T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MATEMATİK VE FEN BİLİMLERİ EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ÖZÜT DESTEKLİ HALOKROMİK HİDROJEL FİLMLER İLE BEYAZ ETİN BOZULMASININ FİZİKSEL AÇIDAN TESPİTİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERVE ÇOLPAN

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. YELİZ ÖZÜDOĞRU

ÇANAKKALE - 2026

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MATEMATİK VE FEN BİLİMLERİ EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ÖZÜT DESTEKLİ HALOKROMİK HİDROJEL FİLMLER İLE BEYAZ ETİN BOZULMASININ FİZİKSEL AÇIDAN TESPİTİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERVE ÇOLPAN

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. YELİZ ÖZÜDOĞRU

ÇANAKKALE – 2026

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Merve ÇOLPAN tarafından Doç. Dr. Yeliz ÖZÜDOĞRU yönetiminde hazırlanan ve **22/01/2026** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan "**Özüt Destekli Halokromik Hidrojel Filmler ile Beyaz Etin Bozulmasının Fiziksel Açıdan Tespiti**" başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Doç. Dr. Yeliz ÖZÜDOĞRU (Danışman)	……
Prof. Dr. Fatih DOĞAN	……
Prof. Dr. Kamil ŞİRİN	……

Tez No : 10786686
Tez Savunma Tarihi : 22 /01 /2026

……
Prof. Dr. Melis ULU DOĞRU
Enstitü Müdürü

../../2026

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları' na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Merve ÇOLPAN
22/01/2026

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, çalışmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen, değerli bilgilerini, desteğini ve emeklerini benimle paylaşan saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Yeliz ÖZÜDOĞRU' ya, uygulamalarımın bir kısmında çalışma alanını, gereçlerini ve yardımlarını koşulsuzca benimle paylaşan sayın hocam Prof. Dr. Ömer Faruk ÖZTÜRK' e, çalışmamın kromatografik ve optik analizleri için destek olan Kimya Bölümü Doktora öğrencisi olan saygıdeğer dostum Fatih MUTLU' ya ve son olarak çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve desteklerini esirgemeyen eşim Mustafa ÇOLPAN' a ve hayatımın her evresinde bana destek olan canım annem ve babam başta olmak üzere bütün değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım."

Merve ÇOLPAN

Çanakkale, Ocak 2026

ÖZET

ÖZÜT DESTEKLİ HALOKROMİK HİDROJEL FİLMLER İLE BEYAZ ETİN BOZULMASININ FİZİKSEL AÇIDAN TESPİTİ

Merve ÇOLPAN
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Doç. Dr. Yeliz ÖZÜDOĞRU
22/01/2026, 63

Bu tez çalışmasında, akıllı etiketler için halokromik özellik gösteren bitkilerden elde edilen özütler kullanılarak kitosan destekli hidrojel filmler geliştirilmiştir. Amaç, elde edilen akıllı etiketlerle pH değişimlerine bağlı olarak beyaz etlerin kesim sonrası geçen süreye ilişkin görsel indikatör tasarlamak ve ette olabilecek bozulma sürecini izlemektir. Çalışma kapsamında, hibiskus (Hibiscus Sabdariffa), zeytin yaprağı (Olea Europaea) ve biberiye (Rosmarinus Officinalis) bitkilerine çözünürlük testi uygulanmış, ardından bitkiler temizlenip kurutulmuştur. Kurutulan bitkiler havanda öğütülerek yüzey alanları artırılmış ve etil alkolle çözülerek ekstraksiyon yöntemiyle özütler elde edilmiştir. Elde edilen özütler, rotary evaporatör ile etil alkolden arındırılmış ve TLC ile etanol içerip içermedikleri kontrol edilmiştir. Ayrıca, kitosan asetik asit çözeltisinde çözünerek %2'lik glutaraldehit çözeltisi ile karıştırılmış ve jel kıvamına getirilmiştir. Kitosan matrisli hidrojel çözeltilerine bitkisel özütler entegre edilerek homojen hale getirilmiş ve film haline getirilmek üzere etüvde kurutulmuştur. Elde edilen hidrojel filmlerinin özellikleri, Fourier Transformed İnfrared (FTIR) spektroskopisi ile ve yüzey özelliklerini incelemek üzere Scanning Electron Microscope (SEM) ile analiz edilmiştir. Çalışmanın sonunda, pH değişimlerini ve enfeksiyon riskini simule eden çözeltiler hazırlanarak elde edilen filmler üzerine uygulanmış ve renk değişimleri üzerinden kesim sonrası geçen süreç ve bozulma oluşturabilecek mikrobiyolojik süreçler değerlendirilmiştir. Simulatif çözeltilerle yapılan çalışma sonrası beyaz et değişimlerini gözlemlemek üzere tavuk eti üzerinde de uygulama yapılmış, filmlerin renk ve yüzey özellikleri değişimleri incelenmiştir. Sonuç olarak, özüt ilave edilmiş kitosan destekli hidrojel filmlerinin, gıda endüstrisinde akıllı etiket olarak kullanılabileceği

ve beyaz etin kesimi ile mikrobik bozulmaların takibi açısından faydalı olabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı Etiket, Kitosan, Hidrojel, Halokromik Madde, Beyaz Et.

ABSTRACT

PHYSICAL DETECTION OF WHITE MEAT DETERIORATION USING EXTRACT- SUPPORTED HALOCHROMIC HYDROGEL FILMS

Merve ÇOLPAN

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Master of Science Thesis in Mathemathics and Science Education

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Yeliz ÖZÜDOĞRU

22/01/2026, 63

This study focuses on the development of chitosan-based hydrogel films for smart labels using extracts from plants that exhibit halochromic properties. The primary objective is to investigate the cutting times of white meat and detect potential spoilage based on pH changes. In the study, Hibiscus (Hibiscus Sabdariffa), olive leaves (Olea Europaea), and rosemary (Rosmarinus Officinalis) were first subjected to solubility tests. The plants were then washed with distilled water, cleaned, and dried in an oven to remove moisture. To increase the surface area for extraction, the dried plants were ground using a mortar and pestle. The ground plants were dissolved in ethyl alcohol, and the plant extracts were obtained via the extraction method. The ethyl alcohol in the solutions was removed using a rotary evaporator, and the extracts were obtained with a high degree of purity. Thin Layer Chromatography (TLC) analysis was performed to verify the presence of ethanol in the extracts. Concurrently, chitosan was dissolved in acetic acid, and a 2% glutaraldehyde solution was added to facilitate gel formation using a magnetic stirrer. The hydrogel solution was divided into three portions, and the plant extracts were mixed homogeneously with the solution in a magnetic stirrer for a period of time. The mixture was then poured into Petri dishes and dried in an oven to form films. After the hydrogel films were obtained, their molecular and surface properties were analyzed using Fourier Transformed Infrared (FTIR) spectroscopy and Scanning Electron Microscope (SEM). Simulating Solutions representing pH changes and potential infection-related alterations were prepared and applied to the films after drying.

Color changes were monitored to analyze cutting dates and the likelihood of microbial processes. After simulating solutions applications, extract-supported halochromic hydrogel films were applied also on white meat and all the surface texture and color changes were recorded. The results indicated that the chitosan-based hydrogel films with plant extracts could be used as smart labels in the food industry, providing useful information about the cutting time and the onset of microbial activity in white meat.

Keywords: Smart labels, Chitosan, Hydrogel, Halochromic Plants, White Meat.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

JÜRİ ONAY SAYFASI i
ETİK BEYAN ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZET iv
ABSTRACT v
İÇİNDEKİLER vii
SİMGELER ve KISALTMALAR xi
TABLOLAR DİZİNİ xii
ŞEKİLLER DİZİNİ xiii

BİRİNCİ BÖLÜM
GİRİŞ

1.1. Gıda Güvenliği ve Beyaz Et Ürünlerinde Bozulma Problemi 1
1.2. Beyaz Etlerde pH Değişimi ve Mikrobiyal Bozulma İlişkisi 2
1.3. Geleneksel Tazelik Belirleme Yöntemleri ve Sınırlılıkları 4
1.4. Akıllı Ambalaj ve Akıllı Etiket Sistemleri 4
1.5. Biyobozunur Malzemeler ve Kitosan Esaslı Hidrojeller 5
1.6. Halokromik Sistemler ve Bitkisel Özütlerin Akıllı Etiketlerde Kullanımı 5
1.7. Çalışmanın Literatürdeki Yeri ve Önemi 6
1.8. Çalışmanın Amacı, Kapsamı ve Hipotezi 6

İKİNCİ BÖLÜM
KURAMSAL ÇERÇEVE 8

2.1. Gıda Zehirlenmesi ve Mikrobiyal Gelişim ile Beyaz Et Bozulma Mekanizması .. 8
2.2. Beyaz Etlerde Bozulma Mekanizması ve Ph Değişimi: Uçucu Aminler, Renk, Koku, Tekstür Değişimleri 9
2.3. Gıda Tazelik ve Bozulma Tespit Yöntemleri 14
2.4. Akıllı Ambalajlama ve Akıllı Etiket Sistemleri 15
2.5. Hidrojel Filmler 16

2.5.1. Hidrojellerin Yapısı ve Özellikleri 17
2.5.2. Ambalajlamada Kullanım Örnekleri ve Hidrojel Tabanlı Akıllı Etiket Sistemleri 18
2.5.3. Kitosan Bazlı Hidrojeller 18
2.5.4. Halokromik Sistemler ve Doğal İndikatörler 20
2.5.5. Antosiyaninler 21
2.5.6. Polifenoller ve Fenolik Bileşikler 23
2.5.7. Oleuropein 24
2.6. Literatürdeki Boşluk ve Çalışmanın Konumu 26

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA YÖNTEMİ 28

3.1. Araştırma Tasarımı 28
3.2. Kullanılan Materyaller 28
3.3. Bitki Özütlerinin Hazırlanması 29
3.4. Bitki Özütlerinin Halokromik Özelliklerinin İncelenmesi 31
3.5. Bitki Özütlerinin Kitosan Çözeltisinde Çözünürlüklerinin İncelenmesi 32
3.6. Hidrojel Matrisinin Hazırlanması 32
3.7. Özüt Destekli Hidrojel Filmlerin Hazırlanması 33
3.8. Spektroskopik Analiz- FTIR 34
3.9. Morfolojik Analiz- SEM 34
3.10. Özüt Entegre Edilmiş Hidrojellerin pH Duyarlılığı ve Renk Değişimi Gözlemleri 34
3.11. Özüt Entegre Edilmiş Hidrojellerin Tavuk Eti üzerinde Renk Değişimi Gözlemleri 35

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA BULGULARI 37

4.1. Hidrojel Filmlerin Spektroskopik Analizi- FTIR 37
4.2. Hidrojel Filmlerin Morfolojik Analizi- SEM 44

4.3. Hidrojel Filmlerin Renk Değişimi İle Etin Bozulmasının Simulatif Çözeltiler İle Fiziksel Açıdan Tespiti (pH Duyarlılığı ve Renk Değişimi Bulguları)..... 45
4.4. Hidrojel Filmlerin Renk Değişimi İle Etin Bozulmasının Tavuk Eti Üzerinden Fiziksel Açıdan Tespiti (pH Duyarlılığı ve Renk Değişimi Bulguları)..... 48
4.5. Bulguların Beyaz Et Bozulması Açısından Değerlendirilmesi..... 49

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ VE ÖNERİLER 51

5.1. Sonuç..... 51
5.2. Öneriler..... 53
KAYNAKÇA 55

SİMGELER VE KISALTMALAR

%	Yüzde oranı
^{0}C	Santigrat derece
ATP	Adenozintrifosfat
Bib.	Biberiye
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
g	Gram
Hib.	Hibisküs
mg	Miligram
mL	Mililitre
pH	Asitlik-bazlık katsayısı (Power of Hydrogen)
rpm	Dakikadaki Devir Sayısı (Revolutions per Minute)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
T.C.	Türkiye Cumhuriyeti Devleti
TLC	İnce Tabaka Kromatografisi (Thin Layer Chromatography)
UV	Ultraviyole (Ultraviolet)
Zyty.	Zeytin yaprağı

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	Kesimden sonra ilk 48 saat içerisinde et kasında glikojen, laktik asit, pH, ATP ve kreatin fosfat seviyelerindeki değişimler	12
Tablo 2	Kırmızı ve beyaz ette bozulmaya neden olan bakteriler	13
Tablo 3	Hidrojel Filmlerin FTIR spektrumunda gözlenen karakteristik pikler ve atamaları	40
Tablo 4	Hidrojel Filmlerin FTIR spektrumunda gözlenen karakteristik piklerin karşılaştırılması	43
Tablo 5	Özütlerin pH tepkilerinin renk değişimleri ile gösterimi	52

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Glikoz-6-fosfat metabolizması ve canlı ölümü sonrası pH düşmesini gösteren laktik asit oluşumu	11
Şekil 2	Akıllı etiket	16
Şekil 3	Hidrojel	16
Şekil 4	Çapraz bağlı hidrojelin yapısı	18
Şekil 5	Kitin (a) ve Kitosan (b) ın kimyasal yapıları	20
Şekil 6	Hibiscus sabdariffa.	22
Şekil 7	H. sabdariffa L. ekstraktlarının total antioksidan aktivitesi	22
Şekil 8	Oleuropein ve Hidroksitirozolün yapısal formülü ve Oleuropeinin mekanizması	26
Şekil 9	Sırasıyla biberiye, hibiskus ve zeytin yapraklarının hazırlanış süreci	29
Şekil 10	Bitkilerin etüve konulması	29
Şekil 11	Zeytin yaprağının havanda dövülmesi	29
Şekil 12	Sırasıyla biberiye, zeytin yaprağı ve hibiskusun etanolde çözünmesi	30
Şekil 13	Sırasıyla etanolde çözülmüş hibiskus ve biberiyenin filtre kağıdıyla süzme işlemi	30
Şekil 14	Hibiskus, biberiye ve etanolün TLC testi ve Rotary Evaporatör de çözeltinin etil alkolden ayrılması sağlanarak özüte ulaşma	31
Şekil 15	Sırasıyla biberiye, hibiskus ve zeytin yaprağı özütlerinin asit ve baz çözeltilerinde gösterdiği renk değişimleri	31
Şekil 16	Sırasıyla hibiskus ve biberiye özütlerinin hidrojelde çözünme sürecinin test edilmesi	32
Şekil 17	Hidrojelin hazırlanma süreci	33
Şekil 18	Sırasıyla hibiskus, zeytin yaprağı ve biberiye özütleri entegre edilmiş hidrojel filmler	33
Şekil 19	Simulatif asit baz çözeltilerinin pH metre ile hazırlanma süreci	34
Şekil 20	Farklı pH larda simulatif çözeltiler ve özütlü hidrojel filmler	35
Şekil 21	Özütsüz Hidrojel FTIR analizi	38

Şekil 22	Hibiskus özütlü Hidrojel FTIR Analizi	38
Şekil 23	Biberiye özütlü Hidrojel FTIR Analizi	38
Şekil 24	Zeytin Yaprağı özütlü Hidrojel FTIR Analizi	39
Şekil 25	Bütün hidrojel filmlerin FTIR spektrumları	42
Şekil 26	Kontrol (özütsüz) ve bitki özütü içeren hidrojel filmlerin SEM görüntüleri	45
Şekil 27	Hibisküs asidik ortam	46
Şekil 28	Hibisküs bazik ortam	46
Şekil 29	Biberiye asidik ortam	47
Şekil 30	Biberiye bazik ortam	47
Şekil 31	Zeytin yaprağı asidik ortam	47
Şekil 32	Zeytin yaprağı bazik ortam	47
Şekil 33	Hibiskus özütü içeren hidrojel filmin tavuk eti yüzeyinde depolama süresine bağlı renk değişimi	48
Şekil 34	Biberiye özütü içeren hidrojel filmin tavuk eti yüzeyinde depolama süresine bağlı renk değişimi	49
Şekil 35	Zeytin yaprağı özütü içeren hidrojel filmin tavuk eti yüzeyinde depolama süresine bağlı renk değişimi	49

BİRİNCİ BÖLÜM
GİRİŞ

Gıda güvenliği, özellikle beyaz et ürünleri gibi bozulmaya yüksek derecede duyarlı gıdaların korunmasında kritik bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Piliç eti, yüksek su aktivitesi ve uygun pH aralığı nedeniyle mikrobiyal, enzimatik ve kimyasal bozulmalara karşı hassas olup, üretimden tüketime kadar geçen süreçte etkin izleme ve kontrol sistemlerinin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda geliştirilen akıllı ambalaj ve etiket teknolojileri, ürünün tazelik ve güvenilirlik durumunu görsel sinyaller aracılığıyla izleyebilme kapasitesiyle hem halk sağlığının korunmasına hem de gıda israfının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Doğal bitkisel özütler ve kitosan esaslı hidrojellerin kullanımıyla geliştirilen bu yenilikçi sistemler, beyaz etin kesim tarihi ve mikrobiyal bozulma süreçlerinin pH değişimleri üzerinden güvenilir biçimde takip edilmesine olanak tanımakta ve literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

1.1. Gıda Güvenliği ve Beyaz Et Ürünlerinde Bozulma Problemi

Gıda sektöründe piliç eti gibi bozulmaya duyarlı gıda ürünlerinin uygun koşullarda muhafaza edilmesi ve raf ömrünün uzatılması amacıyla, ambalajlama alanında farklı iyileştirme yaklaşımları uygulanmakta ve bu doğrultuda yeni teknolojilerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar sürdürülmektedir. Akıllı etiket ve ambalajlama çalışmaları da bu çabanın bir ürünüdür. Burada temel amaç, piliç etinin etkili bir şekilde korunmasını sağlamak, böylece halk sağlığını korumak ve ekonomik kayıpları minimize etmektir (Pavlath ve Orts, 2009).

