18(10-11): 701–715.
- Abdou, E. S., Galhoum, G. F., Mohamed, E. N. (2018). Curcumin loaded nanoemulsions/pectin coatings for refrigerated chicken fillets. *Food Hydrocolloids*, 83: 445–453.
- Agnish, S., Sharma, A. D., Kaur, I. (2022). Nanoemulsions (O/W) containing *Cymbopogon pendulus* essential oil: Development, characterization, stability study, and evaluation of in vitro antibacterial, anti-inflammatory, and anti-diabetic activities. *Bionanoscience*, 12(2), 540-554.
- Aguiar Campolina, G., das Graças Cardoso, M., Rodrigues-Silva-Caetano, A., Lee Nelson, D., Mendes Ramos, E. J. (2023). Essential oil and plant extracts as preservatives and natural antioxidants applied to meat and meat products: A review. *Food Technology and Biotechnology*, 61(2): 212–225.
- Ahmed, K., Li, Y., McClements, D. J., Xiao, H. (2012). Nanoemulsion- and emulsion-based delivery systems for curcumin: Encapsulation and release properties. *Food Chemistry*, 132(2): 799–807.
- Akhtar, M. J., Khan, S. A. (2024). Chemistry and biological activity of mustard oil: Therapeutic benefits and risk to healthcare. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 34(1): 65–79.
- Akinsemolu, A. A., Onyeaka, H. N. (2024). Microorganisms associated with food spoilage and foodborne diseases. In *Food safety and quality in the global south* (pp. 489-531). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Al-Maqtari, Q. A., Rehman, A., Mahdi, A. A., Al-Ansi, W., Wei, M., Yanyu, Z., Yao, W. (2022). Application of essential oils as preservatives in food systems: challenges and future perspectives—a review. *Phytochemistry Reviews*, 21(4), 1209-1246.
- Al-Sayed, E., Gad, H. A., El-Kersh, D. M. (2021). Characterization of four piper essential oils (GC/MS and ATR-IR) coupled to chemometrics and their anti-*Helicobacter pylori* activity. *Acs Omega*, 6(39), 25652-25663.
- Alade, O. S., Mahmoud, M., Al Shehri, D. A., Sultan, A. S. (2021). Rapid determination of emulsion stability using turbidity measurement incorporating artificial neural network (ANN): Experimental validation using video/optical microscopy and kinetic modeling. *ACS Omega*, 6(8): 5910–5920. DOI: 10.1021/acsomega.1c00017
- Alirezalu, K., Pateiro, M., Yaghoubi, M., Alirezalu, A., Peighambaroust, S. H., Lorenzo, J. M. (2020). Phytochemical constituents, advanced extraction technologies and techno-functional properties of selected Mediterranean plants for use in meat products: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 100: 292–306. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.04.010
- Amiri-Rigi, A., Abbasi, S., Emmambux, M. N. (2023). Background, limitations, and future perspectives in food grade microemulsions and nanoemulsions. *Food Reviews International*, 39(8): 5048–5086. DOI: 10.1080/87559129.2022.2059808
- Amiri, E., Aminzare, M., Hassanzad Azar, H., Mehrasbi, M. R. (2019). Combined antioxidant and sensory effects of corn starch films with nanoemulsion of *Zataria multiflora* essential oil fortified with cinnamaldehyde on fresh ground beef patties. *Meat Science*, 153: 66–74.
- Anand, K., Varghese, S., Krishnamoorthy, A. (2017). Role of surfactants on the stability of nano-zinc oxide dispersions. *Particulate Science and Technology*, 35: 67–70.

- Araujo, S., Federico, F., Biolatto, A., Naef, E., Aviles, M. V., Abalos, R. A., Lound, L., Fabre, R. (2025). Use of natural additives: Seaweed oil and citrus fiber and effects on marinated chicken meat. *Food Production, Processing and Nutrition*, 7(1): 30.
- Aree, T., Jongrungruangchok, S. (2016). Crystallographic evidence for β -cyclodextrin inclusion complexation facilitating the improvement of antioxidant activity of tea (+)-catechin and (-)-epicatechin. *Carbohydrate Polymers*, 140: 362–373.
- Arriaga, L., Amstad, E., Weitz, D. A. (2015). Scalable single-step microfluidic production of single-core double emulsions with ultra-thin shells. *Lab on a Chip*, 15(6): 3335–3340.
- Artiga-Artigas, M., Montoliu-Boneu, J., Salvia-Trujillo, L., Martín-Belloso, O. (2019). Factors affecting the formation of highly concentrated emulsions and nanoemulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 578: 123577.
- Ashraf, N., Arshad, Z., Sami, R., Almeahmadi, A. M., Alsanei, W. A., Bedaiwi, R. I., Kadi, R. H., Abu-Zaid, A. A., Al-Dhumri, S. A., Abushal, S. A. (2025). Effect of peppermint essential oil and ultrasonication on microbiological evaluation and quality parameters of stored chicken meat. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9: 1552570.
- Augustyńska-Prejsnar, A., Hanus, P., Ormian, M., Kačaniová, M., Sokołowicz, Z., Topczewska, J. (2023). The effect of temperature and storage duration on the quality and attributes of the breast meat of hens after their laying periods. *Foods*, 12(23): 4340.
- Ayoub, A. W., Sayed, S. M., Ammar, M. A., Hefnawy, Y. A., Youssef, A. M. (2023). Novel edible bionanocomposite films based on lemon grass nanoemulsion and ZnO nanoparticles for extending the shelf life of chilled chicken meat. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 13: 573–604.
- Azevedo, I. L., Nogueira, W. C. L., de Almeida, A. C., Guedes, L. L. M., Vieira, C. R., Santos, S. H. S., Carvalho, C. M. C., da Fonseca, F. S. A., de Souza, R. M., de Souza, C. N. (2021). Antioxidant activity and chemical composition of meat from broilers fed diets containing different essential oils. *Veterinary World*, 14(6): 1638.
- Azizkhani, M., Jafari Kiasari, F., Tooryan, F., Shahavi, M. H., Partovi, R. (2021). Preparation and evaluation of food-grade nanoemulsion of tarragon (*Artemisia dracunculus* L.) essential oil: Antioxidant and antibacterial properties. *Journal of Food Science and Technology*, 58(4): 1341–1348.
- Badr, M. M., Badawy, M. E., Taktak, N. E. (2021). Characterization, antimicrobial activity, and antioxidant activity of the nanoemulsions of *Lavandula spica* essential oil and its main monoterpenes. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 65: 102732.
- Bahurmiz, O. M., Ahmad, R., Ismail, N., Adzitey, F., Sulaiman, S.-F. (2020). Antimicrobial activity of selected essential oils on *Pseudomonas* species associated with spoilage of fish with emphasis on cinnamon essential oil. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 29(8): 789–800.
- Bakkali, F., Averbeck, S., Averbeck, D., Idaomar, M. (2008). Biological effects of essential oils – A review. *Food and Chemical Toxicology*, 46(2): 446–475.
- Barbosa, L. N., Rall, V. L. M., Fernandes, A. A. H., Ushimaru, P. I., da Silva Probst, I., Fernandes Jr., A. (2009). Essential oils against foodborne pathogens and spoilage bacteria in minced meat. *Foodborne Pathogens and Disease*, 6(6): 725–728.
- Barkhordari, P., Bazargani-Gilani, B. (2021). Effect of apple peel extract and zein coating enriched with ginger essential oil on the shelf life of chicken thigh meat. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15: 2727–2742.
- Barmettler, K., Kelbert, L., Horlbog, J. A., Cernela, N., Biggel, M., Stephan, R. (2025). *Salmonella* in Swiss and imported retail chicken meat: A cross-sectional study. *Journal of Food Protection*, 100532.
- Barradas, T. N., de Holanda e Silva, K. G. (2021). Nanoemulsions of essential oils to improve solubility, stability and permeability: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(2): 1153–1171.
- Barroeta, A. C. (2007). Nutritive value of poultry meat: Relationship between vitamin E and PUFA. *World's Poultry Science Journal*, 63(2): 277–284.
- Batterjee, M. G., Nabi, A., Kamli, M. R., Alzahrani, K. A., Danish, E. Y., Malik, M. A. (2022). Green hydrothermal synthesis of zinc oxide nanoparticles for UV-light-induced photocatalytic degradation of ciprofloxacin antibiotic in an aqueous environment. *Crystals*, 12(11): 1347.