Gıda güvenliği ve gıda kalitesinin korunması, artan dünya nüfusu ve küresel gıda tedarik zincirinin karmaşıklaşmasıyla birlikte günümüzde daha da önemli hale gelmiştir (FAO, 2019; WHO, 2020). Özellikle beyaz et gibi protein açısından zengin, yüksek su aktivitesine (0,98–0,99) ve bozulmaya elverişli pH aralığına (5,5–6,5) sahip ürünler, üretimden tüketime kadar geçen süreçte mikrobiyal, enzimatik ve kimyasal bozulmalara karşı oldukça hassastır (Lawrie ve Ledward, 2006; Jay, Loessner ve Golden, 2005). Bu bozulma süreçleri sırasında ürünün pH değeri, renk, koku ve doku gibi kalite parametrelerinde belirgin değişimler meydana gelmektedir (Toldrá, 2006; Zhou, vd., 2010).

Beyaz et ürünlerinin kolay bozulan yapısı, bu ürünlerin güvenli şekilde tüketiciye ulaştırılabilmesi için etkin izleme ve kontrol sistemlerinin kullanılmasını gerekli kılmaktadır (Toldrá ve Reig, 2011; Zhou, vd., 2010). Aksi takdirde halk sağlığı açısından risk oluşturabilecek mikrobiyal gelişmeler ve ekonomik kayıplar ortaya çıkabilmektedir.

Akıllı etiketlerle ilgili yapılan çalışmalar daha çok bu etiketleri oluşturan maddelerin özelliklerinin geliştirilmesi ve ürünlerin raf ömürlerini arttırmaya yönelik olduğu görülmektedir (Kerry vd., 2006; Kuswandi vd., 2011). Bu çalışmada literatür taraması yapılırken akıllı etiket çalışmalarında etin kesim sürecini izleme ve mikrobik oluşumları hakkında fikir veren çalışmaların yeterince yapılmadığının fark edilmesi araştırmaların bu alanda yoğunlaştırılmasına karar verilmiştir. Bu süreçte; kitosan destekli ve bitkisel halokromik özüt emilimi yardımıyla pH indikatörü özellik gösteren hidrojel filmlerden akıllı etiket oluşturmaya ve oluşturulan filmlerle beyaz etin kesim sürecini izleme ve tazelik durumu hakkında bilgi vermeye yönelik ön fizibilite çalışması yapmaya ve pilot ölçekli değerlendirme oluşturmaya yönlendirmiştir.

1.2. Beyaz Etlerde pH Değişimi ve Mikrobiyal Bozulma İlişkisi

Beyaz etin kalite değerlendirmesi; fiziksel, duyusal ve mikrobiyolojik nitelikler temel alınarak yapılmaktadır. Duyusal kalite kriterleri; etin rengi, doku yapısı (sertlik–yumuşaklık), lezzeti ve sululuk düzeyi gibi özellikleri kapsamaktadır. Fiziksel kalite parametreleri ise kas dokusu oranı, su tutma kapasitesi ve pişirme sırasında meydana gelen kütle kaybı gibi özellikler üzerinden tanımlanmaktadır. Söz konusu kalite unsurları, kümes hayvanları etinin genel kalitesini belirleyen başlıca faktörler olup, canlı hayvanın büyüme hızı ve vücut kompozisyonu ile doğrudan ilişkilidir (Duclos vd., 2007). Tüketicilerin çiğ et tercihinde en belirleyici kriterlerden biri etin rengi olup, bu özellik büyük ölçüde miyoglobin pigmentinin varlığına bağlıdır (Faustman ve Cassens, 1990; Mancini ve Hunt, 2005).

Miyoglobin, et dokusunda farklı formlarda bulunabilen bir pigment olup; miktarı etin türüne, kas yapısına ve hayvanın yaşına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Piliç etinde miyoglobin düzeyi oldukça düşük olup yaklaşık 0,01 mg/g civarında iken, sığır etinde bu değer genellikle 3–6 mg/g aralığında rapor edilmektedir (Fletcher, 1999; Walsh ve Kerry,

2002). Fletcher (1999) tarafından yapılan çalışmada, piliç etinin renk özellikleri ile pH değeri arasında güçlü bir ilişki olduğu ortaya konmuştur. Bununla birlikte, pH değerinin etin diğer duyusal nitelikleri üzerinde de belirleyici bir rol oynadığı bildirilmektedir. Canlı hayvanda kas dokusunun pH değeri yaklaşık 7,3–7,5 aralığında seyretmekte olup, kesim sonrası kısa süre içerisinde 6,2–6,5 düzeylerine gerilemektedir. Ölüm sertliğinin tamamlanmasının ardından, glikojenin glikoza dönüşümü ve buna bağlı metabolik süreçler sonucunda pH değerinin yaklaşık 5,6 seviyesine kadar düştüğü belirtilmektedir (Kılıçkaya, 2011). Gıda ürünleri, üretimden depolamaya kadar geçen tüm aşamalarda, kendilerine özgü bir mikrobiyal flora ile ilişkilidir. Belirli bir gıdada bulunan mikroorganizmaların gelişim ve çoğalma potansiyeli, çevresel koşullar ve ürün özellikleri dikkate alınarak yüksek doğrulukla öngörülebilmektedir. Ürünün duyusal açıdan kabul edilemez hale geldiği bozulma aşamasında ise, bozulmadan sorumlu mikroorganizmaların oluşturduğu mikrobiyal topluluk ön plana çıkmaktadır. Bu bozulma mikroflorası, gıdada istenmeyen fiziksel, kimyasal ve duyusal değişimlere neden olan mikroorganizmaları kapsamaktadır. Depolama sürecinde mikrobiyal faaliyetlerin artmasıyla birlikte amin ve amonyak gibi bazik bileşiklerin oluşumu pH değerinin tekrar yükselmesine neden olmaktadır. Bu hızlı ve çift yönlü pH değişimi, etin tazelik durumunun değerlendirilmesinde kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Kuramsal incelemede görülen bazı proteolitik ve mezofilik bakteriler enfeksiyon sonrası büyüme sürecinde aminler ve amonyak üreterek yüksek pH aralıkları oluşturma eğilimindedirler (Davidson ve Critzer, 2012).

Buradan yola çıkarak bu çalışmanın ilk aşamasında pH 7'nin altında asidik çözeltiler hazırlayarak kesim sonrası geçen süreye ilişkin görsel indikatör, ikinci aşamasında pH 7'nin üzerinde olan bazik çözeltiler hazırlanarak üretilen akıllı etiketler ile ette meydana gelebilecek bakteriyel süreçlerin literatür üzerinden incelenmesi üzerine çalışılmıştır. Beyaz etlerin bozulma sürecinde, özellikle mikroorganizmaların metabolik faaliyetleri sonucunda uçucu bazik bileşikler (örn. amonyak, trimetilamin) oluşmakta ve bu durum etin pH değerinde artışa neden olmaktadır (Jay, Loessner ve Golden, 2005; Gram ve Dalgaard, 2002). pH' taki bu değişim, etin tazeliğinin ve tüketilebilirliğinin değerlendirilmesinde önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir (Toldrá, 2006; Smolander, 2008).

1.3. Geleneksel Tazelik Belirleme Yöntemleri ve Sınırlılıkları

Geleneksel olarak etin tazeliğinin belirlenmesi; mikrobiyolojik analizler, kimyasal testler ve duyusal değerlendirmeler yoluyla gerçekleştirilmektedir (Jay, Loessner ve Golden, 2005; Toldrá, 2006). Ancak bu yöntemler genellikle zaman alıcı, maliyetli ve uzman personel gerektiren uygulamalardır (Ellis, Brophy ve Murphy, 2019). Ayrıca bu analizlerin büyük bir kısmı tüketici tarafından doğrudan uygulanabilir nitelikte değildir (Smolander, 2008). Bu durum, özellikle raflardaki ürünlerin tazeliğinin anlık olarak izlenmesini zorlaştırmakta ve daha pratik, hızlı ve güvenilir alternatif sistemlere olan ihtiyacı artırmaktadır (Kerry vd., 2006; Kuswandi vd., 2011).

1.4. Akıllı Ambalaj ve Akıllı Etiket Sistemleri

Akıllı etiket ve ambalajlama, daha iyi koruma sağlayabilecek ve tüketiciler için daha fazla kolaylık sağlayabilecek, gelişmekte olan bir gıda teknolojisi alanıdır. Daha iyi ambalajlama için düşük etkili tasarımlar geliştirmek üzere biyolojik olarak parçalanabilen malzemelerin kullanılması tavsiye edilmektedir; bu da kullanımlarını yeni alanlara genişleterek çevreye fayda sağlayabilir (Leites vd., 2017; Priyadarshi vd., 2021).

Akıllı etiket ve ambalajlama çalışmalarına başlamadan önce tavuk etinin kalite özelliklerinin iyi anlaşılması büyük önem taşımaktadır (Barbut, 2015; Lawrie ve Ledward, 2006). Bu doğrultuda geliştirilen akıllı ambalaj ve akıllı etiket sistemleri, gıdalarda meydana gelen fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik değişimleri görsel sinyaller aracılığıyla tüketiciye iletebilen yenilikçi teknolojiler arasında yer almaktadır (Kerry vd., 2006; Smolander, 2008). Akıllı etiketler, ürünün bozulma durumu hakkında anlık bilgi sağlayarak hem tüketici güvenliğini artırmakta hem de gıda israfının azaltılmasına katkı sunmaktadır (Kuswandi vd., 2011; Priyadarshi vd., 2021).

Literatür araştırmaları, akıllı etiketlere yönelik çalışmaların çoğunlukla etiket materyallerinin geliştirilmesi ve ürünlerin raf ömrünün uzatılmasına odaklandığını, buna karşın beyaz et ürünlerinde kesim sonrası geçen süreye ilişkin görsel indikatör tasarlanması ve bozulma süreçlerinin izlenmesine yönelik çalışmaların sınırlı olduğunu göstermektedir (Kerry vd., 2006; Smolander, 2008; Kuswandi vd., 2011). Bu durum, beyaz et ürünlerinde

bozulma sürecine eşlik eden pH değişimlerine duyarlı akıllı etiket sistemlerinin geliştirilmesini önemli ve güncel bir araştırma alanı haline getirmektedir (Priyadarshi vd., 2021).

1.5. Biyobozunur Malzemeler ve Kitosan Esaslı Hidrojeller

Son yıllarda biyobozunur, biyouyumlu ve çevre dostu malzemelerin kullanımı gıda ambalajlama teknolojilerinde ön plana çıkmıştır (Rhim vd., 2013; Priyadarshi ve Rhim, 2020). Bu malzemeler arasında yer alan kitosan, kitinin deasetilasyonu sonucu elde edilen doğal bir biyopolimer olup, sulu asidik ortamlarda çözünerek çözelti, jel ve film formunda işlenebilmektedir (Dutta vd., 2012; Rinaudo, 2006).

Kitosan esaslı hidrojeller; biyouyumlulukları, biyobozunurlukları, uygun mekanik dayanımları ve fonksiyonel katkı maddeleriyle etkileşime girebilme kapasiteleri nedeniyle akıllı etiket uygulamaları için uygun bir matris oluşturmaktadır (Rinaudo, 2006; Dutta vd., 2012). Bu özellikleri sayesinde kitosan destekli hidrojeller, gıda ambalajlama ve akıllı etiket çalışmalarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Priyadarshi ve Rhim, 2020; Rhim vd., 2013).

1.6. Halokromik Sistemler ve Bitkisel Özütlerin Akıllı Etiketlerde Kullanımı

Akıllı etiket sistemlerinde pH değişimlerinin görsel olarak izlenebilmesi amacıyla halokromik özellik gösteren bileşikler kullanılmaktadır (Kuswandi vd., 2011; Smolander, 2008). Halokromizm, çözelti ortamında pH değişimine bağlı olarak meydana gelen tersinir renk değişimi olarak tanımlanmaktadır (Brouwer, 2011; Yoshida vd., 2014). Bu özellik, pH'taki değişime bağlı olarak iyonize ve iyonize olmayan türler arasındaki dengenin değişmesi sonucu ortaya çıkmakta olup, renk değişimi moleküler yapıdaki elektronik geçişlerle ilişkilidir (Zollinger, 2003; Priyadarshi vd., 2021).

Antosiyanin ve benzeri fenolik bileşikler bakımından zengin bitkisel özütler, doğal ve güvenli halokromik indikatörler olarak dikkat çekmektedir (Yoshida vd., 2014; Priyadarshi vd., 2021). Hibiskus (Hibiscus sabdariffa), biberiye (Rosmarinus officinalis) ve zeytin yaprağı (Olea europaea) gibi bitkiler, içerdikleri doğal pigmentler ve fenolik bileşikler

sayesinde pH değişimlerine karşı belirgin renk değişimleri gösterebilmekte ve bu yönleriyle akıllı etiket uygulamalarında potansiyel indikatörler olarak değerlendirilmektedir (Kuswandi vd., 2012).

1.7. Çalışmanın Literatürdeki Yeri ve Önemi

Literatür incelendiğinde, akıllı etiket ve akıllı ambalaj sistemlerine yönelik çalışmaların büyük ölçüde raf ömrünün uzatılması ve ambalaj materyallerinin fonksiyonel özelliklerinin geliştirilmesine odaklandığı görülmektedir. Bu kapsamda, pH-duyarlı biyopolimer filmler ve renk indikatörleri kullanılarak gıdaların bozulma sürecinin dolaylı olarak izlenmesine yönelik birçok çalışma rapor edilmiştir (Rojas-Graü vd., 2009; Kumar vd., 2020).

Beyaz et ürünlerine yönelik çalışmalarda ise akıllı etiketlerin çoğunlukla genel tazelik göstergesi olarak değerlendirildiği, kesim tarihinin doğrudan izlenmesi ve mikrobiyal bozulma sürecinin görsel olarak eş zamanlı takibine odaklanan çalışmaların sınırlı sayıda olduğu dikkat çekmektedir. Örneğin, Ali ve ark. (2018) tarafından geliştirilen kitosan bazlı akıllı ambalaj sisteminde pH değişimleri izlenmiş, ancak spesifik olarak beyaz et ürünlerinde mikrobiyal bozulmanın doğrudan görsel takibi ele alınmamıştır. Benzer şekilde, doğal renk indikatörleri içeren sistemlerin değerlendirildiği bazı çalışmalarda (Rojas-Graü vd., 2009), farklı gıda grupları genel olarak ele alınmış olup, beyaz et ürünlerine özgü karşılaştırmalı analizler sınırlı kalmıştır.

Bu tez çalışması, doğal bitkisel özütler kullanılarak geliştirilen halokromik kitosan destekli hidrojel filmler oluşturan bir ön fizibilite çalışmasıdır. Bu çalışmanın aracılığıyla beyaz etin kesim sürecine fikir vermesi ve mikrobiyal bozulmasının pH değişimi üzerinden izlenmesinin hedeflemesi bakımından literatüre özgün bir katkı sunacak pilot ölçekli bir değerlendirme sunacağı düşünülmektedir.