- Bharti, S. K., Pathak, V., Alam, T., Arya, A., Singh, V. K., Verma, A. K., Rajkumar, V. (2020). Materialization of novel composite bio-based active edible film functionalized with essential oils on antimicrobial and antioxidative aspects of chicken nuggets during extended storage. *Journal of Food Science*, 85(9): 2857–2865.
- Bhavaniramya, S., Vishnupriya, S., Al-Aboody, M. S., Vijayakumar, R., Baskaran, D. (2019). Role of essential oils in food safety: Antimicrobial and antioxidant applications. *Grain & oil science and technology*, 2(2): 49–55.
- Bi, Y., Zhou, G., Pan, D., Wang, Y., Dang, Y., Liu, J., Jiang, M., Cao, J. (2019). The effect of coating incorporated with black pepper essential oil on lipid deterioration and aroma quality of Jinhua ham. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(4): 2740–2750.
- Biswas, C., Leboveic, A., Burke, K., Biswas, D. (2019). Post-harvest approaches to improve poultry meat safety. In: *Food Safety in Poultry Meat Production* (pp. 123–138), Cham: Springer International Publishing.
- Biswas, C., Comes, C., Juliana, S., Alex, L., Debabrata, B. (2018). Safer post-harvest processing, proper storage and transport of broiler products to the retail markets. *Journal of Food Processing and Beverages*, 6(2): 01–04.
- Borhani, E. A., Amiri, S., Radi, M. (2024). The effects of alginate coatings containing thymol in the forms of nanoemulsion and nanostructured lipid carriers on microbial, oxidation, and physicochemical qualities of fresh breast chicken meat. *Food Technology and Biotechnology*, 17: 5285–5298.
- Borrin, T. R., Georges, E. L., Moraes, I. C., Pinho, S. C. (2016). Curcumin-loaded nanoemulsions produced by the emulsion inversion point method: An evaluation of process parameters and physicochemical stability. *Journal of Food Engineering*, 169: 1–9.
- Bouchemal, K., Briançon, S., Perrier, E., Fessi, H. (2004). Nano-emulsion formulation using spontaneous emulsification: Solvent, oil and surfactant optimisation. *International Journal of Pharmaceutics*, 280(1-2): 241–251.
- Brewer, M. S. (2011). Natural antioxidants: Sources, compounds, mechanisms of action, and potential applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 10(4): 221–247.
- Bruckert, M. J. (2021). Chicken politics: Agrifood capitalism, anxious bodies, and the new meanings of chicken meat in India. *The Journal of Food Studies*, 21(2): 33–46.
- Burt, S. (2004). Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods – A review. *International Journal of Food Microbiology*, 94(3): 223–253.
- Calo, J. R., Crandall, P. G., O'Bryan, C. A., Ricke, S. C. (2015). Essential oils as antimicrobials in food systems – A review. *Food Control*, 54: 111–119.
- Chacha, J. S., Zhang, L., Ofoedu, C. E., Suleiman, R. A., Dotto, J. M., Roobab, U., Agunbiade, A. O., Duguma, H. T., Mkojera, B. T., Hossaini, S. M. (2021). Revisiting non-thermal food processing and preservation methods – Action mechanisms, pros and cons: A technological update (2016–2021). *Foods*, 10(6): 1430.
- Chaichi, M., Mohammadi, A., Badii, F., Hashemi, M. (2021). Triple synergistic essential oils prevent pathogenic and spoilage bacteria growth in refrigerated chicken breast meat. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 32: 101926.
- Chakravarty, I., Parmar, V. M., Mandavgane, S. A. (2023). Current trends in essential oil production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(17): 15311–15334.
- Chaudhari, A. K., Singh, A., Das, S., Dubey, N. K. (2021). Nanoencapsulated *Petroselinum crispum* essential oil: Characterization and practical efficacy against fungal and aflatoxin contamination of stored chia seeds. *Food Bioscience*, 42: 101117.
- Chellaiah, R., Shanmugasundaram, M., Kizhekkedath, J. (2020). Advances in meat preservation and safety. *International Journal of Scientific Research*, 9(3): 1499–1502.
- Chen, X., Shang, S., Yan, F., Jiang, H., Zhao, G., Tian, S., Chen, R., Chen, D., Dang, Y. (2023). Antioxidant activities of essential oils and their major components in scavenging free radicals, inhibiting lipid oxidation and reducing cellular oxidative stress. *Molecules*, 28(11): 4559.
- Chermala, A., Acharya, P., Singh, R. K. (2025). Cold chain logistics performance: A framework. *Measuring Business Excellence*, 29(1): 55–75.

- Chouhan, S., Sharma, K., Guleria, S. (2017). Antimicrobial activity of some essential oils – Present status and future perspectives. *Medicines*, 4(3): 58.
- Ciobanu, M.-M., Flocea, E.-I., Boișteanu, P.-C. (2024). The impact of artificial and natural additives in meat products on neurocognitive food perception: A narrative review. *Foods*, 13(23): 3908.
- Clemente, I., Aznar, M., Silva, F., Nerín, C. (2016). Antimicrobial properties and mode of action of mustard and cinnamon essential oils and their combination against foodborne bacteria. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 36: 26–33.
- Corrêa, J. A. F., dos Santos, J. V. G., Evangelista, A. G., Pinto, A. C. S. M., de Macedo, R. E. F., Luciano, F. B. (2021). Combined application of phenolic acids and essential oil components against *Salmonella Enteritidis* and *Listeria monocytogenes* in vitro and in ready-to-eat cooked ham. *LWT*, 149: 111881.
- D'Amore, T., Di Taranto, A., Berardi, G., Vita, V., Marchesani, G., Chiaravalle, A. E., Iammarino, M. (2020). Sulfites in meat: Occurrence, activity, toxicity, regulation, and detection – A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(5): 2701–2720.
- da Silva, B. D., Bernardes, P. C., Pinheiro, P. F., Fantuzzi, E., Roberto, C. D. (2021). Chemical composition, extraction sources and action mechanisms of essential oils: Natural preservatives and limitations of use in meat products. *Meat Science*, 176: 108463.
- da Silva, B. D., do Rosário, D. K. A., Weitz, D. A., Conte-Junior, C. A. (2022). Essential oil nanoemulsions: Properties, development, and application in meat and meat products. *Trends in Food Science and Technology*, 121: 1–13.
- da Silva Rivas, A. C., Lopes, P. M., de Azevedo Barros, M. M., Costa Machado, D. C., Alviano, C. S., Alviano, D. S. (2012). Biological activities of α -pinene and β -pinene enantiomers. *Molecules*, 17(6): 6305–6316.
- da Silveira, S. M., Luciano, F. B., Fronza, N., Cunha Jr., A., Scheuermann, G. N., Vieira, C. R. W. (2014). Chemical composition and antibacterial activity of *Laurus nobilis* essential oil towards foodborne pathogens and its application in fresh Tuscan sausage stored at 7 °C. *LWT – Food Science and Technology*, 59(1): 86–93.
- Dahham, S. S., Tabana, Y. M., Ahamed, M. K., Majid, A. A. (2015). In vivo anti-inflammatory activity of β -caryophyllene, evaluated by molecular imaging. *Molecular Chemistry*, 1(e1001), 6p.
- Dakheel, M. J., Jasim, H. N. (2021). Evaluation of microbial and chemical properties of refrigerated chicken meat coated by bionanocomposite of gelatin mixed with zinc oxide nanoparticles. *Biochemical & Cellular Archives*, 21.
- Dalei, G., Das, S., Mohanty, D., Biswal, S., Jena, D., Dehury, P., Das, B. R. (2025). Xanthan gum–pectin edible coating enriched with sweet orange (*Citrus sinensis* L.) peel essential oil for chicken meat preservation. *Food Biophysics*, 20(1): 52.
- Dammak, I., Sobral, P. J. A., Aquino, A., Neves, M. A., Conte-Junior, C. A. (2020). Nanoemulsions: Using emulsifiers from natural sources replacing synthetic ones – A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(5): 2721–2746.
- Dapčević Hadnađev, T., Dokić, P., Krstonošić, V., Hadnađev, M. (2013). Influence of oil phase concentration on droplet size distribution and stability of oil-in-water emulsions. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 115(3): 313–321.
- Das, S., Singh, V. K., Dwivedy, A. K., Chaudhari, A. K., Dubey, N. K. (2021). Nanostructured *Pimpinella anisum* essential oil as a novel green food preservative against fungal infestation, aflatoxin B1 contamination and deterioration of nutritional qualities. *Food Chemistry*, 344: 128574.
- Dasgupta, N., Ranjan, S., Gandhi, M. (2019). Nanoemulsion ingredients and components. *Environmental Chemistry Letters*, 17(2): 917–928.
- Davis, C. G., Harvey, D., Zahniser, S., Gale, F., Liefert, W. (2013). Assessing the growth of US broiler and poultry meat exports. *United States Department of Agriculture, Economic Research Service, Outlook Report No. LPDM-231-01*. Nov. <http://www.ers.usda.gov/media/1217411/ldpm-231-01-with-keywords.pdf>.
- Davoudi, S., Stasinopoulos, P., Shiwakoti, N. (2024). Two decades of advancements in cold supply chain logistics for reducing food waste: A review with focus on the meat industry. *Sustainability*, 16(16): 6986.