1.8. Çalışmanın Amacı, Kapsamı ve Hipotezi

Bu çalışma kapsamında, halokromik özellik gösteren bitkisel özütler kullanılarak kitosan destekli hidrojel filmler geliştirilmesi ve bu filmlerin beyaz et ürünlerinde pH

değişimine bağlı olarak meydana gelen tazelik kaybını ve olası mikrobiyal bozulmaları görsel olarak izleyebilen akıllı etiketler olarak kullanılabilirliğinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

Bu doğrultuda, bu çalışmada ön fizibilitesi yapılan, çalışmadan geliştirilen sistemlerin, tüketiciye ürünün tazelik durumu hakkında hızlı ve güvenilir bilgi sunması hedeflenmiştir. Bitkisel özüt destekli halokromik kitosan hidrojel filmler, beyaz et kesim sonrası geçen süreye ilişkin yaklaşık bilgi vermeyi ve olası bozulma sürecini izlemeyi güvenilir şekilde gösterebilir mi hipotezi üzerine kurulmuştur.

İKİNCİ BÖLÜM
KURAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Gıda Zehirlenmesi ve Mikrobiyal Gelişim ile Beyaz Et Bozulma Mekanizması

Gıda zehirlenmesi, kirlenmiş yiyecekler ya da su nedeniyle ortaya çıkan, mikroplar, bakteriler, parazitler, virüsler veya toksinler tarafından oluşturulan bir hastalık türüdür. T.C. Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı (2016) na göre Dünya genelinde araştırmalar yapan "Hastalık Kontrol ve Önleme Merkezi," her yıl dünya genelinde 76 milyon kişinin gıda zehirlenmesi yaşadığını, bu vakaların 350 bin inin ciddi bir şekilde hastalığa neden olduğunu ve yaklaşık 5000 kişinin hayatını kaybettiğini bildirmiştir. Gıda zehirlenmesine sıkça neden olan besin grupları arasında et ürünleri yer almakta olup, bu ürünler paketleme aşamasında veya raflarda uzun süre beklemeleri sonucu mikrobiyal bozulmaya uğrayabilmektedir (Nychas vd., 2008). Bu doğrultuda toplumlar, gıda endüstrisinden güvenliği artırılmış, besinsel değeri ve kalite özellikleri iyileştirilmiş, daha uzun raf ömrüne sahip ve kullanım kolaylığı sunan gıda ürünleri geliştirmesini beklemektedir (FAO, 2019).

Bununla birlikte, tüketici tercihleri daha az işlenmiş, katkı maddesi içeriği sınırlı, doğal ve geleneksel özellikler taşıyan sağlıklı ürünlere doğru yönelmektedir (Smolander, 2008). Tüketici beklentilerindeki bu değişim, gıda ambalajlama ve etiketleme sektörünü de doğrudan etkilemekte; sektörün üretim ve Ar-Ge faaliyetlerini bu talepler doğrultusunda yeniden şekillendirmesini gerekli kılmaktadır (Realini ve Marcos, 2014).

Piliç eti; yüksek besleyici değeri, sindiriminin kolay olması ve ekonomik açıdan erişilebilir bir gıda ürünü olması nedeniyle insan beslenmesinde önemli bir yere sahiptir. Kırmızı etlerle karşılaştırıldığında, piliç etinin protein içeriğinin daha yüksek, toplam yağ ve doymuş yağ oranlarının ise daha düşük olduğu bildirilmektedir. Kırmızı etlerde protein oranı genellikle yaklaşık %18 düzeyinde bulunurken, piliç etinde bu değerin ortalama %20,5 civarında olduğu belirtilmektedir. Bunun yanı sıra, piliç eti B grubu vitaminler açısından zengin bir kaynak olup, özellikle riboflavin ve tiamin içeriği ile öne çıkmaktadır (Sağun vd., 2013).

2.2. Beyaz Etlerde Bozulma Mekanizması ve pH Değişimi: Uçucu Aminler, Renk, Koku, Tekstür Değişimleri

Beyaz et, yüksek protein ve su içeriği nedeniyle mikrobiyal gelişime son derece elverişli bir gıda ürünüdür (Lawrie ve Ledward, 2006; Barbut, 2015). Kesim sonrası süreçte et dokusunda meydana gelen biyokimyasal ve mikrobiyolojik değişimler, ürünün tazeliğini ve tüketilebilirliğini doğrudan etkilemektedir (Toldrá, 2006; Jay vd., 2005). Mikroorganizmaların çoğalmasıyla birlikte proteinlerin parçalanması sonucu uçucu bazik bileşikler (örneğin amonyak ve aminler) oluşmakta, bu durum etin pH değerinde artışa neden olmaktadır (Gram ve Dalgaard, 2002; Zhou vd., 2010). pH' taki bu değişim; koku, renk ve doku gibi duyusal özelliklerde bozulmalarla birlikte seyretmektedir (Mancini ve Hunt, 2005; Smolander, 2008).

Beyaz etlerde bozulmanın izlenmesinde pH değişimi önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir (Toldrá, 2006; Smolander, 2008). Literatürde, bozulma sürecine bağlı olarak pH değerinin yaklaşık 5,4–8,2 aralığında değişim gösterebildiği ve bu değişimin mikrobiyal aktivite ile yakından ilişkili olduğu bildirilmektedir (Jay vd., 2005; Zhou vd., 2010). Bu nedenle pH temelli indikatör sistemleri, beyaz et tazeliğinin izlenmesinde etkin ve pratik bir yaklaşım sunmaktadır (Kuswandi vd., 2011; Priyadarshi vd., 2021).

Kümes hayvanı etleri; taze yapıları, zengin besin içerikleri, pH değerlerinin genellikle 5,5–6,5 aralığında bulunması ve su aktivitesinin yüksek olması (0,98–0,99) nedeniyle mikrobiyal bozulmaya oldukça duyarlı gıda ürünleri arasında yer almaktadır. Bu koşullar, mikroorganizmalar ve gıda kaynaklı patojenlerin gelişimi için elverişli bir ortam oluşturarak bozulma süreçlerini hızlandırmakta ve mikrobiyal kolonizasyonu kolaylaştırmaktadır (Fernandez-Pan vd., 2013). Taze kanatlı etlerinin raf ömrü ise uygulanan üretim tekniği ve kullanılan ambalajlama yöntemine bağlı olarak genellikle 8–12 gün arasında değişmektedir (Anonim, 2014).

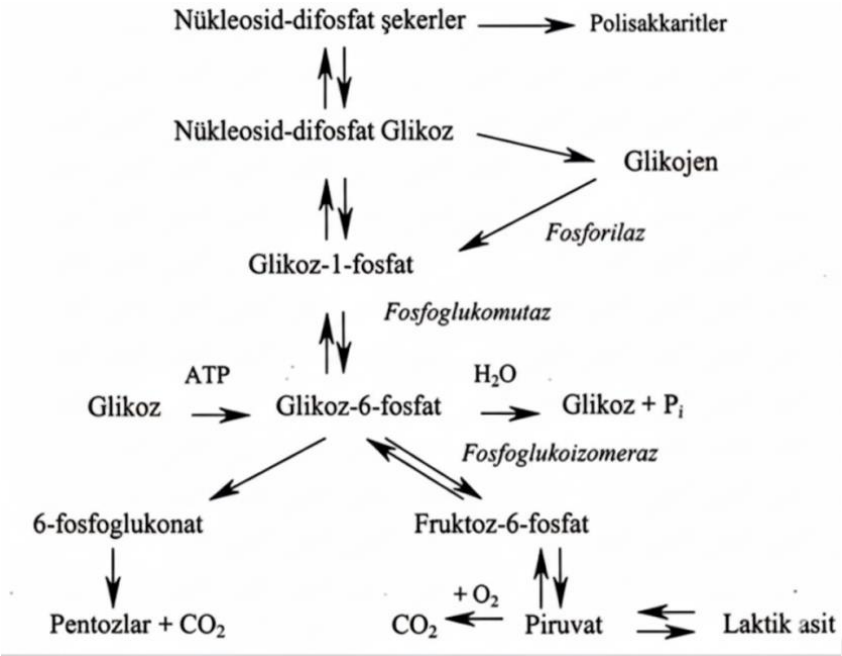
Çiğ etin satın alma aşamasında tüketiciler tarafından en fazla dikkate alınan kalite göstergelerinden biri renk özelliğidir ve bu özellik büyük ölçüde miyoglobin pigmentinin varlığına bağlıdır. Et dokusunda bulunan miyoglobinin miktarı ve kimyasal formu; etin türü, kas yapısı ve hayvanın yaşı gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu

bağlamda, piliç etinde miyoglobin konsantrasyonu oldukça düşük olup yaklaşık 0,01 mg/g düzeyindeyken, sığır etinde bu değerin genellikle 3–6 mg/g aralığında olduğu bildirilmektedir (Fletcher, 1999; Walsh ve Kerry, 2002). Ayrıca Fletcher (1999), piliç etinde gözlenen renk özelliklerinin pH değeri ile güçlü bir ilişki içerisinde olduğunu ortaya koymuştur.

Bununla birlikte, pH değerinin etin diğer duyusal nitelikleri üzerinde de belirleyici bir etkiye sahip olduğu bildirilmektedir. Canlı hayvanda kas dokusunun pH değeri genellikle 7,3–7,5 aralığında bulunurken, kesimi izleyen kısa bir süre içerisinde (yaklaşık ilk 15 dakika) bu değerin 6,2–6,5 seviyelerine gerilediği ifade edilmektedir. Ölüm sertliğinin tamamlanmasının ardından ise, kas dokusunda gerçekleşen metabolik süreçler ve glikoz varlığına bağlı olarak pH değerinin yaklaşık 5,6 düzeyine kadar düştüğü belirtilmektedir (Kılıçkaya, 2011).

Şekil 1' de glikoz metabolizmasının hücre içindeki temel yolları ve bu yollar arasındaki ilişkiler şematik olarak gösterilmektedir. Hücreye alınan glikoz, hekzokinaz enzimi aracılığıyla ATP harcanarak glikoz-6-fosfata fosforile edilir. Glikoz-6-fosfat, karbonhidrat metabolizmasının merkezi bir ara metaboliti olup, hücresel gereksinimlere bağlı olarak farklı metabolik yollara yönlendirilebilmektedir (Nelson ve Cox, 2021).

Glikoz-6-fosfat, fosfoglukoizomeraz enzimi yardımıyla fruktoz-6-fosfata izomerize olarak glikoliz yoluna katılmakta ve bu yolun sonunda piruvat oluşmaktadır. Piruvat, aerobik koşullarda mitokondride oksidatif metabolizmaya girerek CO_2' ye kadar parçalanırken, anaerobik koşullarda laktik aside indirgenmektedir (Berg vd., 2019).



Şekil 1. Glikoz-6-fosfat metabolizması ve canlı ölümü sonrası pH düşmesini gösteren laktik asit oluşumu

Kaynak: *Fletcher, 1999; Walsh ve Kerry, 2002*

Tavuk etinin kesiminin ilk seviye olarak nitelendirilen ilk anlarında kas dokusundaki glikojen ve ATP düzeylerinin en yüksek seviyede olduğu görülmektedir (Tablo 1). Bu durum, etin su tutma kapasitesinin oldukça yüksek olmasını sağlamakta ve haşlama gibi ısıl işlem uygulanacak ürünler için arzu edilen teknolojik özellikleri kazandırmaktadır (Öztan, 2003). Bu özelliği nedeniyle çalışmada hazırlanan hidrojellerin faaliyetlerinin optimum düzeyde olacağı düşüncesiyle yola çıkılmıştır ve bu bilgiler ışığında farklı pH' larda çözeltiler hazırlanarak oluşturulan etiketlerin üzerine bu çözeltilerin uygulanması ile gerçekleşen renk değişimleri üzerinden bir skala oluşturarak ölüm zamanı çizelgesi oluşturma çalışmaları yapılmıştır.

Kesim sonrası ilk 48 saat içerisinde kas dokusunda glikojen ve yüksek enerjili fosfat bileşiklerinin (ATP ve kreatin fosfat) hızla azaldığı, buna karşılık anaerobik glikoliz sonucu laktik asit birikiminin arttığı ve pH değerinin düşüş gösterdiği görülmektedir. Bu biyokimyasal değişimler, post-mortem kas metabolizmasının doğal bir sonucu olup etin kalite özellikleri ve raf ömrü üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Lawrie ve Ledward, 2006; Aberle vd., 2012).

Tablo 1

Kesimden sonra ilk 48 saat içerisinde et kasında glikojen, laktik asit, pH, ATP ve kreatin fosfat seviyelerindeki değişimler

Post-mortem süresi (saat)	Glikojen (%)	Laktik asit (%)	pH	ATP (%)	Kreatin fosfat (%)
İlk seviye	100.0	100.0	6.99	100.0	100.0
6	73.4	342.0	6.57	78.1	22.0
12	53.6	442.7	5.96	60.9	16.5
24	17.8	543.5	5.74	26.6	-
48	17.6	629.0	5.57	17.2	-

Kaynak: *Pearson ve Young, 1989*

Gıda ürünleri, üretimden depolamaya kadar geçen süreçlerin herhangi bir aşamasında kendilerine özgü bir mikrobiyal flora ile ilişkilidir (Jay vd., 2005; Doyle vd., 2019). Bu mikrobiyal yapı; kullanılan ham maddenin özellikleri, uygulanan işleme teknikleri, alınan koruyucu önlemler ve depolama koşullarının bir sonucu olarak şekillenmektedir (Gram ve Dalgaard, 2002; Toldrá, 2006). Belirli bir gıda ürününde mikroorganizmaların gelişim ve çoğalma potansiyeli, söz konusu faktörler dikkate alındığında yüksek doğrulukla öngörülebilmektedir (McMeekin vd., 2008). Ürünün duyusal açıdan kabul edilemez hâle geldiği bozulma aşamasında ise, bozulmadan sorumlu mikroorganizmaların oluşturduğu mikrobiyal topluluk ön plana çıkmakta; bu topluluk gıdada istenmeyen fiziksel, kimyasal ve duyusal değişimlere neden olarak kalite kaybına yol açmaktadır (Nychas vd., 2008; Ercolini vd., 2011).

Tablo 2

Kırmızı ve beyaz ette bozulmaya neden olan bakteriler

Bakteri Türü	Kırmızı Et	Beyaz Et	Bakteri Türü	Kırmızı Et	Beyaz Et
Acinetobacter	++	++	*Leuconostoc*	+	-
Aeromonas	++	+	*Listeria*	+	++
Alcaligenes	+	+	*Microbacterium*	+	+
Bacillus	+	+	*Micrococcus*	+	+
Brochothrix	+	+	*Moraxella*	++	+
Campylobacter	-	++	*Paenibacillus*	+	+
Carnobacterium	+	-	*Pantoea*	+	+
Citrobacter	+	+	*Pediococcus*	+	-
Clostridium	+	+	*Proteus*	+	+
Corynebacterium	+	++	*Pseudomonas*	++	++
Enterobacter	+	+	*Psychrobacter*	++	+
Enterococcus	++	+	*Salmonella*	+	+
Escherichia	+	+	*Serratia*	+	+
Flavobacterium	+	+	*Shewanella*	+	-
Hafnia	+	-	*Staphylococcus*	+	+
Kocuria	+	+	*Vagococcus*	-	++
Kurthia	+	-	*Weissella*	+	-
Lactococcus	+	-	*Yersinia*	+	-
Lactobacillus	+	-			

Kaynak: *Ellis ve Goodacre, 2006*

XX sıkça rastlanıyor, X varlığı biliniyor, - yok anlamını taşımaktadır

Bazı proteolitik ve mezofilik bakteriler enfeksiyon sonrası büyüme sürecinde daha yüksek bir pH'da gelişebilir, çünkü bu süreçte aminler ve amonyak üreterek üreterek yüksek pH aralıkları oluşturma eğilimindedirler (Davidson ve Critzer, 2012).

Özellikle Pseudomonas ve Acinetobacter gibi psikrotrof bakterilerin her iki et türünde de (beyaz-kırmızı) yoğun (++) bulunması, soğuk muhafaza koşullarında bozulmanın ana kaynağını oluşturmaktadır. Bu durum çalışmanın geliştirilme aşamasında benzer bir uygulamanın kırmızı ette de denenebileceği göstergesi sayılabilir (Ellis ve Goodacre, 2006).

2.3. Gıda Tazelik ve Bozulma Tespit Yöntemleri

Piliç etlerinin uygun koşullarda muhafaza edilmesi ve raf ömrünün uzatılmasına yönelik olarak ambalaj teknolojilerinde sürekli geliştirme çalışmaları yürütülmekte ve bu kapsamda yeni uygulamalar geliştirilmektedir (Kerry vd., 2006; Realini ve Marcos, 2014). Bu yaklaşımın bir sonucu olarak geliştirilen akıllı etiket ve ambalajlama sistemleri, gıda kalitesinin izlenmesine yönelik yenilikçi çözümler sunmaktadır (Smolander, 2008; Kuswandi vd., 2011). Bu sistemlerde temel amaç; piliç etinin etkin şekilde korunmasını sağlamak, halk sağlığını korumak ve ekonomik kayıpları azaltmaktır (Nychas vd., 2008; FAO, 2019).

Literatürde akıllı etiket sistemlerine yönelik çalışmaların büyük ölçüde etiket yapısında kullanılan materyallerin fonksiyonel özelliklerinin geliştirilmesine ve gıdaların raf ömrünün uzatılmasına odaklandığı görülmektedir (Kerry vd., 2006; Priyadarshi vd., 2021). Buna karşın, akıllı etiketlerin beyaz et ürünlerinde kesim tarihinin izlenmesi ve mikrobiyal bozulma sürecinin doğrudan takibine yönelik kullanımına ilişkin çalışmaların sınırlı olduğu dikkat çekmektedir (Smolander, 2008). Bu bağlamda, mevcut çalışmada araştırma odağının, akıllı etiket sistemlerinin beyaz et ürünlerinde mikrobiyal bozulma ile ilişkili değişimlerin izlenmesinde kullanılabilirliğine yönlendirilmesi amaçlanmıştır.

Gıda ürünlerinde uygulanan farklı koruma yaklaşımları ve ambalajlama teknikleri, ürün kalitesinin korunmasını ve raf ömrünün mümkün olan en uzun süreye çıkarılmasını amaçlamaktadır. Raf ömrü kavramı ise, gıda ürününün doğal ortamından ayrılmasının ardından; lezzet, doku ve görünüm gibi duyusal özellikler açısından kabul edilebilir kalite sınırları içerisinde tüketilebildiği son ana kadar geçen süreyi ifade etmektedir (Pavlath ve Orts, 2009).

2.4. Akıllı Ambalajlama ve Akıllı Etiket Sistemleri

Geleneksel ambalajlama sistemleri, gıdayı çevresel etkenlerden korumayı amaçlamakla birlikte ürünün gerçek zamanlı durumu hakkında bilgi sunmamaktadır (Robertson, 2013; Kerry vd., 2006). Bu sınırlamaların aşılabilmesi amacıyla geliştirilen akıllı ambalajlama sistemleri ise, gıdanın depolama ve dağıtım sürecinde maruz kaldığı koşulları izleyebilen ve meydana gelen kalite değişimlerini görsel veya fonksiyonel göstergeler aracılığıyla ortaya koyabilen yenilikçi çözümler olarak öne çıkmaktadır (Smolander, 2008; Realini ve Marcos, 2014).

Akıllı ambalajlama sistemleri genel olarak aktif ambalajlar ve akıllı (intelligent) ambalajlar olmak üzere iki grupta ele alınmaktadır (Kerry vd., 2006; Realini ve Marcos, 2014). Aktif ambalajlar, gıdanın raf ömrünü uzatmaya yönelik koruyucu etki göstermeyi amaçlarken; akıllı ambalajlar, ürünün kalite durumunu izleyerek tüketiciye bilgi sunmayı hedeflemektedir (Robertson, 2013; Smolander, 2008). Akıllı etiketler ise çoğunlukla renk değişimi gibi görsel göstergeler aracılığıyla gıdadaki bozulmayı tespit edebilmektedir (Kuswandi vd., 2011). Özellikle et ürünlerinde kullanılan akıllı etiketler, mikrobiyal metabolitlerin neden olduğu pH değişimlerine duyarlı indikatör sistemleri içermekte ve bu sayede ürünün tazelik durumu hakkında doğrudan bilgi sağlamaktadır (Pacquit vd., 2007; Priyadarshi vd., 2021).

Akıllı etiket (Şekil 2) ve ambalajlama çalışmalarına başlamadan önce tavuk etinin kalite özelliklerinin iyi anlaşılması çok önemlidir. Beyaz etin kalite değerlendirmesi, fiziksel, duyusal ve mikrobiyolojik kriterler dikkate alınarak yapılmaktadır. Duyusal kalite unsurları; renk, doku yapısı (sertlik–yumuşaklık), lezzet ve sululuk gibi özellikleri kapsamaktadır. Fiziksel kalite parametreleri ise kas dokusu oranı, su tutma kapasitesi ve pişirme sırasında meydana gelen kayıplar üzerinden tanımlanmaktadır. Söz konusu kalite özellikleri, kümes hayvanları etinin genel kalitesini belirleyen temel faktörler arasında yer almakta olup, canlı hayvanın büyüme hızı ve vücut kompozisyonu ile doğrudan ilişkilidir (Duclos vd., 2007).



Şekil 2. Akıllı etiket

Kaynak: *Design Indaba, 2018*

2.5. Hidrojel Filmler

Son yıllarda biyomalzeme alanında kaydedilen gelişmelerle birlikte, mevcut sentetik malzemelere alternatif olarak biyouyumlu materyallerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar önem kazanmıştır. Bu kapsamda, söz konusu malzemelerin üretim yöntemleri, yapısal ve fonksiyonel özellikleri, sağladıkları avantajlar, kullanım alanları ve sınırlılıkları detaylı biçimde incelenmektedir. Biyouyumluluk, biyobozunurluk, uygun mekanik özellikler ve çevresel koşullara duyarlılık gibi üstünlükleri nedeniyle, bu alanda en yaygın olarak araştırılan malzeme gruplarından birini hidrojeller oluşturmaktadır (Peppas vd., 2000; Ahmed, 2015) (Şekil 3).



Şekil 3. Hidrojel

Kaynak: *Nanovea, t.y.*

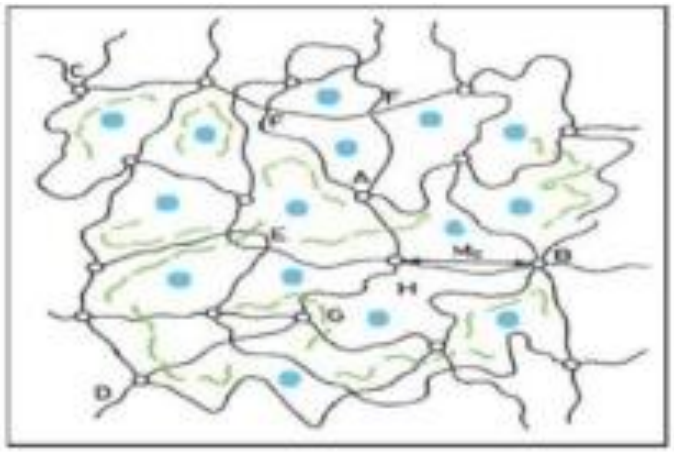
2.5.1. Hidrojellerin Yapısı ve Özellikleri

Hidrojeller; çapraz bağlanmış, üç boyutlu ağ yapısına sahip olan ve suda çözünmeden şişme davranışı sergileyen polimerik sistemler olarak tanımlanmaktadır. Kütlesinin %100'ünden daha fazla su içerebilen hidrojel yapılar süper adsorban özellik gösterirken, yaklaşık %20 oranında su içeriğine sahip olan jeller kserojel olarak sınıflandırılmaktadır. Yapılarında yüksek miktarda su tutabilmeleri, yumuşak ve esnek fiziksel özelliklere sahip olmaları nedeniyle hidrojeller, biyolojik dokularla önemli ölçüde benzerlik göstermektedir (Pellá vd., 2018).

Hidrojeller, üç boyutlu çapraz bağlı polimer ağ yapısına sahip, yüksek su tutma kapasitesi gösteren materyaller olarak tanımlanmaktadır (Ahmed, 2015). Hidrofilik fonksiyonel gruplar içeren bu yapılar, çevresel değişimlere (pH, sıcaklık, iyonik güç vb.) karşı duyarlılık göstermeleri nedeniyle sensör ve indikatör uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Caló ve Khutoryanskiy, 2015; Qiu ve Park, 2012).

Polimer ağ yapısının; kimyasal çapraz bağlar, hidrojen bağları, fiziksel etkileşimler, Van der Waals kuvvetleri ve hidrofobik etkileşimler gibi çeşitli kohezyon kuvvetleri aracılığıyla oluştuğu bildirilmektedir (Hoffman, 2012; Lin ve Metters, 2006). Yapıda bulunan hidrofobik etkileşimlerin çapraz bağlanma derecesi ile ilişkili olduğu ve bu durumun hidrojelin şişme davranışını doğrudan etkilediği belirtilmektedir (Qiu ve Park, 2012; Ahmed, 2015).

Bu özellikleri sayesinde hidrojeller, bitkisel özütlerin kolaylıkla matrise entegre edilebilmesine olanak tanımakta; kitosan gibi biyopolimerlerle katı bir gövde oluşturulduktan sonra akıllı etiket filmleri için uygun bir malzeme sunmaktadır (Rinaudo, 2006; Priyadarshi ve Rhim, 2020). Hidrojellerin çapraz bağ yapıları (Şekil 4) ve yüksek emilim kapasiteleri, fonksiyonel özütlerin sistem içerisine etkin bir şekilde dahil edilmesini mümkün kılmaktadır (Peppas vd., 2000; Caló ve Khutoryanskiy, 2015).



Şekil 4. Çapraz bağlı hidrojelin yapısı
Kaynak: *Pellá vd., 2018*

2.5.2. Ambalajlamada Hidrojel Tabanlı Akıllı Etiket Sistemlerinin Kullanım Örnekleri

Hidrojeller; biyoteknoloji, tıp, eczacılık, tarım, çevre teknolojileri, uzay çalışmaları ve çeşitli endüstriyel uygulamalar gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu kapsamda hidrojeller; atık su arıtımında toksik metal iyonlarının, tekstil boyalarının ve fenol gibi kanserojen bileşiklerin içme ve kullanım sularından uzaklaştırılmasında, yumuşak ve sert kontakt lens üretiminde, yara ve yanık örtülerinde, yapay damar ve organ uygulamalarında, enzim taşıyıcı sistemlerde ve ilaç etken maddelerinin kontrollü salımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bebek bezleri, sensör ve valf sistemleri, tarım ilaçlarının denetimli salımı ve iletken malzemeler gibi pek çok farklı alanda da hidrojel temelli uygulamalara rastlanmaktadır (Ekici, 2016).

2.5.3. Kitosan Bazlı Hidrojeller

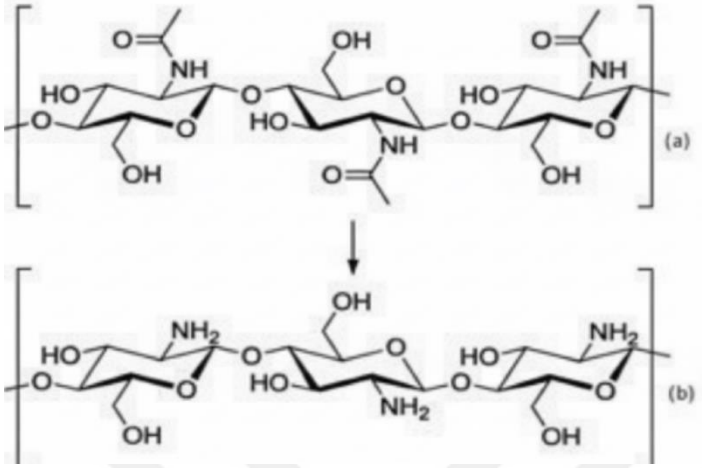
Kitosan, kitinin deasetilasyonu ile elde edilen, biyouyumlu ve biyobozunur bir polisakkarittir (Rinaudo, 2006; Dutta vd., 2012). Asidik ortamlarda çözünürlüğü ve film oluşturma kabiliyeti sayesinde gıda ambalajlama ve akıllı etiket uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Rhim vd., 2013; Priyadarshi ve Rhim, 2020). Kitosan bazlı hidrojeller, farklı çapraz bağlayıcılar ve doğal aktif bileşenlerle desteklenerek pH duyarlı sistemler haline getirilebilmektedir (Qiu ve Park, 2012; Priyadarshi vd., 2021). Bu

özellikleri, kitosanı halokromik hidrojel filmlerin geliştirilmesinde uygun bir taşıyıcı materyal olarak öne çıkarmaktadır (Rinaudo, 2006; Priyadarshi ve Rhim, 2020).

Kitin, ilk kez 1884 yılında tanımlanmış olup, poli (β-(1→4)-N-asetil-D-glukozamin) yapısına sahip önemli bir doğal polisakkarittir. Yıllık üretim miktarı ve doğadaki bolluğu dikkate alındığında, selülozdan sonra en yaygın bulunan doğal polimer olarak kabul edilmektedir. Kitinin deasetilasyon derecesi, orijin polimerine bağlı olarak yaklaşık %50 seviyesine ulaştığında, sulu asidik ortamlarda çözünürlük kazanmakta ve bu form kitosan olarak adlandırılmaktadır (Şekil 5). Sulu çözeltilerde çözünebilme özelliği sayesinde kitosan; çözelti, jel, film ve elyaf gibi farklı formlarda geliştirilen uygulamalarda yaygın biçimde kullanılmaktadır (Rinaudo vd., 2006). Kitosan ve aljinat, sahip oldukları biyouyumlu ve fonksiyonel özellikler nedeniyle çok sayıda uygulama alanı için ayrıntılı biçimde araştırılan iki önemli biyopolimerdir. Kalsiyum iyonlarının varlığında aljinat zincirlerindeki guluronik asit birimlerinin etkileşimi sonucu jel oluşumu gerçekleşmektedir (Fundueanu vd., 1999). Bu etkileşimle elde edilen kalsiyum aljinat jel boncukları, kontrollü salım sistemlerinde yaygın olarak kullanılan taşıyıcı materyaller arasında yer almaktadır. Söz konusu boncukların, kitosan başta olmak üzere farklı polimerlerle kaplanmasının, depolama stabilitesini artırdığı ve biyolojik ortamlardaki yarı ömürlerini uzattığı gösterilmiştir. Oluşturulan kompleks yapıların kapsüle edilen materyali koruduğu, biyouyumlu ve biyobozunur özellikler sergilediği belirtilmiştir (Yan vd., 2001). Ayrıca bu sistemlerin, kapsüllü bileşenlerin tek başına aljinat ya da kitosan kullanıldığı durumlara kıyasla daha kontrollü ve sınırlı bir şekilde serbest bırakılmasını sağladığı ifade edilmiştir. Söz konusu iletim sistemlerinin bir diğer önemli avantajının ise toksik etki göstermemesi olduğu vurgulanmıştır.

Biyomalzeme alanında son yıllarda kaydedilen gelişmeler, mevcut sentetik malzemelere alternatif olarak biyouyumlu materyallerin geliştirilmesine yönelik çalışmaları ön plana çıkarmıştır. Bu kapsamda söz konusu malzemelerin üretim yöntemleri, yapısal özellikleri, sağladıkları avantajlar, kullanım alanları ve sınırlılıkları ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır. Biyouyumluluk, biyobozunurluk, uygun mekanik özellikler ve çevresel duyarlılık gibi üstünlükleri nedeniyle hidrojeller, bu alanda en yaygın olarak araştırılan malzeme gruplarından biri olarak öne çıkmaktadır (Pellá vd., 2018).

Bu bilgiler ışığında, bu çalışmada geliştirilecek akıllı etiket sistemlerinde kitosan destekli hidrojel yapıların kullanılması tercih edilmiştir.