- de Meneses, A. C., Sayer, C., Puton, B. M., Cansian, R. L., Araújo, P. H., de Oliveira, D. (2019). Production of clove oil nanoemulsion with rapid and enhanced antimicrobial activity against gram-positive and gram-negative bacteria. *Journal of Food Process Engineering*, 42(6): e13209.
- Dewan, M. F., Islam, M. N., Azam, M. S. (2024). Food additives/preservatives and their implications for human health. In *Food Safety* (pp. 155–184). CRC Press.
- Dey, S., Nagababu, B. H. (2022). Applications of food color and bio-preservatives in food and their effect on human health. *Food Chemistry Advances*, 1: 100019.
- Di Sotto, A., Mancinelli, R., Gulli, M., Eufemi, M., Mammola, C. L., Mazzanti, G., Di Giacomo, S. (2020). Chemopreventive potential of caryophyllane sesquiterpenes: An overview of preliminary evidence. *Cancers*, 12(10): 3034.
- Dizaj, S. M., Yaqoubi, S., Adibkia, K., Lotfipour, F. (2016). Nanoemulsion-based delivery systems: Preparation and application in the food industry. In *Emulsions* (pp. 293–328). Academic Press.
- Djenane, D., Yangüela, J., Montañés, L., Djerbal, M., Roncalés, P. (2011). Antimicrobial activity of *Pistacia lentiscus* and *Satureja montana* essential oils against *Listeria monocytogenes* CECT 935 using laboratory media: Efficacy and synergistic potential in minced beef. *Food Control*, 22(7): 1046–1053.
- Domínguez, R., Pateiro, M., Gagaoua, M., Barba, F. J., Zhang, W., Lorenzo, J. M. (2019). A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products. *Antioxidants*, 8(10): 429.
- Donsì, F., Ferrari, G. (2016). Essential oil nanoemulsions as antimicrobial agents in food. *Journal of Biotechnology*, 233: 106–120.
- Donsì, F., Sessa, M., Mediouni, H., Mgaidi, A., Ferrari, G. (2011). Encapsulation of bioactive compounds in nanoemulsion-based delivery systems. *Procedia Food Science*, 1, 1666–1671.
- Dos Santos, P. P., Paese, K., Guterres, S. S., Pohlmann, A. R., Costa, T. H., Jablonski, A., Flôres, S. H., Rios, A. O. (2015). Development of lycopene-loaded lipid-core nanocapsules: Physicochemical characterization and stability study. *Journal of Nanoparticle Research*, 17(2): 107.
- Doulgeraki, A. I., Ercolini, D., Villani, F., Nychas, G.-J. E. (2012). Spoilage microbiota associated with the storage of raw meat in different conditions. *International Journal of Food Microbiology*, 157(2): 130–141.
- Droepenu, E. K., Wee, B. S., Chin, S. F., Kok, K. Y., Maligan, M. F. (2022). Zinc oxide nanoparticles synthesis methods and their effect on morphology: A review.
- Dussault, D., Vu, K. D., Lacroix, M. (2014). In vitro evaluation of antimicrobial activities of various commercial essential oils, oleoresins and pure compounds against food pathogens and application in ham. *Meat Science*, 96(1): 514–520.
- Dwivedy, A. K., Singh, V. K., Prakash, B., Dubey, N. K. (2018). Nanoencapsulated *Illicium verum* Hook. f. essential oil as an effective novel plant-based preservative against aflatoxin B1 production and free radical generation. *Food and Chemical Toxicology*, 111: 102–113.
- EFSA Panel on Food Additives and Flavourings (FAF), Younes, M., Aquilina, G., Castle, L., Engel, K. H., Fowler, P., Waalkens-Berendsen, I. (2019). Opinion on the follow-up of the re-evaluation of sorbic acid (E200) and potassium sorbate (E202) as food additives. *EFSA Journal*, 17(3), e05625.
- EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food (ANS), Mortensen, A., Aguilar, F., Crebelli, R., Di Domenico, A., Dusemund, B., Younes, M. (2017). Re-evaluation of potassium nitrite (E 249) and sodium nitrite (E 250) as food additives. *Efsa journal*, 15(6), e04786.
- Effatpanah, H., Safari, N., Mohammadi, A. S. J. (2025). Determination of MCR-1 gene and antibiotic-resistant *Escherichia coli* isolates from clinical and non-clinical samples. *Archives of Clinical Infectious Diseases*, 20.
- Erdaw, M. M., Beyene, W. T. (2022). Trends, prospects and the socio-economic contribution of poultry production in sub-Saharan Africa: A review. *World's Poultry Science Journal*, 78(3): 835–852.
- Espina, L., Gelaw, T. K., de Lamo-Castellví, S., Pagán, R., García-Gonzalo, D. (2013). Mechanism of bacterial inactivation by (+)-limonene and its potential use in food preservation combined processes. *PLoS ONE*, 8(2): e56769.
- Ezhilarasi, P., Karthik, P., Chhanwal, N., Anandharamakrishnan, C. (2013). Nanoencapsulation techniques for food bioactive components: A review. *Food Science and Bioprocess Technology*, 6(3): 628–647.

- Fabio, S., Elisa, L., Giulia, A., Valerio, G., Alessandro, Z., Sara, S. (2025). Antimicrobial effect of essential oils and terpenes coupled with supercritical carbon dioxide for chicken meat preservation. *LWT – Food Science and Technology*, 215: 117270.
- Fadeel, B., Garcia-Bennett, A. E. (2010). Better safe than sorry: Understanding the toxicological properties of inorganic nanoparticles manufactured for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 62(3): 362–374.
- Falleh, H., Ben Jemaa, M., Djebali, K., Abid, S., Saada, M., Ksouri, R. (2019). Application of the mixture design for optimum antimicrobial activity: Combined treatment of *Syzygium aromaticum*, *Cinnamomum zeylanicum*, *Myrtus communis*, and *Lavandula stoechas* essential oils against *Escherichia coli*. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(12): e14257.
- FAO. (2024). *Meat Market Review: Overview of Global Market Developments in 2023*. FAO, Rome, Italy.
- Farokhzad, P., Dastgerdi, A. A., Nimavard, J. T. (2023). The effect of chitosan and rosemary essential oil on the quality characteristics of chicken burgers during storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2023(1): 8381828.
- Fearnley, L. (2025). Chicken from the soil: Qualifying local chicken amidst food distrust in southwestern China. *Agriculture and Human Values*, 1–13.
- Feng, J., Esquena, J., Rodriguez-Abreu, C., Solans, C. (2021). Key features of nano-emulsion formation by the phase inversion temperature method. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 42(7): 1073–1081.
- Feng, J., Rodríguez-Abreu, C., Esquena, J., Solans, C. (2020). A concise review on nano-emulsion formation by the phase inversion composition (PIC) method. *Journal of Surfactants and Detergents*, 23(4): 677–685.
- Ferreira, C. D., Nunes, I. L. (2019). Oil nanoencapsulation: Development, application, and incorporation into the food market. *Nanoscale research letters*, 14(1): 9.
- Filippov, S. K., Khusnutdinov, R., Murmiliuk, A., Inam, W., Zakharova, L. Y., Zhang, H., Khutoryanskiy, V. V. (2023). Dynamic light scattering and transmission electron microscopy in drug delivery: A roadmap for correct characterization of nanoparticles and interpretation of results. *Materials Horizons*, 10(12): 5354–5370.
- Flekka, K., Dimaki, V. D., Mourelatou, E., Avgoustakis, K., Lamari, F. N., Hatziantoniou, S. (2024). Stability and retention of nanoemulsion formulations incorporating lavender essential oil. *Cosmetics*, 11(3): 65.
- Fornaguera, C., Dols-Pérez, A., Calderó, G., García-Celma, M. J., Camarasa, J., Solans, C. (2015). PLGA nanoparticles prepared by nano-emulsion templating using low-energy methods as efficient nanocarriers for drug delivery across the blood–brain barrier. *Journal of Controlled Release*, 211: 134–143.
- Francomano, F., Caruso, A., Barbarossa, A., Fazio, A., La Torre, C., Ceramella, J., Mallamaci, R., Saturnino, C., Iacopetta, D., Sinicropi, M. S. (2019). β -Caryophyllene: A sesquiterpene with countless biological properties. *Applied Sciences*, 9: 5420.
- Garavito, J., Moncayo-Martínez, D., Castellanos, D. A. (2020). Evaluation of antimicrobial coatings on preservation and shelf life of fresh chicken breast fillets under cold storage. *Foods*, 9(9): 1203.
- Geetha, D., Thilagavathi, T. (2010). Hydrothermal synthesis of nano ZnO structures from CTAB. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 5(1): 297–301.
- Ghaderi-Ghahfarokhi, M., Barzegar, M., Sahari, M. A., Azizi, M. H. (2016). Nanoencapsulation approach to improve antimicrobial and antioxidant activity of thyme essential oil in beef burgers during refrigerated storage. *Food and Bioprocess Technology*, 9(7): 1187–1201.
- Ghani, S., Barzegar, H., Noshad, M., Hojjati, M. (2018). The preparation, characterization and in vitro application evaluation of soluble soybean polysaccharide films incorporated with cinnamon essential oil nanoemulsions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 112: 197–202.
- Ghasemi Pirbalouti, A., Izadi, A., Malek Poor, F., Hamed, B. (2016). Chemical composition, antioxidant and antibacterial activities of essential oils from *Ferulago angulata*. *Pharmaceutical Biology*, 54(11): 2515–2520.