Şekil 5. Kitin (a) ve Kitosan (b) ın kimyasal yapıları
Kaynak: *Yan vd., 2001*

2.5.4. Halokromik Sistemler ve Doğal İndikatörler

Akıllı etiketlerde pH değişimi üzerinden renk değişimi sağlayacak olan özütlere karar verirken bitkilerin ve ekstraktlarının halokromik özellikleri incelenmiştir. Halokromizm Von Baeyer tarafından tanımlanmıştır. Halokromizm, bir maddenin ortam pH'ına bağlı olarak geri dönüşümlü renk değişimi göstermesi olarak tanımlanmaktadır. Bu özellik, asit–baz etkileşimleri sonucunda moleküler yapıda meydana gelen değişimlerden kaynaklanmaktadır. Halokromik maddeler, bu özellikleri sayesinde pH indikatörü olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. pH' ın değişmesi sonucu renkte tersinir bir değişiklik gözlenmektedir. Renklilik yeni bir kromoforun oluşmasından kaynaklanmaktadır (Laurent ve Dürr, 2001). pH değerindeki değişimler, çözelti içerisinde bulunan iyonize ve iyonize olmayan türlerin oranını etkilemektedir. Bu iki formun farklı renk özelliklerine sahip olması, pH değişimine bağlı olarak çözeltinin renginde gözle görülür bir değişime neden olmaktadır. Söz konusu renk dönüşümü, asit–baz titrasyonlarında indikatör olarak kullanılmakta olup, halokromik maddelerde gözlenen renk değişimi reaksiyonun sonlanma noktasını ifade etmektedir (Shindy vd., 2009).

Son yıllarda sentetik pH indikatörlerine alternatif olarak doğal kaynaklı halokromik bileşiklerin kullanımı önem kazanmıştır (Priyadarshi vd., 2021; Kuswandi vd., 2011). Doğal indikatörler; biyouyumluluk, çevre dostu olma ve gıda ile temas açısından güvenli olmaları gibi önemli avantajlar sunmaktadır (Rhim vd., 2013; Smolander, 2008). Bu bağlamda antosiyaninler, polifenoller ve oleuropein gibi halokromik özellik gösteren doğal bileşikler, pH değişimlerine karşı duyarlılıkları nedeniyle akıllı etiket uygulamalarında dikkat çekmektedir (Yoshida vd., 2014; Rojas-Graü vd., 2009; Priyadarshi ve Rhim, 2020).

2.5.5. Antosiyaninler- Antioksidanlar

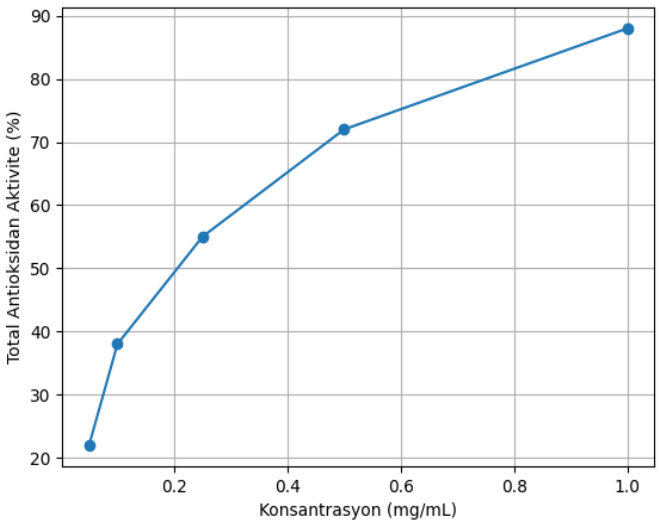
Antosiyaninler, bitkilere kırmızı, mor ve mavi renkleri kazandıran, suda çözünebilen doğal pigmentlerdir (Giusti ve Wrolstad, 2003; Yoshida vd., 2014). pH değişimlerine karşı duyarlı olan bu bileşikler, ortamın asidik veya bazik özelliklerine bağlı olarak farklı renkler sergilemekte; asidik ortamlarda kırmızı tonlar gözlenirken pH yükseldikçe renk mor ve mavi tonlarına dönüşmektedir (Brouwer, 2011; Castañeda- Ovando vd., 2009). Bu halokromik özellikleri sayesinde antosiyaninler, pH temelli akıllı etiket sistemlerinde doğal indikatörler olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır (Kuswandi vd., 2011; Priyadarshi vd., 2021). Ayrıca sahip oldukları antioksidan özellikler, antosiyaninlerin fonksiyonel ambalaj uygulamalarında tercih edilmesini desteklemektedir (Khoo vd., 2017; Rojas-Graü vd., 2009).

Hibiscus sabdariffa L. (Şekil 6), tropikal ve subtropikal iklim koşullarında yetişebilen, Malvaceae familyasına ait çalı formunda bir bitkidir (Gedik, 2014). Türkiye'de ise bu bitki; bamya çiçeği, kara bamya, Sudan bamyası, hibiskus ve kerkede gibi farklı yerel adlarla bilinmektedir (Özdoğan, 2001; Gedik, 2014). Bitkinin ticari olarak önemli olan kısmı etli çanak yapraklarıdır (Gedik, 2014). Hibiskus çanak yaprakları önemli miktarda karbonhidrat, protein, ham lif ve organik asit içermesi yanında ticari olarak önemi özellikle antosiyanin içeriğinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6. Hibiscus sabdariffa.

Antioksidanlar, serbest radikallerin hücrelere zarar vermesini önleyen veya azaltan doğal ya da sentetik bileşiklerdir (Gülçin, 2025). Bu bileşikler, meyve ve sebzelerde meydana gelebilecek oksidatif acılaşma, bozulma, renk değişimleri ve enzimatik esmerleşme gibi olumsuz süreçlerin önlenmesi amacıyla yenebilir film ve kaplama sistemlerine yaygın olarak ilave edilmektedir. Bu sistemlerde antioksidan etki, yapıda bulunan fenolik bileşikler ve organik asitler aracılığıyla sağlanabilmektedir (Şekil 7). Bu amaçla en sık tercih edilen antioksidanlar arasında askorbik asit, sitrik asit, sistein, glutatyon, bütillendirilmiş hidroksi anisol (BHA), bütillendirilmiş hidroksi toluen (BHT), propil gallat ve tokoferoller yer almaktadır (Martin- Belloso vd., 2009; Quezada-Gallo, 2009).



Şekil 7. H. sabdariffa L. ekstraktlarının total antioksidan aktivitesi

Kaynak: *Şen, 2011*

2.5.6. Polifenoller ve Fenolik Bileşikler

Polifenoller, yapılarında bir veya daha fazla fenolik halka bulunduran ve bitkisel kaynaklarda yaygın olarak bulunan bileşiklerdir (Manach vd., 2004; Scalbert vd., 2005). Bu bileşikler, güçlü antioksidan özelliklerinin yanı sıra ortamın pH değerine bağlı olarak yapısal ve elektronik değişimler gösterebilmekte ve dolayısıyla pH değişimlerine karşı duyarlılık sergileyebilmektedir (Castañeda- Ovando vd., 2009; Yoshida vd., 2014). Polifenol içeriği yüksek bitki özütleri, polimer esaslı film ve hidrojel sistemlerinde doğal katkı maddesi olarak kullanılabilmekte; bu sayede fonksiyonel ve pH duyarlı akıllı ambalaj materyallerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır (Rojas-Graü vd., 2009; Priyadarshi ve Rhim, 2020).

Biberiye (Rosmarinus officinalis), polifenoller ve fenolik bileşikler (özellikle rosmarinik asit, karnosik asit ve karnosol) bakımından zengin bir bitki olup, bu bileşikler sayesinde antioksidan ve pH duyarlılığına bağlı fonksiyonel özellikler sergilemektedir (Borrás-Linares vd., 2014; Nieto vd., 2018). Bu özellikleri doğrultusunda biberiye özütleri, gıda ambalajlama ve akıllı etiket uygulamalarında doğal indikatör ve fonksiyonel katkı maddesi olarak potansiyel taşımaktadır (Rojas-Graü vd., 2009; Priyadarshi ve Rhim, 2020).

Biberiye (Rosmarinus officinalis L.), Labietae ailesine ait bir bitki olup, gıda ambalajlarında katkı maddesi olarak kullanılabilecek zengin antioksidan bileşiklere sahip önemli bir kaynaktır (Lopez-Cordoba vd., 2017). Biberiye üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda, özellikle baharat ve çay formunda yaygın olarak tüketilen bazı bitki ekstraktlarının kanatlı etlerinde dekontaminasyon ve raf ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir. İn vitro koşullarda yapılan değerlendirmelerde, kekik ve karanfil hidrodistilatlarının yüksek etkinlik gösterdiği; bu ekstraktları sırasıyla biberiye, defne ve reyhan hidrodistilatlarının izlediği rapor edilmiştir. Elde edilen bulgular, söz konusu hidrodistilatların piliç etlerinde doğal koruyucu olarak kullanılabileceğini ve ürünlerin raf ömrünün uzatılmasına katkı sağlayabilecek potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Aksoy vd., 2011).

Biberiye özütlerinde antioksidan etkiyi sağlayan ve halokromik özellik gösteren moleküllerin fenolik bileşikler ve polifenoller olduğu belirlendikten sonra bu alanda kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır (Borrás-Linares vd., 2014; Nieto vd., 2018). Bu

araştırmalar neticesinde polifenollerin, yaygın olarak dağılmış çok sayıda fonksiyonel molekül grubunu içeren geniş bir molekül sınıfı olduğu görülmüştür (Manach vd., 2004; Scalbert vd., 2005). Bu bileşiklerin genellikle bir veya daha fazla benzen halkası ile değişen sayıda hidroksil (–OH), karbonil (–CO) ve karboksil (–COOH) grupları içerdiği; çoğunlukla bir veya daha fazla şeker kalıntısı ile konjuge formlarda bulunduğu bildirilmektedir (Castañeda-Ovando vd., 2009).

Flavonoidler, polifenollerin en yaygın sınıfını oluşturmakla birlikte, polifenol içeriğinin benzer türdeki gıdalar arasında dahi önemli farklılıklar gösterebildiği belirtilmektedir (Manach vd., 2004; Scalbert vd., 2005). Bu doğrultuda, çeşitli bitki ekstreleri; polimer esaslı film ve hidrojel sistemlerinde potansiyel doğal antioksidan ve antimikrobiyal katkı maddeleri olarak kullanılabilecek zengin polifenol kaynakları olarak değerlendirilmektedir (Rojas-Graü vd., 2009; Priyadarshi ve Rhim, 2020).

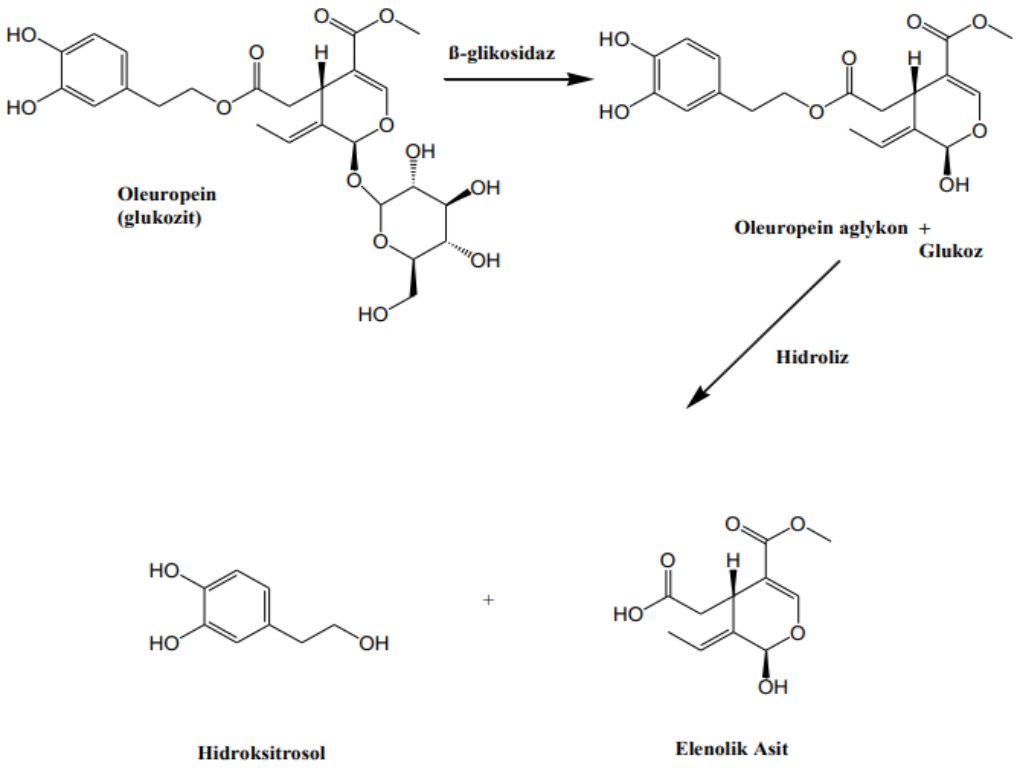
2.5.7. Oleuropein

Zeytin, insanlık tarihi boyunca farklı uygarlıklarda barış ve sağlıklı yaşam ile ilişkilendirilen önemli bir bitki olarak kabul edilmiştir. Meyvesi ve yağı gıda amaçlı yaygın biçimde kullanılırken, bitkinin diğer kısımları da günlük yaşamda çeşitli alanlarda değerlendirilmiştir. Özellikle uzun yıllar boyunca atık olarak görülen zeytin çekirdeği ve zeytin yaprağı, halk hekimliğinde tedavi edici amaçlarla kullanılmıştır. Günümüzde yapılan bilimsel çalışmalar ise, zeytin meyvesi ve yağının yüksek oranda oleuropein içerdiğini; zeytin yaprağındaki oleuropein miktarının ise bitkinin diğer kısımlarına kıyasla daha yüksek olduğunu ortaya koymuş ve bu bileşiğin önemli bir aktif fitokimyasal madde olduğunu göstermiştir (Servili vd., 1999).

Oleuropein, zeytin yaprağı ve zeytin meyvesinde doğal olarak bulunan; elenolik asit ve hidroksitirozolün glikozidik esterlerinden oluşan fenolik bir bileşiktir. Bu bileşik, zeytin bitkisinin özellikle yaprak ve meyve kısımlarında baskın fitokimyasal bileşen olarak yer almaktadır. Yapılan çeşitli çalışmalarda, oleuropeinin antikanserojen, antiinflamatuar ve antimikrobiyal özellikler sergilediği ortaya konmuş olup, bu bulgular söz konusu bileşiğin insan sağlığı üzerindeki potansiyel olumlu etkilerine işaret etmektedir (Gikas vd., 2007).

Oleuropein bileşiği zeytin bitkisinin tüm kısımlarında bulunmakla birlikte, en yüksek konsantrasyonda zeytin ağacının yapraklarında yer aldığı bildirilmektedir (Servili vd., 1999). Bu bulgu, çalışmamızda özellikle ülkemiz açısından önemli bir tarımsal değer olan zeytin ağaçlarının yapraklarının doğrudan değerlendirilmesini gerekli kılmıştır (Benavente-García vd., 2000; Gorzynik-Debicka vd., 2018). Yapılan literatür taramalarında, zeytin yaprağının doğal antibakteriyel ve antioksidan özelliklere sahip olduğu ve tarihsel süreçte tedavi edici amaçlarla kullanıldığı bildirilmektedir (Markin vd., 2003; Pereira vd., 2007). Ayrıca zeytin yaprağı ekstraktlarının, antioksidan etki gösteren ve halokromik özellik kazandırabilen çeşitli fenolik bileşikleri (özellikle oleuropein, hidroksitirozol ve tirosol) içerdiği belirlenmiştir (Benavente-García vd., 2000; Rojas-Graü vd., 2009). Oleuropein bileşiğinin insan vücudunda doğrudan emilmediği, sindirim sürecinde parçalanarak başta hidroksitirozol olmak üzere farklı metabolitlere dönüştüğü ifade edilmektedir (Şekil 8) (Visioli vd., 2002; Cicerale vd., 2012).

Bu durum, oleuropeinin biyoyararlılığının, sindirim sürecinde oluşan hidroksitirozol gibi parçalanma ürünlerinin biyoyararlılığına bağlı olduğunu göstermektedir (Soni vd., 2006). Bununla birlikte, zeytin yaprağı ekstraktının yüksek antioksidan aktivitesi sayesinde, gıdaların işlenmesi ve depolanması sırasında bozulmaya yol açan lipit oksidasyonunu baskıladığı ve bu yolla ürünlerin raf ömrünün uzatılmasına katkı sağladığı bildirilmektedir (Bouaziz ve Sayadi, 2005).



Şekil 8. Oleuropein ve Hidroksitirozolün yapısal formülü ve Oleuropeinin mekanizması
Kaynak: *Yıldız ve Uylaşer, 2011*

Oleuropein, antioksidan ve antimikrobiyal özelliklerinin yanı sıra pH değişimlerine duyarlılığı nedeniyle halokromik sistemlerde kullanılabilmektedir. Bu özellikleri, zeytin yaprağı özütünün akıllı etiket uygulamalarında doğal ve fonksiyonel bir bileşen olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

2.6. Literatürdeki Boşluk ve Çalışmanın Konumu

Literatürde beyaz et tazeliğinin izlenmesine yönelik farklı akıllı etiket ve pH indikatör sistemlerinin geliştirildiği bildirilmektedir. Ancak, doğal bitki özütleri ile desteklenmiş kitosan bazlı halokromik hidrojel filmlerin bu amaçla kullanımına ilişkin çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Özellikle hibiskus, biberiye ve zeytin yaprağı özütlerinin aynı hidrojel matrisi içerisinde yer aldığı sistemlerin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine yönelik çalışmaların literatürde kısıtlı düzeyde rastlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında, doğal ve sürdürülebilir bitki özütleri kullanılarak hazırlanan halokromik hidrojel filmlerin beyaz et ürünlerinde meydana gelen pH değişimlerine karşı görsel yanıtlarının incelenmesi hedeflenmiştir. Elde edilecek bulguların, akıllı etiket uygulamalarına yönelik mevcut çalışmalara tamamlayıcı nitelikte katkı sağlayabileceği öngörülmektedir (Rojas-Graü vd., 2009; Kumar vd., 2020; Gülçin, 2025).

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA YÖNTEMİ

3.1. Araştırma Tasarımı

Bu çalışma, deneysel araştırma tasarımına göre planlanmıştır. Çalışma kapsamında, kitosan–glutaraldehit esaslı hidrojel filmler sentezlenmiş; hibiskus (Hibiscus sabdariffa), biberiye (Rosmarinus officinalis) ve zeytin yaprağı (Olea europaea) özütleri kitosan destekli glutaraldehit hidrojel matrisi içerisine entegre edilerek halokromik özellik gösteren akıllı etiket sistemleri geliştirilmiştir. Özüt içermeyen hidrojel filmler kontrol grubu olarak hazırlanmıştır. Elde edilen hidrojel filmlerin pH değişimlerine bağlı renk davranışları, beyaz etin bozulma sürecini temsil eden pH aralığında incelenmiştir. Simulatif çözeltiler eşliğinde ön inceleme tamamlandıktan sonra tavuk eti üzerinde oluşturulan halokromik özellikte özütlü hidrojel filmler üzerinden renk değişimleri incelenmiştir.

3.2. Kullanılan Materyaller

Çalışmada kullanılan bitkisel materyaller; Akdeniz bölgesi Antalya Kaş ilçesinden içinde bulunan antosiyaninden dolayı halokromik özellik gösteren hibiskus (Hibiscus Sabdariffa), Muğla Fethiye ilçesinden içinde bulunan polifenolden dolayı halokromik özellik gösteren biberiye (Rosmarinus Officinalis), Marmara bölgesinden Çanakkale ilinden içerdiği oleuropeinden dolayı halokromik özellik gösteren zeytin yaprakları (Olea Europaea) temin edilmiştir.

Hidrojel sentezinde kullanılan kitosan ve glutaraldehit analitik saflıkta olup, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi bünyesinde bulunan araştırma laboratuvarından temin edilmiştir. Diğer tüm kimyasallar deneysel çalışmalarda kullanılmaya uygun saflıktadır. Glutaraldehit toksik etkisine maruz kalmamak için 2% lik çözelti haline getirilerek kullanılmıştır. Çözücü olarak etanol ve asetik asit çözeltileri kullanılmıştır.

3.3. Bitki Özütlerinin Hazırlanması

Bu çalışmada, pH değişimine bağlı renk değişimi gösterebilen bir akıllı etiket geliştirilmesi amacıyla, içeriklerindeki bileşikler nedeniyle halokromik özellik gösterdiği belirlenen hibiskus, biberiye ve zeytin yaprağı bitkileri kullanılmıştır.

Bitkiler temin edildikten sonra doğadan elde edilmiş olmanın verdiği yabancı maddeleri elimine etmek ve özütün saflığını arttırmak amacıyla ayıklanmış ve saf suda yıkanmıştır.



Şekil 9. Sırasıyla biberiye, hibiskus ve zeytin yapraklarının hazırlanış süreci

Daha sonra bitkilerin içerisindeki suyu buharlaştırmak için etüvde 50 ^{0}C de 24 saat kurutulmuş (Şekil 10) ve kurutmadan sonra parçacık boyutunu azaltmak ve temas yüzeyini arttırarak daha verimli özüt elde edebilmek adına havanda dövülmüştür (Şekil 11).



Şekil 10. Bitkilerin etüve konulması



Şekil 11. Zeytin yaprağının havanda dövülmesi

Özütleme için solvent ekstraksiyon yöntemi ve çözücü olarak da etanol kullanılmıştır. Kurutulan bitkiler etanolde çözülerek solvent ekstraksiyonu yöntemi ile özütlerin çıkarılması sağlanmıştır. Her bir bitkiden 20 gram alınarak ayrı ayrı erlenlere konularak 200 mL etanol içerisinde 24 saat bekletilmiştir (Şekil 12).



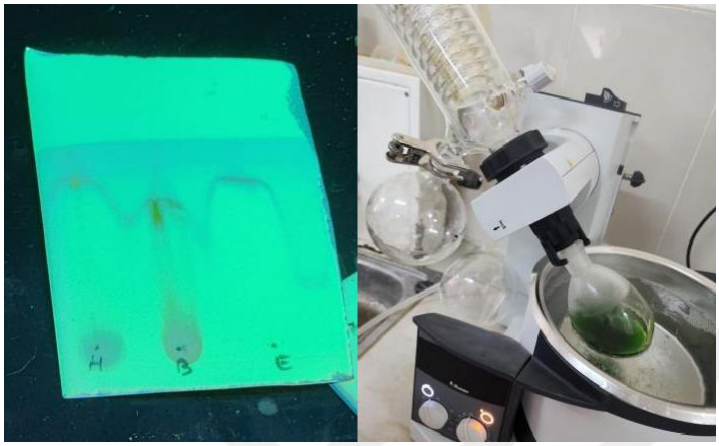
Şekil 12. Sırasıyla biberiye, zeytin yaprağı ve hibiskusun etanolde çözünmesi

Katı içerikten (posadan) kurtulmak için Şekil 13' te görüldüğü üzere süzme yöntemi kullanılmıştır ve 3 bitki için de etanollü çözeltiler ayrı ayrı elde edilmiştir. Elde edilen çözeltilerin içerisindeki 2 saat etil alkol rotary evaporatör yardımıyla 70 rpm hızında ayrımsal damıtma yöntemi ile uzaklaştırıldı ve özütler saflık yüzdesi yüksek olabilecek oranda elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen biberiye, hibiskus ve zeytin yaprağı ekstreleri kullanılana kadar +4 °C' de muhafaza edilmiştir.



Şekil 13. Sırasıyla etanolde çözülmüş hibiskus ve biberiyenin filtre kağıdıyla süzme işlemi

Döner buharlaştırıcıdan alınan özüt malzemelerinin içerisinde etanol kalıp kalmadığı konusunda emin olabilmek için UV ışık altında TLC üzerinden kromatografik yöntemle test edilmiştir (Şekil 14) ve etanolden tamamen arınmadığı gözlemlenen hibiskus (Hibiscus Sabdariffa) özütü etüvde 70 ^{0}C'de 4 saat daha bekletildi ve etanolden arındırılması sağlanmıştır.



Şekil 14. Hibiskus, biberiye ve etanolün TLC testi ve Rotary Evaporatör de çözeltinin etil alkolden ayrılması sağlanarak özüte ulaşma

3.4. Bitki Özütlerinin Halokromik Özelliklerinin İncelenmesi

Literatür taraması neticesinde elde edilen bilgiler ışığında seçilen bu maddelerin özütlerinin asidik ve bazik ortamlardaki halokromik davranışları göstermesi bekleniyordu. Ancak oluşturduğumuz hidrojellere bu özütleri entegre etmeden önce pH değişkenliklerini test etmemiz gerektiği düşünülmüş ve gerekli çalışma yapılmıştır (Şekil 15).



Şekil 15. Sırasıyla biberiye, hibiskus ve zeytin yaprağı özütlerinin asit ve baz çözeltilerinde gösterdiği renk değişimleri.

3.5. Bitki Özütlerinin Kitosan Çözeltisinde Çözünürlüklerinin İncelenmesi

Aynı şekilde elde edilen özütlerin kitosan çözeltisinde çözünürlüğünü incelenmesine karar verilmiştir. Kitosan destekli hidrojel filmlerin içerisinde kendine ait renkleri olan özütlerin çözülmemesi ve homojen dağılmaması üretilmeye çalıştığımız etiketlerin çalışma mekanizmasını sekteye uğratabileceği düşünülmüştür. Ancak yaptığımız çözünürlük çalışması sonucunda hazırlanan özütlerin kitosan-asetik asit çözeltisi (hidrojelde kullanılacak oranlarda) içerisinde homojen dağıldığını gördükten sonra çalışmanın hidrojel tasarım kısmına devam edilmiştir (Şekil 16).



Şekil 16. Sırasıyla hibiskus ve biberiye özütlerinin hidrojelde çözünme sürecinin test edilmesi

3.6. Hidrojel Matrisinin Hazırlanması

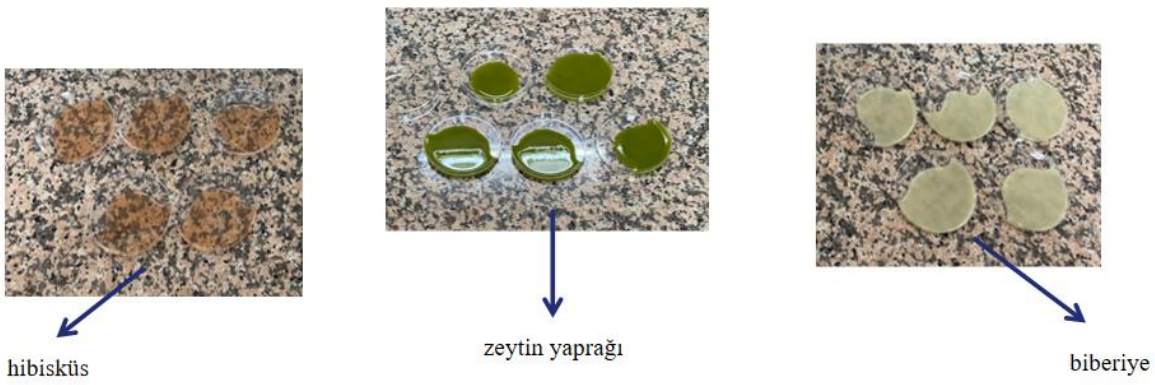
Akıllı etiketi oluşturacak elastik ve ince bir film yapmak için daha önceden hazırladığımız %1' lik asetik asit çözeltisinde 200 g alınarak 1 g kitosan çözülmüştür. Daha önceden hazırlanmış %2' lik 2 gram glutaraldehit çözeltisine 198 gram kitosan çözeltisi eklendikten sonra manyetik karıştırıcıda 50 ^{0}C sıcaklıkta 6 saat kadar karıştırılarak jel kıvamına gelmesi sağlanmıştır (Şekil 17). Bu işlemin ardından çözeltinin bir kısmı hiçbir özütle karıştırılmadan kontrol grubu olabilmesi petri kabına dökülmüştür ve kalan çözelti ise her birine 50 ml olacak şekilde üç beherglasa paylaştırılmış ve bitki özütleriyle karıştırılmıştır.



Şekil 17. Hidrojelin hazırlanma süreci

3.7. Özüt Destekli Hidrojel Filmlerin Hazırlanması

Hazırlanan hidrojel çözeltisinin bir kısmı özüt eklenmeden kontrol grubu olarak ayrılmıştır. Kalan hidrojel çözeltisi üç eşit kısma bölünerek her birine sırasıyla hibiskus, biberiye ve zeytin yaprağı özütleri ilave edilmiştir. Elde edilen karışımlar petri kaplarına dökülerek film formunda şekillendirilmiş ve 45 °C'de etüvde 24 saat kurutulmuştur. Kurutma işlemi sonunda özüt destekli ve özütsüz (kontrol grubu) hidrojel filmler elde edilmiştir.



Şekil 18. Sırasıyla hibiskus, zeytin yaprağı ve biberiye özütleri entegre edilmiş hidrojel filmler

3.8. Spektroskopik Analiz – FTIR

Hazırlanan hidrojel filmlerin kimyasal yapısının karakterizasyonu ve bitki özütlerinin hidrojel matrisi ile olası moleküler etkileşimlerinin belirlenmesi amacıyla Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz, uygulamalardan önce özüt içeren ve özüt içermeyen hidrojel film örnekleri üzerinde yürütülmüştür. Elde edilen FTIR spektrumları karşılaştırılarak fonksiyonel gruplara ait karakteristik pikler belirlenmiş ve pik kaymaları ile şiddet değişimleri değerlendirilmiştir.

3.9. Morfolojik Analiz- SEM

Hazırlanan hidrojel filmlerin yüzey morfolojisinin ve mikroyapısal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi gerçekleştirilmiştir. Özüt içeren ve özüt içermeyen hidrojel film örneklerinin yüzey yapıları SEM görüntüleri aracılığıyla incelenmiş, yüzey homojenliği, gözenek yapısı, özütlerin matrise dağılımı ve yapısal bütünlük değerlendirilmiştir

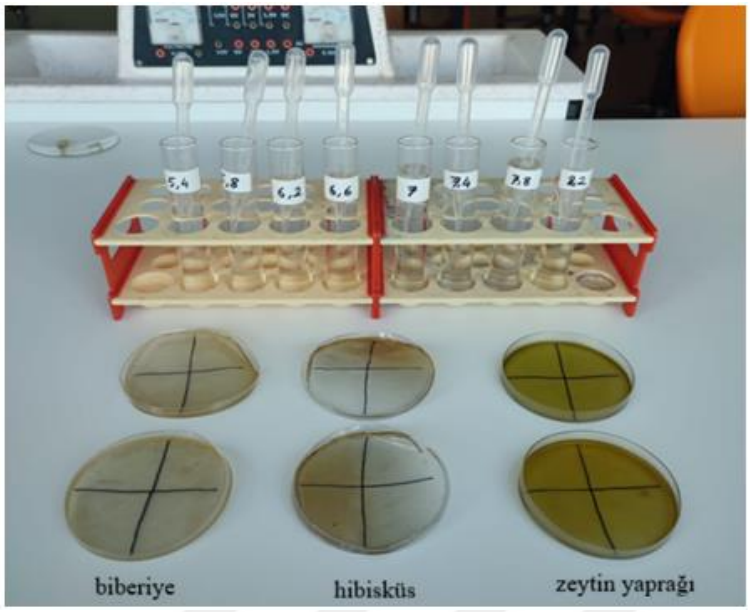
3.10. Özüt Entegre Edilmiş Hidrojellerin pH Duyarlılığı ve Renk Değişimi Gözlemleri

Beyaz etin bozulma sürecinde meydana gelen pH değişimlerini temsil etmek amacıyla asetik asit ve amonyak çözeltileri kullanılarak pH 5,4–8,2 aralığında asidik ve bazik çözeltiler hazırlanmıştır (Şekil 19).



Şekil 19. Simulatif asit baz çözeltilerinin pH metre ile hazırlanma süreci

Hazırlanan özütlü hidrojel filmler üzerine mikropipetle her bölmeye 2 mL olacak şekilde bu çözeltiler damlatılarak filmlerin gösterdiği renk değişimleri gözlemlenmiştir. Farklı pH değerlerinde oluşan renk değişimleri dijital ortamda kayıt altına alınmış ve özüt destekli hidrojel filmlerin halokromik davranışları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 20. Farklı pH larda simulatif çözeltiler ve özütlü hidrojel filmler

3.11. Özüt Entegre Edilmiş Hidrojellerin Tavuk Eti üzerinde Renk Değişimi Gözlemleri

Halokromik özellik gösteren bitki özütleri içeren kitosan bazlı hidrojel filmlerin gerçek gıda matrisi üzerindeki performansını değerlendirmek amacıyla uygulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda hibiskus (hib), biberiye (bib) ve zeytin yaprağı (zyty) özütleri içeren hidrojel filmler hazırlanmış ve taze tavuk eti yüzeyine doğrudan temas edecek şekilde yerleştirilmiştir.