- Gholamhosseinpour, A., Hashemi, S. M. B., Jafarpour, D. (2023). Nanoemulsion of *Satureja sahendica* Bornm. essential oil: Antibacterial and antioxidant activities. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(1), 317–323.
- Gómez, I., Janardhanan, R., Ibañez, F. C., Beriain, M. J. (2020). The effects of processing and preservation technologies on meat quality: Sensory and nutritional aspects. *Foods*, 9(10): 1416.
- González-Reza, R. M., Hernández-Sánchez, H., Quintanar-Guerrero, D., Alamilla-Beltrán, L., Cruz-Narváez, Y., Zambrano-Zaragoza, M. L. (2021). Synthesis, controlled release, and stability on storage of chitosan–thyme essential oil nanocapsules for food applications. *Gels*, 7(4): 212.
- Granato, D., Shahidi, F., Wrolstad, R., Kilmartin, P., Melton, L. D., Hidalgo, F. J., Miyashita, K., Van Camp, J., Alasalvar, C., Ismail, A. B. (2018). Antioxidant activity, total phenolics and flavonoids contents: Should we ban in vitro screening methods? *Food Chemistry*, 264: 471–475.
- Grapentin, C., Barnert, S., Schubert, R. (2015). Monitoring the stability of perfluorocarbon nanoemulsions by cryo-TEM image analysis and dynamic light scattering. *PLoS ONE*, 10(6): e0130674.
- Guimarães, A. C., Meireles, L. M., Lemos, M. F., Guimarães, M. C. C., Endringer, D. C., Fronza, M., Scherer, R. (2019). Antibacterial activity of terpenes and terpenoids present in essential oils. *Molecules*, 24(13): 2471.
- Gupta, A., Badruddoza, A. Z. M., Doyle, P. S. (2017). A general route for nanoemulsion synthesis using low-energy methods at constant temperature. *Langmuir*, 33(28): 7118–7123.
- Gupta, A., Eral, H. B., Hatton, T. A., Doyle, P. S. (2016). Nanoemulsions: Formation, properties and applications. *Soft Matter*, 12(11): 2826–2841.
- Gutierrez, J., Barry-Ryan, C., Bourke, P. (2008). The antimicrobial efficacy of plant essential oil combinations and interactions with food ingredients. *International Journal of Food Microbiology*, 124(1): 91–97.
- Haeili, M., Alsahlani, F., Khudhair, Z. A., Aghajanzadeh, M. (2025). Fosfomycin resistance determinants in *Escherichia coli* isolates of human and animal origin from Iran. *Microbial Biology Reports*, 52(1), 541.
- Hajjar Bargh, A., Akhondzadeh Basti, A., Khanjari, A., Noori, N. (2025). Enhancing chicken fillets' shelf life: Synergistic effect of whey protein isolate and *Ziziphora clinopodioides* essential oil. *Food Science and Nutrition*, 13(9): e70821.
- Haque, M. H., Sarker, S., Islam, M. S., Islam, M. A., Karim, M. R., Kayesh, M. E. H., Shiddiky, M. J., Anwer, M. S. (2020). Sustainable antibiotic-free broiler meat production: Current trends, challenges, and possibilities in a developing country perspective. *Biology*, 9(11), 411.
- Hartanti, D., Septiyaningrum, N. A., Hamad, A. (2020). Combination of clove and lemon basil essential oils for preservation of chicken meat. *Journal of Food Quality and Hazards Control*, 5: 45–52.
- Hasan, M., Shohiduzjaman, M., Hashem, M., Khan, M., Rahman, M. J. (2024). Effects of edible oil on the quality of chicken meat in short-term preservation. *Meat Research*, 4(4).
- Hassanzadeh, H., Alizadeh, M., Hassanzadeh, R., Ghanbarzadeh, B. (2022). Garlic essential oil–based nanoemulsion carrier: Release and stability kinetics of volatile components. *Food Science and Nutrition*, 10(5): 1613–1625.
- Hauzin, N., Hadzir, N. M., Hamid, H. A. A. (2024). Fabrication and characterization of water-in-palm oil nanoemulsion as a carrier for catechin. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 28: 247–256.
- Helgeson, M. E. (2016). Colloidal behavior of nanoemulsions: Interactions, structure, and rheology. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 25, 39–50.
- Hematizad, I., Khanjari, A., Akhondzadeh Basti, A., Karabagias, I. K., Noori, N., Ghadami, F., Gholami, F., Teimourifard, R. (2021). In vitro antibacterial activity of gelatin–nanochitosan films incorporated with *Zataria multiflora* Boiss essential oil and its influence on microbial, chemical, and sensorial properties of chicken breast meat during refrigerated storage. *Food Packaging and Shelf Life*, 30, 100751.
- Hien, L. T. M., Dao, D. T. A. (2022). Antibacterial activity of black pepper essential oil nanoemulsion formulated by emulsion phase inversion method. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 10(1), 311–320.

- Hossain, F., Follett, P., Vu, K. D., Harich, M., Salmieri, S., Lacroix, M. (2016). Evidence for synergistic activity of plant-derived essential oils against fungal pathogens of food. *Food Microbiology*, 53, 24–30.
- Hosseini, M., Jamshidi, A., Raeisi, M., Azizzadeh, M. (2021). Effect of sodium alginate coating containing clove (*Syzygium aromaticum*) and lemon verbena (*Aloysia citriodora*) essential oils and different packaging treatments on shelf life extension of refrigerated chicken breast. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(3), e14946.
- Huang, D., Xu, J. G., Liu, J. X., Zhang, H., Hu, Q. (2014). Chemical constituents, antibacterial activity and mechanism of action of the essential oil from *Cinnamomum cassia* bark against four food-related bacteria. *Molecules*, 83(4), 357–365.
- Hugo, C. J., Hugo, A. (2015). Current trends in natural preservatives for fresh sausage products. *Trends in Food Science & Technology*, 45(1), 12–23.
- Hussain, S. A., Wani, S. A., Rafeh, S., Adil, S., Sofi, A. H., Ghamry, H. I., Wani, M. J. (2025). Enhancing meat emulsion quality and storage stability during refrigeration using thyme and oregano essential oil nanoparticles. *Foods*, 14(6), 1076.
- Hyldgaard, M., Mygind, T., Meyer, R. L. (2012). Essential oils in food preservation: Mode of action, synergies, and interactions with food matrix components. *Frontiers in Microbiology*, 3, 12.
- ISO 11133: 2014. (2014). Microbiology of food, animal feed and water—Preparation, production, storage and performance testing of culture media.
- Iulietto, M. F., Sechi, P., Borgogni, E., Cenci-Goga, B. T. (2015). Meat spoilage: A critical review of a neglected alteration due to ropy slime producing bacteria. *Italian Journal of Animal Science*, 14(3), 4011.
- Jafari, S. M., McClements, D. J. (Eds.). (2018). *Nanoemulsions: Formulation, Applications, and Characterization*. Academic Press.
- Jaradat, N., Adwan, L., K'aibni, S., Zaid, A. N., Shtaya, M. J., Shraim, N., Assali, M. (2017). Variability of chemical compositions and antimicrobial and antioxidant activities of *Ruta chalepensis* leaf essential oils from three Palestinian regions. *BioMed Research International*, 2017(1), 2672689.
- Jaspal, M. H., Ijaz, M., ul Haq, H. A., Yar, M. K., Asghar, B., Manzoor, A., Badar, I. H., Ullah, S., Islam, M. S., Hussain, J. (2021). Effect of oregano essential oil or lactic acid treatments combined with air and modified atmosphere packaging on the quality and storage properties of chicken breast meat. *LWT*, 146, 111459.
- Jayasena, D. D., Jo, C. (2013). Essential oils as potential antimicrobial agents in meat and meat products: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 34(2), 96–108.
- Jeena, K., Liju, V. B., Umadevi, N., Kuttan, R. (2014). Antioxidant, anti-inflammatory and antinociceptive properties of black pepper essential oil (*Piper nigrum* Linn). *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 17(1), 1–12.
- Ji, J., Shankar, S., Royon, F., Salmieri, S., Lacroix, M. (2023). Essential oils as natural antimicrobials applied in meat and meat products—A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(8), 993–1009.
- Kačániová, M., Terentjeva, M., Arpášová, H., Hleba, L., Ivanišová, E., Petrová, J., Kántor, A., Čuboň, J., Haščík, P. (2016). Effect of *Thymus serpyllum* and *Ocimum basilicum* essential oils on the shelf-life of chicken meat during refrigerated storage. *Scientific Papers Animal Science and Biotechnologies*, 49(1), 103–103.
- Kachur, K., Suntres, Z. (2020). The antibacterial properties of phenolic isomers, carvacrol and thymol. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(18), 3042–3053.
- Kaewprachu, P., Sai-Ut, S., Rawdkuen, S. (2022). Smart freshness indicator for animal-based product packaging: Current status. In *Food Packaging: The Smarter Way* (pp. 107–125). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Kalogianni, A. I., Lazou, T., Bossis, I., Gelasakis, A. I. (2020). Natural phenolic compounds for the control of oxidation, bacterial spoilage, and foodborne pathogens in meat. *Foods*, 9(6), 794.
- Kapoor, I. P. S., Singh, B., Singh, G., De Heluani, C. S., De Lampasona, M. P., Catalan, C. A. N. (2009). Chemistry and in vitro antioxidant activity of volatile oil and oleoresins of black pepper (*Piper nigrum*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(12), 5358–5364.