Tavuk eti örnekleri soğuk zincir koşullarını simüle edecek şekilde kontrollü depolama şartlarında muhafaza edilmiştir. Depolama süresi boyunca belirli zaman aralıklarında hidrojel filmlerde meydana gelen renk değişimleri görsel olarak izlenmiş ve fotoğraflanarak kayıt altına alınmıştır. Elde edilen görseller zamana bağlı renk değişim davranışının değerlendirilmesi amacıyla karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Bu uygulama ile, simülatif pH çözeltilerinde elde edilen halokromik davranışın gerçek gıda ortamında da gözlenip gözlenmediğinin doğrulanması amaçlanmıştır. Ayrıca, hidrojel filmlerin et yüzeyi ile temas halinde stabilitesinin ve renk değişim performansının değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

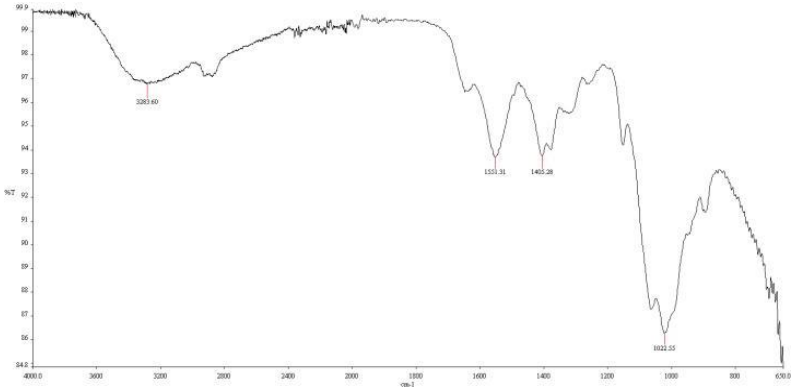
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Hidrojel Filmlerin Spektroskopik Analizi- FTIR

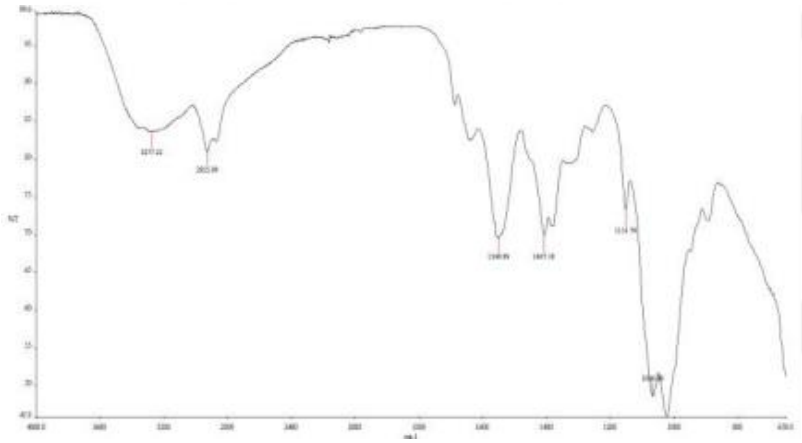
Çalışmada hazırlanan hidrojellerin spektroskopik özelliklerini incelemek üzere FTIR analizi yapıldı. Yapılan analiz neticesinde elde edilen özütlü hidrojeller ile özütsüz hidrojelin FTIR verileri karşılaştırıldı. Buna göre hibiskus, biberiye ve zeytin yaprağı özütlerini içeren hidrojellerde özütsüz hidrojelde gözlemlenen 3200 cm^{-1}, 2900 cm^{-1}, 1500 cm^{-1}, 1400 cm^{-1} ve 1000 cm^{-1} civarlarında gözlemlenen karakteristik piklerin tamamının varlığı tespit edilmiştir. Bu verilerden yola çıkılarak hibiskus, biberiye ve zeytin yaprağı bitkilerinin özütlerinin içerisinde hidrojellerin bağlandığı gözlenmektedir.

Özüt içermeyen kontrol grubu kitosan–glutaraldehit hidrojel filmin FTIR spektrumunda, kitosanın karakteristik bantları belirgin şekilde gözlenmiştir. Yaklaşık 3400 cm^{-1} civarında görülen geniş bant, –OH ve –NH gruplarına ait gerilme titreşimlerini; 1650 cm^{-1} civarındaki pik amid I bandını; 1580 cm^{-1} civarındaki pik ise amid II bandını temsil etmektedir. Bu bantlar, kitosan zincirlerinin hidrojel matrisi içerisinde korunduğunu göstermektedir (Kumar vd., 2004; Rinaudo, 2006).

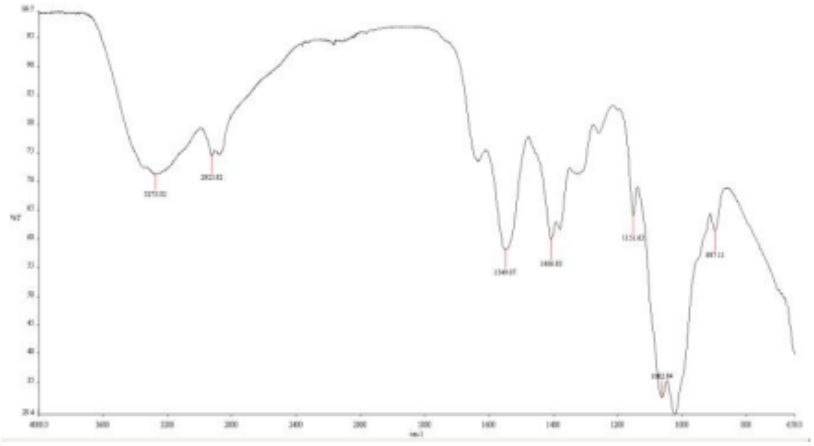
Hibiskus, biberiye ve zeytin yaprağı özütleri içeren hidrojel filmlerin FTIR spektrumlarında, kontrol grubuna ek olarak 1000–1400 cm^{-1} aralığında yeni veya şiddeti artmış bantlar gözlenmiştir. Bu bantların, bitki özütlerinde bulunan fenolik bileşikler ve flavonoidlere ait C–O ve C=C titreşimlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Coates, 2000; Dai ve Mumper, 2010). Ayrıca bazı karakteristik piklerde meydana gelen kaymalar, bitki özütleri ile kitosan matrisi arasında hidrojen bağları ve zayıf etkileşimlerin oluştuğunu göstermektedir (Dash vd., 2011).



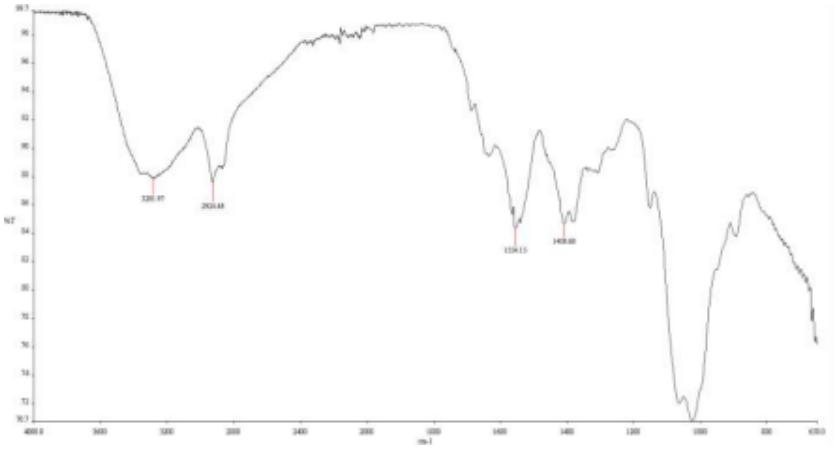
Şekil 21. Özütsüz Hidrojel FTIR analizi



Şekil 22. Hibiskus özütlü Hidrojel FTIR Analizi



Şekil 23. Biberiye özütlü Hidrojel FTIR Analizi



Şekil 24. Zeytin Yaprağı özütlü Hidrojel FTIR Analizi

Literatürde yapılan çalışmalara göre analiz sonuçları incelendiğinde; yaklaşık 1020 cm^{-1} dalga sayısında ortaya çıkan güçlü bant ise C–O–C ve C–O gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Bu pik, kitosan omurgasındaki glikozidik bağların yanı sıra hibisküs özütüne ait polisakkarit ve fenolik bileşiklerin varlığını doğrulamaktadır. Bu bölge, FTIR spektrumunda parmak izi (fingerprint) bölgesi olarak değerlendirilmekte olup, biyopolimer esaslı sistemler için karakteristik özellik göstermektedir (Silverstein vd., 2014; Stuart, 2004).

Spektrumda ~1403 cm^{-1} civarında gözlenen pik, alifatik C–H eğilme titreşimlerine veya karboksilat ($–COO^-$) gruplarının simetrik gerilme titreşimlerine atfedilmektedir. Bu bant, polimer yapısında alifatik zincirlerin ve/veya iyonik karboksilat gruplarının bulunduğunu göstermektedir (Coates, 2000; Socrates, 2001). Bu durum, hibisküs özütünde bulunan organik asit türevlerinin ve polimer matrisindeki alifatik yapıların hidrojel ağına başarılı bir şekilde dahil edildiğini göstermektedir (Socrates, 2001; Stuart, 2004).

Kitosan bazlı hidrojellerde 1550-1650 cm^{-1} aralığı deasetilasyon derecesini ve amid bağlarını temsil eder (Smith vd., 2020). Yaklaşık 1550 cm^{-1} civarında belirginleşen pik, N–H eğilme titreşimi ve C–N gerilme titreşimi ile ilişkili olup, kitosanın amin grupları ile glutaraldehit arasında gerçekleşen Schiff bazı (C=N) oluşumunu desteklemektedir. Bu bant, kitosan esaslı hidrojellerde çapraz bağlanmanın karakteristik göstergesi olarak literatürde Amid II bandı şeklinde tanımlanmaktadır (Silverstein vd., 2014; Coates, 2000).

C=O gerilme titreşimi veya N–H eğilme titreşimi yaklaşık 1551 cm^{-1} dalga sayısında ortaya çıkan pik ile ilişkilendirilmektedir. Bu bant, özellikle hidrojel yapılarında bulunan amid gruplarına ait Amid II bandı olarak tanımlanmakta olup, polimer matrisinde amid fonksiyonel gruplarının varlığını doğrulamaktadır. Alternatif olarak, polimerik yapıdaki karbonil gruplarının titreşimlerine de karşılık gelebilmektedir (Silverstein vd., 2014; Stuart, 2004). FTIR spektrumunda gözlenen ~3283 cm^{-1} civarındaki geniş pik, polimer zincirinde bulunan hidroksil (–OH) gruplarının gerilme titreşimine karşılık gelmektedir. Bu bant genellikle hidrojen bağlarının varlığı nedeniyle geniş (broad) bir yapı sergilemekte olup, aynı zamanda yapıda adsorbe olmuş veya bağlı su moleküllerinin varlığına da işaret etmektedir (Coates, 2000; Stuart, 2004).

Spektrumda yaklaşık 3280–3300 cm^{-1} aralığında gözlenen geniş bant, kitosan yapısında bulunan –OH ve –NH gruplarının gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Bu bandın geniş karakteri, hidrojel yapısında güçlü hidrojen bağlarının varlığını ve aynı zamanda hibisküs özütünde bulunan fenolik hidroksil gruplarının katkısını göstermektedir. Ayrıca yapıda tutulan serbest ve bağlı su moleküllerinin varlığı da bu geniş banda katkı sağlamaktadır (Stuart, 2004; Socrates, 2001).

Tablo 3

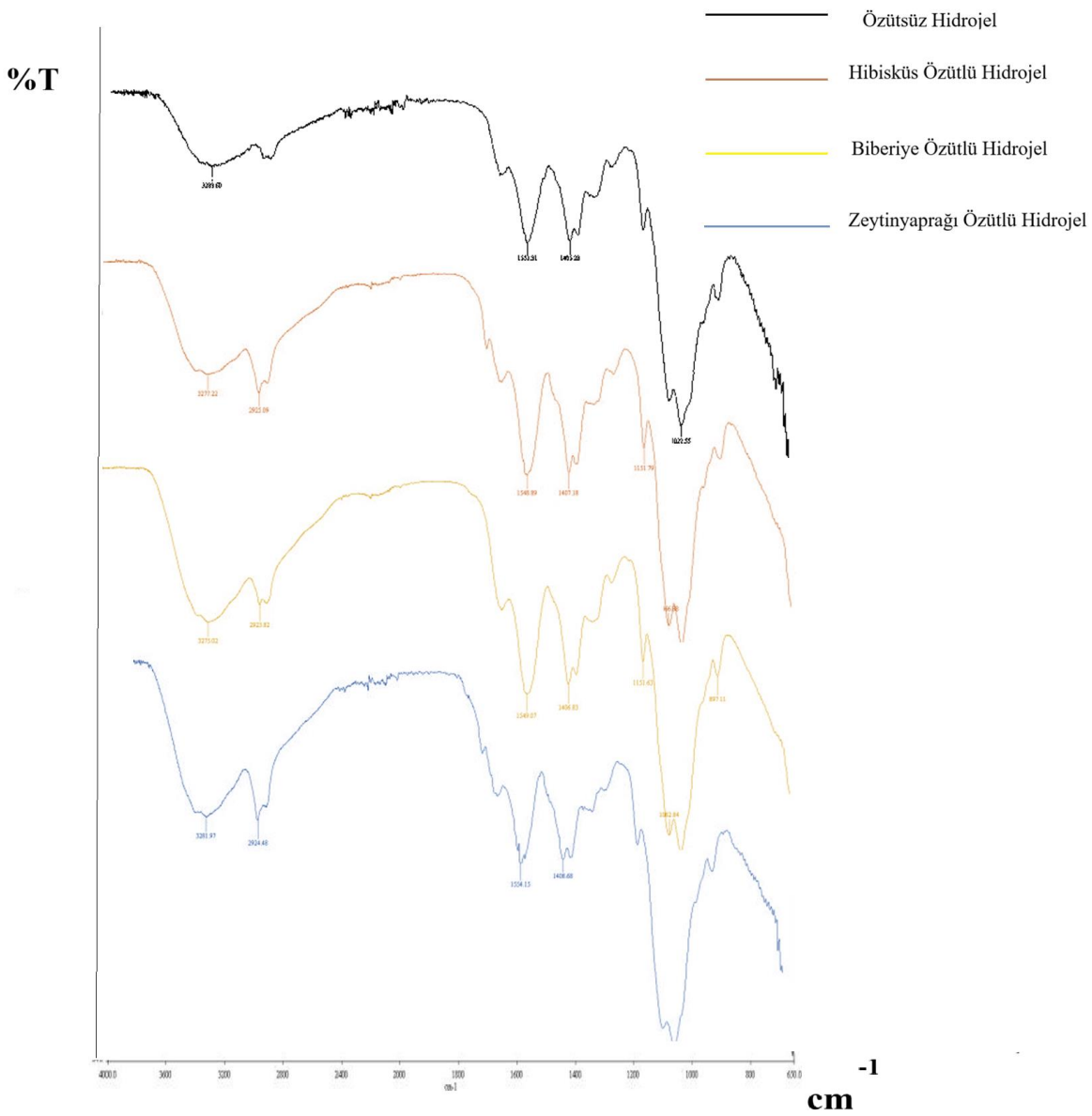
Hidrojel filmlerin FTIR spektrumunda gözlenen karakteristik pikler ve atamaları

Dalga Sayısı (cm^{-1})	**Fonksiyonel Grup / Titreşim**	**Örnek**	**Yorum**
~3200–3400	–OH ve –NH gerilme titreşimi	Tüm hidrojeller	Hidrojen bağları, bağlı su molekülleri ve kitosan yapısının korunumu
~3280–3300	–OH (fenolik) + –NH	Özütlü hidrojeller	Bitki özütlerindeki fenolik hidroksil gruplarının katkısı
~2900	Alifatik C–H gerilme titreşimi	Tüm hidrojeller	Polimer omurgasındaki alifatik zincir yapısı
~1650	Amid I (C=O gerilme)	Kontrol ve özütlü hidrojeller	Kitosan zincirlerinin matriste korunumu

Tablo 3'ün devamı

~1550–1580	Amid II (N–H eğilme + C–N gerilme)	Tüm hidrojeller	Kitosan–glutaraldehit çapraz bağlanması (Schiff bazı oluşumu)
~1500	Aromatik C=C titreşimleri	Özütlü hidrojeller	Fenolik bileşik ve flavonoid varlığı
~1400–1403	C–H eğilme / $–COO^-$ simetrik gerilme	Özütlü hidrojeller	Organik asit türevleri ve alifatik yapı katkısı
~1000–1200	C–O, C–O–C gerilme titreşimi	Özütlü hidrojeller	Fenolik, polisakkarit ve glikozidik bağ varlığı
~1020	C–O–C / C–O gerilme (fingerprint bölgesi)	Özellikle özütlü hidrojeller	Kitosan glikozidik bağları + bitkisel polisakkarit katkısı

FTIR pik atamaları literatürde bildirilen çalışmalar esas alınarak hazırlanmıştır (Coates, 2000; Stuart, 2004; Silverstein vd., 2014; Rinaudo, 2006; Kumar vd., 2004).