- Karanth, S., Feng, S., Patra, D., Pradhan, A. K. (2023). Linking microbial contamination to food spoilage and food waste: The role of smart packaging, spoilage risk assessments, and date labeling. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1198124.
- Kargozari, M., Hamed, H. (2019). Incorporation of essential oils and nanoparticles into active packaging systems in meat and meat products: A review. *Food & Health*, 2(1), 16-30.
- Karthik, P., Ezhilarasi, P. N., Anandharamakrishnan, C. (2017). Challenges associated in stability of food grade nanoemulsions. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(7), 1435–1450.
- Keykhosravi, K., Khanzadi, S., Hashemi, M., Azizzadeh, M. (2020). Chitosan-loaded nanoemulsion containing *Zataria multiflora* Boiss and *Bunium persicum* Boiss essential oils as edible coatings: Impact on microbial quality of turkey meat and fate of inoculated pathogens. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 904–913.
- Khan, A. U. H., Liu, Y., Naidu, R., Fang, C., Shon, H. K., Zhang, H., Dharmarajan, R. (2024). Changes in the aggregation behaviour of zinc oxide nanoparticles influenced by perfluorooctanoic acid, salts, and humic acid in simulated waters. *Toxics*, 12(8), 602.
- Khezerlou, A., Tavassoli, M., Alizadeh Sani, M., Mohammadi, K., Ehsani, A., McClements, D. J. (2021). Application of nanotechnology to improve the performance of biodegradable biopolymer-based packaging materials. *Polymers*, 13(24): 4399.
- Khodaei, N., Houde, M., Bayen, S., Karboune, S. (2023). Exploring the synergistic effects of essential oil and plant extract combinations to extend the shelf life and sensory acceptance of meat products: Multi-antioxidant systems. *Journal of Food Science and Technology*, 60(2), 679–691.
- Khorshidi, S., Mehdizadeh, T., Ghorbani, M. (2021). Effect of chitosan coatings enriched with extracts and essential oils of *Elettaria cardamomum* on the shelf life of vacuum-packaged chicken drumsticks stored at 4 °C. *Journal of Food Science and Technology*, 58(8), 2924–2935.
- Khoshnazar, M., Parvardeh, S., Bigdeli, M. R. (2020). Alpha-pinene exerts neuroprotective effects via anti-inflammatory and anti-apoptotic mechanisms in a rat model of focal cerebral ischemia–reperfusion. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 29(8), 104977.
- Khwaza, V., Aderibigbe, B. A. (2025). Antibacterial activity of selected essential oil components and their derivatives: A review. *Antibiotics*, 14(1), 68.
- Kim, D.-S., Lee, H.-J., Jeon, Y.-D., Han, Y.-H., Kee, J.-Y., Kim, H.-J., Shin, H.-J., Kang, J., Lee, B. S., Kim, S.-H. (2015). Alpha-pinene exhibits anti-inflammatory activity through the suppression of MAPKs and the NF-κB pathway in mouse peritoneal macrophages. *The American Journal of Chinese Medicine*, 43(04), 731–742.
- Kim, K.-M., Choi, M.-H., Lee, J.-K., Jeong, J., Kim, Y.-R., Kim, M.-K., Paek, S.-M., Oh, J.-M. (2014). Physicochemical properties of surface charge-modified ZnO nanoparticles with different particle sizes. *International Journal of Nanomedicine*, 9(sub2), 41–56.
- Kingchaiyaphum, W., Rachtanapun, C. (2012). Antimicrobial and antioxidative activities of essential oils in Chinese sausage (Kun-Chiang). *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, 19, 156–162.
- Klang, V., Matsko, N. B., Valenta, C., Hofer, F. (2012). Electron microscopy of nanoemulsions: An essential tool for characterisation and stability assessment. *Micron*, 43(2-3), 85–103.
- Komaiko, J. S., McClements, D. J. (2016). Formation of food-grade nanoemulsions using low-energy preparation methods: A review of available methods. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 15(2), 331–352.
- Korver, D. R. (2023). Current challenges in poultry nutrition, health, and welfare. *Animal*, 17, 100755.
- Kumar, A., Li, S., Cheng, C.-M., Lee, D. J. (2015). Recent developments in phase inversion emulsification. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(34), 8375–8396.
- Kumar, D., Tarafdar, A., Kumar, Y., Badgujar, P. C. (2019). Intelligent modeling and detailed analysis of drying, hydration, thermal, and spectral characteristics for convective drying of chicken breast slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(5), e13087.
- Kuttan, G., Pratheeshkumar, P., Manu, K. A., Kuttan, R. (2011). Inhibition of tumor progression by naturally occurring terpenoids. *Pharmaceutical biology*, 49(10), 995–1007.
- Lambert, R. J. W., Skandamis, P. N., Coote, P. J., Nychas, G.-J. E. (2001). A study of the minimum inhibitory concentration and mode of action of oregano essential oil, thymol and carvacrol. *Journal of Applied Microbiology*, 91(3), 453–462.

- Li, W.-R., Shi, Q.-S., Liang, Q., Huang, X.-M., Chen, Y.-B. (2014). Antifungal effect and mechanism of garlic oil on *Penicillium funiculosum*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(19), 8337–8346.
- Li, X., Fu, D., Hu, S., Huang, J., Wang, L., Zhang, Y., Liu, C., Dong, B., Liu, G. (2025). Non-contact preservation of chilled chicken: Extending shelf life and modulating microbial dynamics using solid spice essential oils and modified atmosphere packaging. *Food Control*, 111537.
- Piayura, S., Hemadhulin, T., Liamlaem, S., Patcharabudsarakumkul, K., Somkhumphee, Y., Hanmontree, P., (2021). Effects of chitosan and pepper essential oil on physicochemical and microbiological qualities of chicken sausage during chilled storage. The 4th National and International Research Conference 2021: NIRC IV 2021.
- Liu, Q., Huang, H., Chen, H., Lin, J., Wang, Q. (2019). Food-grade nanoemulsions: Preparation, stability and application in encapsulation of bioactive compounds. *Molecules*, 24(23), 4242.
- López-Bote, C. J. (2017). Chemical and biochemical constitution of muscle. In: *Lawrie's Meat Science* (pp. 99–158). Woodhead Publishing.
- Luna-Guevara, J., Rivera-Hernández, M., Arenas-Hernández, M., Luna-Guevara, M. J. (2021). Effect of essential oils of oregano (*Origanum vulgare*), thyme (*Thymus vulgaris*), and orange (*Citrus sinensis* var. Valencia) in the vapor phase on antimicrobial and sensory properties of a meat emulsion inoculated with *Salmonella enterica*. *Food Research*, 5(1), 306–312.
- Luz, A. M., Barbosa, G., Manske, C., Tavares, F. W. (2023). Tween 80 at the water/oil interface: Structure and interfacial tension by molecular dynamics simulations. *Langmuir*, 39(9), 3255–3265.
- Ma, Q., Davidson, P. M., Zhong, Q. (2016). Antimicrobial properties of microemulsions formulated with essential oils, soybean oil, and Tween 80. *International Journal of Food Microbiology*, 226, 20–25.
- Macedo, A. R. S. (2025). *Phytobiotics in Poultry Production*. Universidade Federal de Uberlândia, Brazil (PhD thesis).
- Maciel, V. B. V., Contini, L. R. F., Yoshida, C. M. P., Venturini, A. C. (2020). Application of edible biopolymer coatings on meats, poultry, and seafood. In *Biopolymer Membranes and Films* (pp. 515–533). Elsevier.
- Madathil, A. N. P., Vanaja, K., Jayaraj, M. (2007). Synthesis of ZnO nanoparticles by hydrothermal method. In *Nanophotonic Materials IV*. (Vol. 6639, pp. 47–55). SPIE.
- Mahdi, A. A., Al-Maqtari, Q. A., Mohammed, J. K., Al-Ansi, W., Cui, H., Lin, L. (2021). Enhancement of antioxidant, antifungal activity and oxidation stability of *Citrus reticulata* essential oil nanocapsules by clove and cinnamon essential oils. *Food Bioscience*, 43, 101226.
- Majeed, T., Nassar, Q. (2025). Natural preservatives for poultry and poultry products. In *Natural Preservatives for Food*. (pp. 143-191). Academic Press.
- Manafi, L., Mahmoudi, R., Pakbin, B., Ezati, P., Mousavi, S., Mehrabi, A., Javadi, A. (2025). Synergistic effects of black pepper nanoemulsion and *Lactobacillus acidophilus* against *Salmonella enteritidis* in food systems. *LWT*, 216, 117335.
- Manassis, G., Kalogianni, A. I., Lazou, T., Moschovas, M., Bossis, I., Gelasakis, A. I. (2020). Plant-derived natural antioxidants in meat and meat products. *Antioxidants*, 9(12), 1215.
- Marchese, E., D'Onofrio, N., Balestrieri, M. L., Castaldo, D., Ferrari, G., Donsì, F. (2020). Bergamot essential oil nanoemulsions: Antimicrobial and cytotoxic activity. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 75(7-8), 279–290.
- Martínez Michel, L., Anders, S., Wismer, W. V. (2011). Consumer preferences and willingness to pay for value-added chicken product attributes. *Journal of Food Science*, 76(8), S469–S477.
- Mashabela, M. N., Ndhlovu, P. T., Mbeng, W. O. (2022). Herbs and spices' antimicrobial properties and possible use in the food sector. In *Herbs and Spices – New Advances*. IntechOpen.
- Mathew, D., Anjana, R., Krishna, A., Thomas, B., Sudheep, N., Anjali, R., Radhakrishnan, E. K. (2025). Sustainable antimicrobial packaging for meat preservation: Chitosan–zinc oxide–*Cinnamomum malabattrum* nanocomposite films for enhanced food safety. *International Journal of Biological Macromolecules*, 149226.

- Maurya, A., Singh, V. K., Das, S., Prasad, J., Kedia, A., Upadhyay, N., Dubey, N. K., Dwivedy, A. K. (2021). Essential oil nanoemulsion as eco-friendly and safe preservative: Bioefficacy, mode of action, and future opportunities. *Frontiers in Microbiology*, 12, 751062.
- Mavalizadeh, A., Fazlara, A., Pourmahdi, M., Bavarsad, N. (2022). Effect of separate and combined treatments of nisin, *Rosmarinus officinalis* essential oil (nanoemulsion and free form), and chitosan coating on the shelf life of refrigerated chicken fillets. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(6), 4497–4513.
- McClements, D. J. (2002). Theoretical prediction of emulsion color. *Advances in Colloid and Interface Science*, 97(1-3), 63–89.
- McClements, D. J. (2007). Critical review of techniques and methodologies for characterization of emulsion stability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47(7), 611–649.
- McClements, D. J. (2013). Nanoemulsion-based oral delivery systems for lipophilic bioactive components: Nutraceuticals and pharmaceuticals. *Therapeutic delivery*, 4(7), 841–857.
- Melo, A. A. M., Geraldine, R. M., Silveira, M. F. A., Torres, M. C. L., Fernandes, T. H., Oliveira, A. N. (2012). Microbiological quality of refrigerated chicken meat in contact with cellulose acetate film incorporated with rosemary essential oil. *Brazilian Journal of Microbiology*, 43, 1419–1427.
- Miladi, K., Sfar, S., Fessi, H., Elaissari, A. (2017). Nanoprecipitation process: From particle preparation to in vivo applications. In *Polymer Nanoparticles for Nanomedicines: A Guide for their Design, Preparation and Development* (pp. 17-53). Cham: Springer International Publishing.
- Milenković, A. N., Stanojević, L. P. (2021). Black pepper: Chemical composition and biological activities. *Agronomy*, 10(2), 40–50.
- Mirsharifi, S. M., Sami, M., Jazaeri, M., Rezaei, A. (2023). Production and antimicrobial activity of almond gum/PVA/chitosan composite films containing thyme essential oil nanoemulsion for extending shelf life of chicken breast fillets. *International Journal of Biological Macromolecules*, 227, 405–415.
- Moadab, F. R., Azizkhani, M. (2025). Effect of chitosan edible coating containing nanoemulsion of *Eryngium campestre* essential oil on ostrich meat quality during refrigerated storage. *Food Science & Nutrition*, 13(5), e70237.
- Mohamed, A. A., Alotaibi, B. M. (2023). Essential oils of some medicinal plants and their biological activities: A mini-review. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 9(1), 40–49.
- Mojaddar Langroodi, A., Nematollahi, A., Sayadi, M. (2021). Chitosan coating incorporated with grape seed extract and *Origanum vulgare* essential oil as active packaging for turkey meat preservation. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(3), 2790–2804.
- Moradi, E., Moosavi, M. H., Hosseini, S. M., Mirmoghtadaie, L., Moslehishad, M., Khani, M. R., Jannatyha, N., Shojaei-Aliabadi, S. (2020). Prolonging shelf life of chicken breast fillets using plasma-improved chitosan/LDPE bilayer film containing summer savory essential oil. *International Journal of Biological Macromolecules*, 156, 321–328.
- Moraes-Lovison, M., Marostegan, L. F., Peres, M. S., Menezes, I. F., Ghiraldi, M., Rodrigues, R. A., Fernandes, A. M., Pinho, S. C. (2017). Nanoemulsions encapsulating oregano essential oil: Production, stability, antibacterial activity and incorporation in chicken pâté. *LWT*, 77, 233–240.
- Mosavinia SZ, Mousavi SM, Khodanazary A, Hosseini SM. *J JoFS, Technology*. (2022). Effect of a chitosan-based nanocomposite containing ZnO and *Zataria multiflora* essential oil on quality properties of Asian sea bass (*Lates calcarifer*) fillet. *Journal of Food Science and Technology*, 59(3), 869–878.
- Mottet A, Tempio G. *J Wpsj*. (2017). Global poultry production: current state and future outlook and challenges. *World's poultry science journal*, 73(2), 245-256.
- Mwale, M. M. (2023). Food additives: Recent trends in the food sector. *Health Risks of Food Additives-Recent Developments and Trends in Food Sector*.
- Nahak, G., Sahu, R. K. (2011). Phytochemical evaluation and antioxidant activity of Piper cubeba and Piper nigrum. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, (Issue), 153-157.
- Nakashima KK, van Haren MH, André AA, Robu I, Spruijt EJ. *J NC*. 2021. Active coacervate droplets are protocells that grow and resist Ostwald ripening. *Nature Communications*, 12(1), 3819.

- Nanda Kumar, T., Samantara, A., Gulati, A. (2022). Poultry value chain. In *Agricultural value chains in India: ensuring competitiveness, inclusiveness, sustainability, scalability, and improved finance* (pp. 227-252). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Nazzaro, F., Fratianni, F., Coppola, R., De Feo, V. (2017). Essential oils and antifungal activity. *Pharmaceuticals*, 10(4), 86.
- Nazzaro, F., Fratianni, F., De Martino, L., Coppola, R., De Feo, V. (2013). Effect of essential oils on pathogenic bacteria. *Pharmaceuticals*, 6(12), 1451-1474.
- Németh, Z., Csóka, I., Semnani Jazani, R., Sipos, B., Haspel, H., Kozma, G., Dobó, D. G. (2022). Quality by design-driven zeta potential optimisation study of liposomes with charge imparting membrane additives. *Pharmaceutics*, 14(9), 1798.
- Nie, Y., Pan, Y., Jiang, Y., Xu, D., Yuan, R., Zhu, Y., Zhang, Z. (2023). Stability and bioactivity evaluation of black pepper essential oil nanoemulsion. *Heliyon*, 9(4).
- Nieto, G., Martínez-Zamora, L., Peñalver, R., Marín-Iniesta, F., Taboada-Rodríguez, A., López-Gómez, A., Martínez-Hernández, G. B. (2023). Applications of plant bioactive compounds as replacers of synthetic additives in the food industry. *Foods*, 13(1), 47.
- Nirmal, N. P., Mereddy, R., Li, L., Sultanbawa, Y. (2018). Formulation, characterisation and antibacterial activity of lemon myrtle and anise myrtle essential oil in water nanoemulsion. *Food Chemistry*, 254, 1-7.
- Nirmala, M. J., Durai, L., Gopakumar, V., Nagarajan, R. (2020). Preparation of celery essential oil-based nanoemulsion by ultrasonication and evaluation of its potential anticancer and antibacterial activity. *International Journal of Nanomedicine*, 7651-7666.
- Nkukwana, T. T. (2018). Global poultry production: Current impact and future outlook on the South African poultry industry. *South African Journal of Animal Science*, 48(5), 869-884.
- Ojeda-Piedra, S. A., Zambrano-Zaragoza, M. L., González-Reza, R. M., García-Betanzos, C. I., Real-Sandoval, S. A., Quintanar-Guerrero, D. (2022). Nano-encapsulated essential oils as a preservation strategy for meat and meat products storage. *Molecules*, 27(23), 8187.
- Orav, A., Stulova, I., Kailas, T., & Müürisepp, M. (2004). Effect of storage on the essential oil composition of *Piper nigrum* L. fruits of different ripening states. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(9), 2582-2586.
- Ouyang Wuqing, ZX, Guo Jianjun. 2011. A kind of compound bergamot oil nanoemulsion composition and preparation method thereof. China: *Northwest A&F University*.
- WHO, WORLD HEALTH ORGANIZATION. (2023). General Principles of Food Hygiene.
- Pabast, M., Shariatifar, N., Beikzadeh, S., & Jahed, G. (2018). Effects of chitosan coatings incorporating with free or nano-encapsulated Satureja plant essential oil on quality characteristics of lamb meat. *Food Control*, 91, 185-192.
- Pajohi-Alamoti, M. (2025). *Thymus daenensis* L. essential oil nanoemulsion-enriched chitosan/carboxymethyl cellulose edible coating: Impact on chemical, microbial, and sensory characteristics of the coated beef during refrigerated storage. *Caspian Journal of Veterinary Science*, 2(1), 43-51.
- Papadochristopoulos, A., Kerry, J. P., Fegan, N., Burgess, C. M., Duffy, G. (2021). Natural anti-microbials for enhanced microbial safety and shelf-life of processed packaged meat. *Foods*, 10(7), 1598.
- Parisi G, Tignani MV. 2025. Green ingredients for improving sustainability in poultry production. University of Florence.
- Pateiro, M., Munekata, P. E., Sant'Ana, A. S., Domínguez, R., Rodríguez-Lázaro, D., Lorenzo, J. M. (2021). Application of essential oils as antimicrobial agents against spoilage and pathogenic microorganisms in meat products. *International journal of food microbiology*, 337, 108966.
- Paul, S., El Bethel Lalthavel Hmar, J. H., Zothantluanga, H. K. S. (2020). Essential oils: A review on their salient biological activities and major delivery strategies. *microcirculation*, 5, 9.
- Pavoni, L., Perinelli, D. R., Bonacucina, G., Cespi, M., Palmieri, G. F. (2020). An overview of micro-and nanoemulsions as vehicles for essential oils: Formulation, preparation and stability. *Nanomaterials*, 10(1), 135.

- Pei, R. S., Zhou, F., Ji, B. P., Xu, J. (2009). Evaluation of combined antibacterial effects of eugenol, cinnamaldehyde, thymol, and carvacrol against *E. coli* with an improved method. *Journal of food science*, 74(7), M379-M383.
- Peng, B., Qi, X., Qiao, L., Lu, J., Qian, Z., Wu, C., Kou, X. (2025). Nanocomposite-Enabled Next-Generation Food Packaging: A Comprehensive Review on Advanced Preparation Methods, Functional Properties, Preservation Applications, and Safety Considerations. *Foods*, 14(21), 3688.
- Peng, F., Ke, Y., Lu, S., Zhao, Y., Hu, X., Deng, Q. (2019). Anion amphiphilic random copolymers and their performance as stabilizers for O/W nanoemulsions. *RSC advances*, 9(26), 14692-14700.
- Pepper, A. N., Sriaroon, P., Glaum, M. C. (2020). Additives and preservatives: Role in food allergy. *Journal of Food Allergy (USA)*, 2(1), 119-123.
- Petralito, S., Garzoli, S., Ovidi, E., Laghezza Masci, V., Trilli, J., Bigi, B., Paolicelli, P. (2024). Long-term stability of lavandula x intermedia essential oil nanoemulsions: can the addition of the ripening inhibitor impact the biocidal activity of the nanoformulations?. *Pharmaceutics*, 16(1), 108.
- Pino, J., Rodriguez-Feo, G., Borges, P., Rosado, A. (1990). Chemical and sensory properties of black pepper oil (*Piper nigrum* L.). *Food/Nahrung*, 34(6), 555-560.
- Pirastehfard, M., Fallah, A. A., Habibian Dehkordi, S. (2021). Effect of nanoemulsified canola oil combined with Bakhtiari savory (*Satureja bachtiarica*) essential oil on the quality of chicken breast during refrigerated storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(7), e15609.
- Porter, J. A., Morey, A., Monu, E. A. (2020). Antimicrobial efficacy of white mustard essential oil and carvacrol against *Salmonella* in refrigerated ground chicken. *Poultry science*, 99(10), 5091-5095.
- Pösö, A. R., Puolanne, E. (2005). Carbohydrate metabolism in meat animals. *Meat science*, 70(3), 423-434.
- Prakash, B., Kiran, S. (2016). Essential oils: a traditionally realized natural resource for food preservation. *Current Science*, 110(10), 1890-1892.
- Quansah, J. K., Saalia, F. K. (2024). Chemistry of Food Additives: Preservatives. In *Food Additives-From Chemistry to Safety*. IntechOpen.
- Rahman, M. S. (2014). Hurdle technology in food preservation. In *Minimally processed foods: technologies for safety, quality, and convenience* (pp. 17-33). Cham: Springer International Publishing.
- Rana, S. B. (2017). Influence of CTAB assisted capping on the structural and optical properties of ZnO nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(18), 13787-13796.
- Rather, J. A., Kaur, G., Shah, I. A., Majid, D., Makroo, H. A., Dar, B. N. (2024). Sustainable gelatin-based packaging with nanoemulsified chilli seed oil for enhancing poultry meat preservation: An eco-friendly approach. *Food Chemistry Advances*, 5, 100761.
- Rather, S. A., Masoodi, F. A., Rather, J. A., Gani, A., Wani, S. M., Ganaie, T. A., Akhter, R. (2021). Impact of thermal processing and storage on fatty acid composition and cholesterol oxidation of canned traditional low-fat meat product of India. *LWT*, 139, 110503.
- Rathod, N. B., Meral, R., Siddiqui, S. A., Nirmal, N., Ozogul, F. (2024). Nanoemulsion-based approach to preserve muscle food: A review with current knowledge. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(19), 6812-6833.
- Ravindran, V. (2013). Poultry feed availability and nutrition in developing countries. *Poultry development review*, 2(11), 60-63.
- Rebezov, M., Khayrullin, M., Assenova, B., Farida, S., Baydan, D., Garipova, L., Rodionova, S. (2024). Improving meat quality and safety: innovative strategies. *Slovak Journal of Food Sciences*, 18.
- Ren, J., Li, Z., Li, X., Yang, L., Bu, Z., Wu, Y., Meng, X. (2025). Exploring the Mechanisms of the Antioxidants BHA, BHT, and TBHQ in Hepatotoxicity, Nephrotoxicity, and Neurotoxicity from the Perspective of Network Toxicology. *Foods*, 14(7), 1095.
- Ribes, S., Fuentes, A., Talens, P., Barat, J. M., Ferrari, G., Donsì, F. (2017). Influence of emulsifier type on the antifungal activity of cinnamon leaf, lemon and bergamot oil nanoemulsions against *Aspergillus niger*. *Food Control*, 73, 784-795.
- Ricardo-Rodrigues, S., Rouxinol, M. I., Aguilheiro-Santos, A. C., Potes, M. E., Laranjo, M., Elias, M. (2024). The antioxidant and antibacterial potential of thyme and clove essential oils for meat preservation—An overview. *Applied Biosciences*, 3(1), 87-101.

- Rimini, S., Petracci, M., Smith, D. P. (2014). The use of thyme and orange essential oils blend to improve quality traits of marinated chicken meat. *Poultry Science*, 93(8), 2096-2102.
- Rivera de la Cruz, J. F., Schelegueda, L. I., Delcarlo, S. B., Gliemmo, M. F., Campos, C. A. (2023). Antimicrobial Activity of Essential Oils in Vapor Phase In Vitro and Its Application in Combination with Lactic Acid to Improve Chicken Breast Shelf Life. *Foods*, 12(22), 4127.
- Rouger, A., Tresse, O., Zagorec, M. (2017). Bacterial contaminants of poultry meat: sources, species, and dynamics. *Microorganisms*, 5(3), 50.
- Rousseau, B. (2004). Sensory evaluation techniques. *FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY-NEW YORK-MARCEL DEKKER*, 138(1), 21.
- Sanei, S., Shahab Lavasani, A., Khorshidian, N. (2025). Active packaging of meat products: a systematic review. *Nutrition & Food Science*, 55(4), 734-752.
- Sayadi, M., Eskandari, Z., Jafarpour, D., Jamali, N. (2024). Effect of sage seed gum edible coating incorporated with leaves of lemon verbena (*Aloysia citrodora*) essential oil nanoemulsion on chemical, microbial and sensory properties of fresh Turkey meat. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(8), 6816-6828.
- Shafiq-un-Nabi, S., Shakeel, F., Talegaonkar, S., Ali, J., Baboota, S., Ahuja, A., Ali, M. (2007). Formulation development and optimization using nanoemulsion technique: a technical note. *AAPS pharmscitech*, 8(2), 28.
- Shakil, M. H., Trisha, A. T., Rahman, M., Talukdar, S., Kobun, R., Huda, N., Zzaman, W. (2022). Nitrites in cured meats, health risk issues, alternatives to nitrites: A review. *Foods*, 11(21), 3355.
- Shankar, S., Karboune, S., Salmieri, S., Lacroix, M. (2022). Development of antimicrobial formulation based on essential oils and gamma irradiation to increase the shelf life of boneless chicken thighs. *Radiation Physics and Chemistry*, 192, 109893.
- Sharma, H., Mendiratta, S. K., Agrawal, R. K., Talukder, S., Kumar, S. (2018). Studies on the potential application of various blends of essential oils as antioxidant and antimicrobial preservatives in emulsion based chicken sausages. *British Food Journal*, 120(7), 1398-1411.
- Sheerzad, S., Khorrami, R., Khanjari, A., Gandomi, H., Basti, A. A., Khansavar, F. (2024). Improving chicken meat shelf-life: Coating with whey protein isolate, nanochitosan, bacterial nanocellulose, and cinnamon essential oil. *Lwt*, 197, 115912.
- Shekarforoush, S. S., Basiri, S., Ebrahimnejad, H., Hosseinzadeh, S. (2015). Effect of chitosan on spoilage bacteria, *Escherichia coli* and *Listeria monocytogenes* in cured chicken meat. *International Journal of Biological Macromolecules*, 76, 303-309.
- Shi, C., Jia, L., Tao, H., Hu, W., Li, C., Aziz, T., Lin, L. (2024). Fortification of cassava starch edible films with *Litsea cubeba* essential oil for chicken meat preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 276, 133920.
- Shu, H., Chen, H., Wang, X., Hu, Y., Yun, Y., Zhong, Q., Chen, W. (2019). Antimicrobial activity and proposed action mechanism of 3-Carene against *Brochothrix thermosphacta* and *Pseudomonas fluorescens*. *Molecules*, 24(18), 3246.
- Siddique, S., Parveen, Z., Mazhar, S. (2020). Chemical composition, antibacterial and antioxidant activities of essential oils from leaves of three *Melaleuca* species of Pakistani flora. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 67-74.
- Silva, M. M., Lidon, F. C. (2016). Food preservatives-An overview on applications and side effects. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 28(6), 366.
- Sime, A. G. (2022). Review on poultry production, processing, and utilization in Ethiopia. *Int J Agricultural Sci Food Technol*, 8(2), 147-52.
- Singh, S., Kapoor, I. P. S., Singh, G., Schuff, C., De Lampasona, M. P., Catalan, C. A. (2013). Chemistry, antioxidant and antimicrobial potentials of white pepper (*Piper nigrum* L.) essential oil and oleoresins. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 83(3), 357-366.
- Smaoui, S., Hsouna, A. B., Lahmar, A., Ennouri, K., Mtibaa-Chakchouk, A., Sellem, I., Mellouli, L. (2016). Bio-preservative effect of the essential oil of the endemic *Mentha piperita* used alone and in combination with BacTN635 in stored minced beef meat. *Meat science*, 117, 196-204.

- Snoussi, A., Chouaibi, M., Koubaier, H. B. H., Bouzouita, N. (2022). Encapsulation of Tunisian thyme essential oil in O/W nanoemulsions: Application for meat preservation. *Meat Science*, 188, 108785.
- Snoussi, M., Noumi, E., Trabelsi, N., Flamini, G., Papetti, A., De Feo, V. (2015). *Mentha spicata* essential oil: Chemical composition, antioxidant and antibacterial activities against planktonic and biofilm cultures of *Vibrio* spp. strains. *Molecules*, 20(8), 14402-14424.
- Šojić, B., Milošević, S., Savanović, D., Zeković, Z., Tomović, V., Pavlić, B. (2023). Isolation, bioactive potential, and application of essential oils and terpenoid-rich extracts as effective antioxidant and antimicrobial agents in meat and meat products. *Molecules*, 28(5), 2293.
- Šojić, B., Pavlić, B., Zeković, Z., Tomović, V., Ikonić, P., Kocić-Tanackov, S., Džinić, N. (2018). The effect of essential oil and extract from sage (*Salvia officinalis* L.) herbal dust (food industry by-product) on the oxidative and microbiological stability of fresh pork sausages. *LWT*, 89, 749-755.
- Solans, C., Solé, I. (2012). Nano-emulsions: Formation by low-energy methods. *Current opinion in colloid & interface science*, 17(5), 246-254.
- Sousa, V. I., Parente, J. F., Marques, J. F., Forte, M. A., Tavares, C. J. (2022). Microencapsulation of essential oils: A review. *Polymers*, 14(9), 1730.
- Souza, V. G. L., Rodrigues, C., Valente, S., Pimenta, C., Pires, J. R. A., Alves, M. M., Fernando, A. L. (2020). Eco-friendly ZnO/Chitosan bionanocomposites films for packaging of fresh poultry meat. *Coatings*, 10(2), 110.
- ISO, International Organization for Standardization. (2022). *Microbiology of the Food Chain: Horizontal Method for the Enumeration of Microorganisms--Part 1: Colony Count at 30° C by the Pour Plate Technique*. International Organization for Standardization.
- Tang, Q., Xu, F., Wei, X., Gu, J., Qiao, P., Zhu, X., Chen, J. (2023). Investigation of β -caryophyllene as terpene penetration enhancer: Role of stratum corneum retention. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 183, 106401.
- Tang, Z., Chen, H., Zhang, M., Fan, Z., Zhong, Q., Chen, W., Chen, W. (2021). Antibacterial mechanism of 3-Carene against the meat spoilage bacterium *Pseudomonas lundensis* and its application in pork during refrigerated storage. *Foods*, 11(1), 92.
- Teshome, E., Forsido, S. F., Rupasinghe, H. V., Olika Keyata, E. (2022). Potentials of natural preservatives to enhance food safety and shelf life: A review. *The Scientific World Journal*, 2022(1), 9901018.
- Turgis, M., Han, J., Caillet, S., Lacroix, M. (2009). Antimicrobial activity of mustard essential oil against *Escherichia coli* O157: H7 and *Salmonella typhi*. *Food control*, 20(12), 1073-1079.
- Uedo, N., Tatsuta, M., Iishi, H., Baba, M., Sakai, N., Yano, H., Otani, T. (1999). Inhibition by d-limonene of gastric carcinogenesis induced by N-methyl-N'-nitro-N-nitrosoguanidine in Wistar rats. *Cancer Letters*, 137(2), 131-136.
- Ujilestari, T., Febriantosa, A., Sholikin, M. M., Wahyuningsih, R., Wahyono, T. (2023). Nanoemulsion application in meat product and its functionality. *Journal of Animal Science and Technology*, 65(2), 275.
- Vasiljević, B., Mitić-Ćulafić, D., Djekic, I., Marković, T., Knežević-Vukčević, J., Tomasevic, I., Nikolić, B. (2019). Antibacterial effect of *Juniperus communis* and *Satureja montana* essential oils against *Listeria monocytogenes* in vitro and in wine marinated beef. *Food control*, 100, 247-256.
- Vergis, J., Gokulakrishnan, P., Agarwal, R. K., Kumar, A. (2015). Essential oils as natural food antimicrobial agents: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 55(10), 1320-1323.
- Walia, N., Dasgupta, N., Ranjan, S., Ramalingam, C., Gandhi, M. (2019). Methods for nanoemulsion and nanoencapsulation of food bioactives. *Environmental Chemistry Letters*, 17(4), 1471-1483.
- Wang, H., Qian, J., Ding, F. (2018). Emerging chitosan-based films for food packaging applications. *Journal of agricultural and food chemistry*, 66(2), 395-413.
- Wang, L., Dekker, M., Heising, J., Zhao, L., Fogliano, V. (2024). Food matrix design can influence the antimicrobial activity in the food systems: A narrative review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 64(25), 8963-8989.
- Wang, M., Chittiboyina, A. G., Parcher, J. F., Ali, Z., Ford, P., Zhao, J., Khan, I. A. (2019). Piper nigrum oil—determination of selected terpenes for quality evaluation. *Planta medica*, 85(03), 185-194.

- Wang, W., Li, T., Chen, J., Ye, Y. (2023). Inhibition of Salmonella Enteritidis by essential oil components and the effect of storage on the quality of chicken. *Foods*, 12(13), 2560.
- Wang, W., Zhao, D., Xiang, Q., Li, K., Wang, B., Bai, Y. (2021a). Effect of cinnamon essential oil nanoemulsions on microbiological safety and quality properties of chicken breast fillets during refrigerated storage. *Lwt*, 152, 112376.
- Wang, X., Wang, Z., Zhuang, H., Nasiru, M. M., Yuan, Y., Zhang, J., Yan, W. (2021b). Changes in color, myoglobin, and lipid oxidation in beef patties treated by dielectric barrier discharge cold plasma during storage. *Meat Science*, 176, 108456.
- Wang, Y. X., Sun, J., Fan, X., Yu, X. (2011). A CTAB-assisted hydrothermal and solvothermal synthesis of ZnO nanopowders. *Ceramics International*, 37(8), 3431-3436.
- Wang, Y., Wang, L., Tan, J., Li, R., Jiang, Z. T., Tang, S. H. (2021c). Comparative analysis of intracellular and in vitro antioxidant activities of essential oil from white and black pepper (*Piper nigrum* L.). *Frontiers in Pharmacology*, 12, 680754.
- Windhorst, H. W. (2017). Dynamics and patterns of global poultry-meat production. In *Poultry quality evaluation* (pp. 1-25). Woodhead Publishing.
- Windhorst, H. W. (2006). Changes in poultry production and trade worldwide. *World's Poultry Science Journal*, 62(4), 585-602.
- Xavier, L. O., Sganzerla, W. G., Rosa, G. B., da Rosa, C. G., Agostinetto, L., de Lima Veeck, A. P., Nunes, M. R. (2021). Chitosan packaging functionalized with Cinnamodendron dinisii essential oil loaded zein: A proposal for meat conservation. *International journal of biological macromolecules*, 169, 183-193.
- Xu, F., Shi, Y., Li, B., Liu, C., Zhang, Y., Zhong, J. (2024a). Characterization, stability and antioxidant activity of vanilla nano-emulsion and its complex essential oil. *Foods*, 13(5), 801.
- Xu, Y., Xin, J., Lyu, Y., Zhang, C. (2024). Effects of bacterial cellulose/thyme essential oil emulsion coating on the shelf life of chilled chicken meat. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(9), 5577-5587.
- Yaghoubi, M., Ayaseh, A., Alirezalu, K., Nemati, Z., Pateiro, M., Lorenzo, J. M. (2021). Effect of chitosan coating incorporated with Artemisia fragrans essential oil on fresh chicken meat during refrigerated storage. *Polymers*, 13(5), 716.
- Yang, X., Zhao, D., Ge, S., Bian, P., Xue, H., Lang, Y. (2023). Alginate-based edible coating with oregano essential oil/ β -cyclodextrin inclusion complex for chicken breast preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 251, 126126.
- Youssef, A. M., El-Sayed, H. S., El-Sayed, S. M., Fouly, M., El-Aziz, M. A. (2023). Novel bionanocomposites based on cinnamon nanoemulsion and TiO₂-NPs for preserving fresh chicken breast fillets. *Food and Bioprocess Technology*, 16(2), 356-367.
- Yu, H., Ma, Z., Wang, J., Lu, S., Cao, D., Wu, J. (2023). Effects of thyme essential oil microcapsules on the antioxidant and quality characteristics of mutton patties. *Foods*, 12(20), 3758.
- Yuan, W., Teo, C. H. M., Yuk, H. G. (2019). Combined antibacterial activities of essential oil compounds against Escherichia coli O157: H7 and their application potential on fresh-cut lettuce. *Food Control*, 96, 112-118.
- Zampiga, M., Calini, F., Sirri, F. (2021). Importance of feed efficiency for sustainable intensification of chicken meat production: implications and role for amino acids, feed enzymes and organic trace minerals. *World's Poultry Science Journal*, 77(3), 639-659.
- Zengin, H., Baysal, A. H. (2014). Antibacterial and antioxidant activity of essential oil terpenes against pathogenic and spoilage-forming bacteria and cell structure-activity relationships evaluated by SEM microscopy. *Molecules*, 19(11), 17773-17798.
- Zhang, J., Wang, Y., Pan, D. D., Cao, J. X., Shao, X. F., Chen, Y. J., Ou, C. R. (2016). Effect of black pepper essential oil on the quality of fresh pork during storage. *Meat Science*, 117, 130-136.
- Zhang, J., Ye, K. P., Zhang, X., Pan, D. D., Sun, Y. Y., Cao, J. X. (2017a). Antibacterial activity and mechanism of action of black pepper essential oil on meat-borne Escherichia coli. *Frontiers in microbiology*, 7, 2094.

- Zhang, M., Nowak, M., Malo de Molina, P., Abramovitch, M., Santizo, K., Mitragotri, S., Helgeson, M. E. (2017b). Synthesis of oil-laden poly (ethylene glycol) diacrylate hydrogel nanocapsules from double nanoemulsions. *Langmuir*, 33(24), 6116-6126.
- Zheng, K., Li, B., Liu, Y., Wu, D., Bai, Y., Xiang, Q. (2023). Effect of chitosan coating incorporated with oregano essential oil on microbial inactivation and quality properties of refrigerated chicken breasts. *Lwt*, 176, 114547.
- Zhou, G. H., Xu, X. L., Liu, Y. (2010). Preservation technologies for fresh meat—A review. *Meat science*, 86(1), 119-128.
- Zixiang, W., Jingjing, Z., Huachen, Z., Ning, Z., Ruiyan, Z., Lanjie, L., Guiqin, L. (2021). Effect of nanoemulsion loading a mixture of clove essential oil and carboxymethyl chitosan-coated ϵ -polylysine on the preservation of donkey meat during refrigerated storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(9), e15733.