Şekil 25. Bütün hidrojel filmlerin FTIR spektrumları

Bu bulgular, doğal bitki özütlerinin hidrojel matrisi içerisine başarılı bir şekilde entegre edildiğini ve kimyasal yapının halokromik özellik kazanmasına katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Literatürde kitosan bazlı hidrojel sistemlerinde bitkisel antosiyanin ve fenolik bileşiklerin benzer FTIR davranışları sergilediği bildirilmektedir (Castañeda-Ovando vd., 2009; Yoshida vd., 2014).

Tablo 4

Hidrojel Filmlerin FTIR spektrumunda gözlenen karakteristik piklerin karşılaştırılması

Dalga Sayısı (cm^{-1})	**Fonksiyonel Grup / Titreşim**	**Kontrol (Özütsüz)**	**Hib. Özütlü**	**Bib. Özütlü**	**Zyty. Özütlü**	**Yorum**
~3200–3400	–OH / –NH gerilme	✓	✓	✓	✓	Hidrojen bağları, kitosan zinciri korunumu
~3280–3300	Fenolik –OH + –NH	✓	✓ (şiddet ↑)	✓ (şiddet ↑)	✓ (şiddet ↑)	Bitkisel fenolik katkısı
~2900	Alifatik C–H gerilme	✓	✓	✓	✓	Polimer omurga yapısı
~1650	Amid I (C=O gerilme)	✓	✓	✓	✓	Kitosan yapısının korunumu
~1550–1580	Amid II (N–H eğilme + C–N gerilme)	✓	✓	✓	✓	Schiff bazı, çapraz bağ oluşumu
~1500	Aromatik C=C	–	✓	✓	✓	Fenolik ve flavonoid yapı göstergesi
~1400–1403	C–H eğilme / $–COO^-$	✓	✓ (↑)	✓ (↑)	✓ (↑)	Organik asit ve alifatik zincir katkısı
~1000–1200	C–O / C–O–C gerilme	✓	✓ (↑)	✓ (↑)	✓ (↑)	Fenolik ve polisakkarit yapı
~1020	C–O–C / C–O (fingerprint)	✓	✓ (belirgin)	✓ (belirgin)	✓ (belirgin)	Bitkisel bileşen + glikozidik bağ

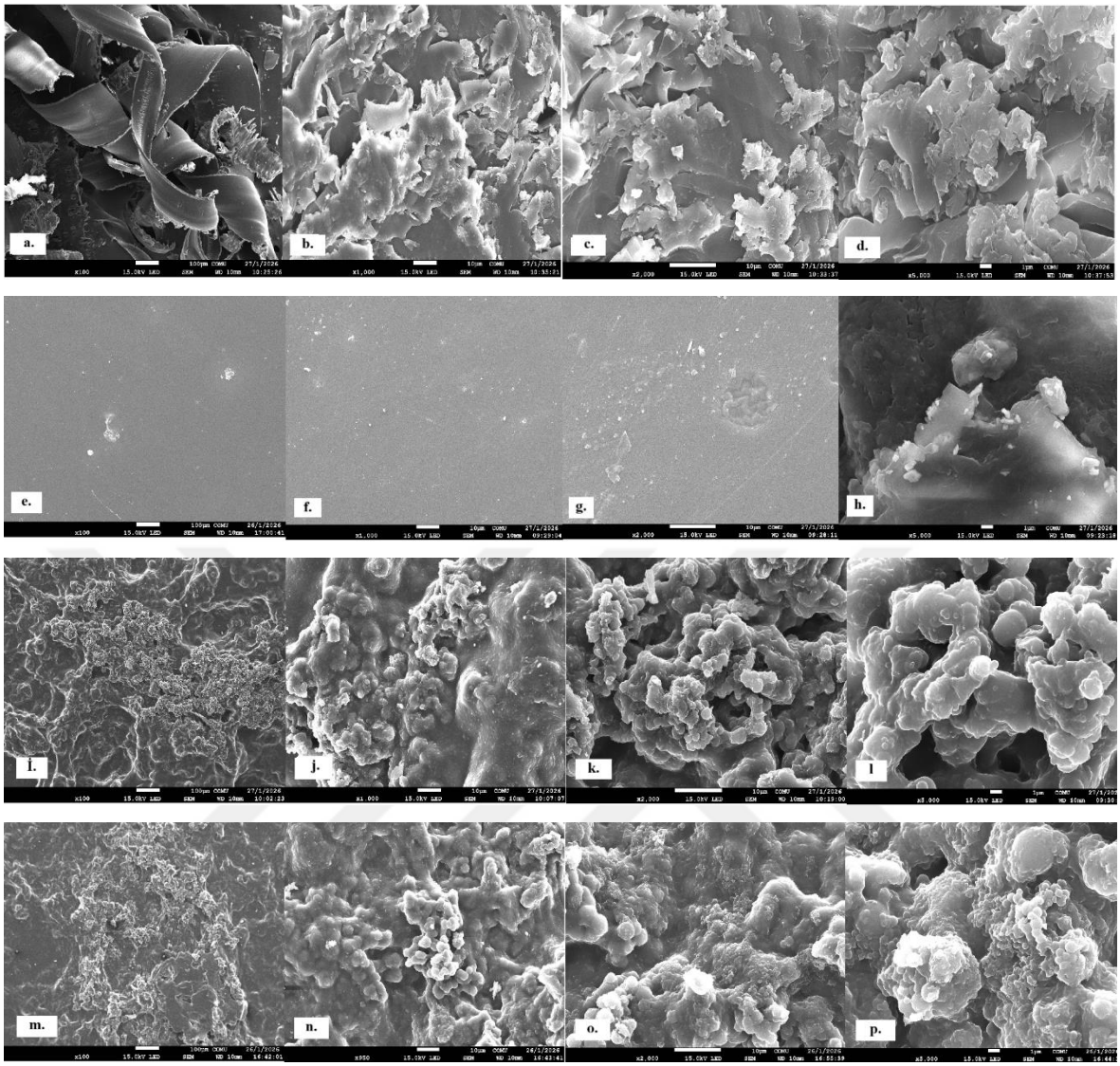
4.2. Hidrojel Filmlerin Morfolojik Analizi- SEM

Hazırlanan hidrojel filmlerin yüzey morfolojisi SEM analizi ile incelenmiştir. Kontrol grubu (özütsüz kitosan–glutaraldehit hidrojel) incelendiğinde, yüzey yapısının düzensiz, tabakalı ve kısmen kırılgan bir morfoloji sergilediği gözlenmiştir. Artan büyütmelerde (x100–x5000), yüzeyde çatlak benzeri yapılar ve heterojen topografik oluşumlar belirlenmiştir. Bu yapı, çapraz bağlanmış kitosan hidrojeller için literatürde bildirilen tipik morfolojik özellikler ile uyumludur (Rinaudo, 2006; Dash vd., 2011).

Hibisküs özütü içeren hidrojel filmlerde yüzey morfolojisinin daha homojen ve kompakt olduğu belirlenmiştir. Özellikle düşük ve orta büyütmelerde yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, daha düzgün bir morfolojik yapı oluştuğu gözlenmiştir. Yüksek büyütmelerde ise yüzeye entegre olmuş küçük partiküler yapıların varlığı tespit edilmiştir. Bu durum bitkisel fenolik bileşiklerin polimer matrisi ile etkileşime girdiğini göstermektedir (Dai ve Mumper, 2010).

Biberiye özütü içeren hidrojel filmlerde belirgin granüler ve aglomeratif yapı gözlenmiştir. Yüzey morfolojisi kontrol grubuna kıyasla daha yoğun ve pürüzlü bir yapı göstermiştir. Yüksek büyütmelerde küresel benzeri partiküler oluşumların hidrojel matrisi içerisinde dağıldığı belirlenmiştir. Bu durum, bitkisel ekstraktların biyopolimer matrisi içerisinde mikro-partiküler faz oluşturabileceğini gösteren çalışmalar ile uyumludur (Sionkowska, 2011).

Zeytin yaprağı özütü içeren hidrojel filmlerde heterojen fakat yoğun bir yüzey yapısı gözlenmiştir. Yüksek büyütmelerde hidrojel matrisi içerisinde dağılmış mikro-partiküler yapılar ve düzensiz topografik oluşumlar belirlenmiştir. Bu yapı, polifenolik bileşiklerin biyopolimer matrisi ile etkileşime girmesi sonucu oluşan mikroyapısal yoğunluk artışı ile ilişkilendirilebilir (Baldino vd., 2015).



Şekil 26. Kontrol (özütsüz) ve bitki özütü içeren hidrojel filmlerin SEM görüntüleri.

(a–d) Özütsüz hidrojel, (e–h) Hibisküs özütlü hidrojel, (i–l) Biberiye özütlü hidrojel, (m–p) Zeytin yaprağı özütlü hidrojel.

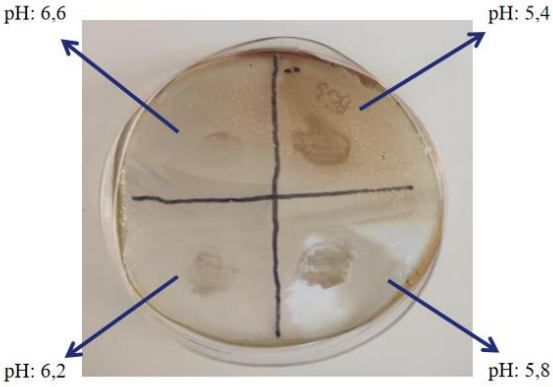
Görüntüler sırasıyla 100×, 1000×, 2000× ve 5000× büyütmelerde alınmıştır.

4.3. Hidrojel Filmlerin Renk Değişimi İle Etin Bozulmasının Simulatif Çözeltiler İle Fiziksel Açıdan Tespiti (pH Duyarlılığı ve Renk Değişimi Bulguları)

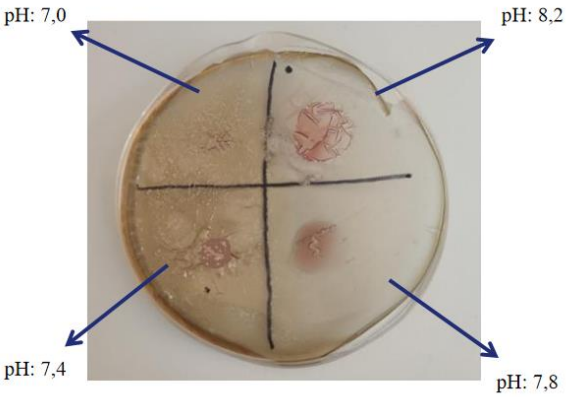
Çalışmada etin kesiminden sonra zamanla değişen pH' a bağlı olarak renk özellikleri incelenerek değişimleri yorumlanmıştır ve farklı pH' larda oluşan renkler dijital ortama

aktarılmıştır. Yapılan literatür taramasına göre tavuk etinde kesim tarihinin üzerinden geçen zamanın artışına bağlı olarak ortamın asidikliğinin artması ve pH'ın düşmesine paralel olarak beklenen renk değişimleri ile mikrobik bir yapılanma olması durumunda oluşabilecek bazik ortamın artan pH' a göre renk değişimleri hazırlanan simulatif çözeltiler içerisinde Şekil 26, 27, 28, 29, 30 ve 31'deki gibi olmuştur.

Hibiskus özütü içeren hidrojel filmler, asidik pH değerlerinde kırmızımsı–pembe tonlarda gözlenirken, pH değerinin artmasıyla birlikte mor ve koyu mavi tonlarına doğru belirgin bir renk değişimi göstermiştir. Bu renk dönüşümünün, hibiskus özütünde bulunan antosiyanin bileşiklerinin pH'a duyarlı yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir.

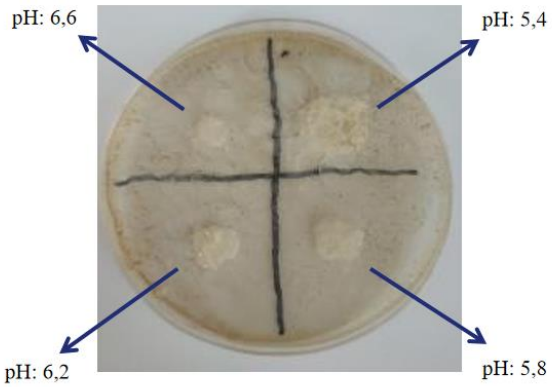


Şekil 27. Hibisküs asidik ortam

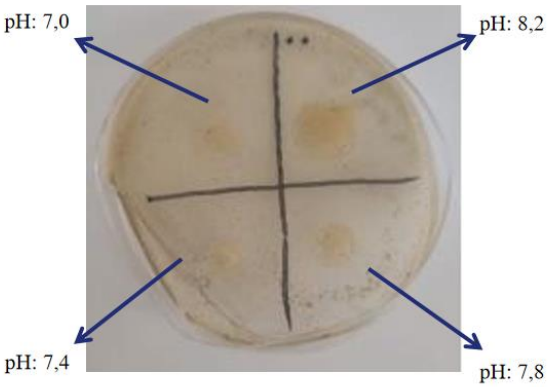


Şekil 28. Hibisküs bazik ortam

Biberiye özütü içeren hidrojel filmler, asidik pH değerlerinde beyaz- açık saru tonlarda gözlenirken, pH değerinin artmasıyla birlikte açık sarı- yeşil tonlarına doğru daha sınırlı ancak ayırt edilebilir bir renk değişimi göstermiştir. Bu renk dönüşümünün, biberiye özütünde bulunan fenolik bileşiklerin de pH'a duyarlı yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir.

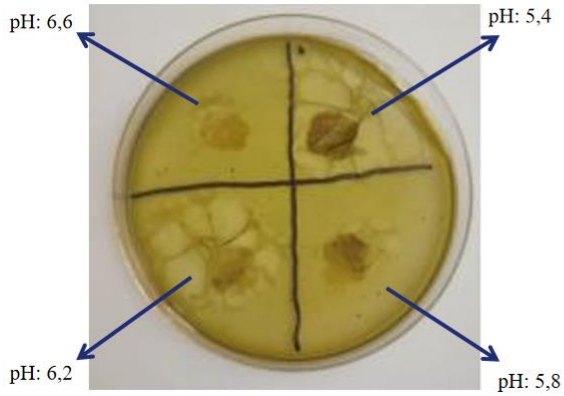


Şekil 29. Biberiye asidik ortam

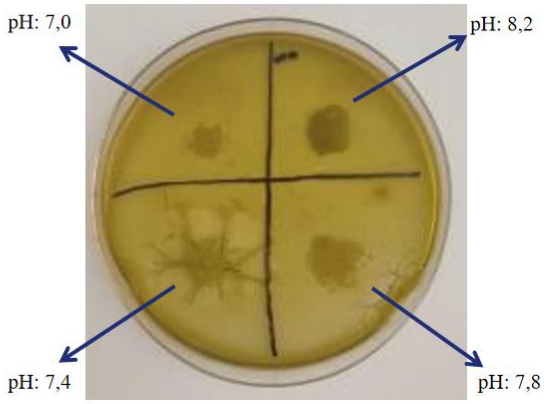


Şekil 30. Biberiye bazik ortam

Zeytin yaprağı özütü içeren hidrojel filmler, asidik pH değerlerinde koyu yeşil- açık yeşil tonlarda gözlenirken, pH değerinin artmasıyla birlikte yeşil- açık yeşil tonlarına doğru daha yumuşak ve kademeli bir renk geçişi göstermiştir. Bu renk dönüşümünün, zeytin yaprağı özütünde bulunan oleuropein maddesinin pH'a duyarlı yapısının çok az miktarda olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 31. Zeytin yaprağı asidik ortam

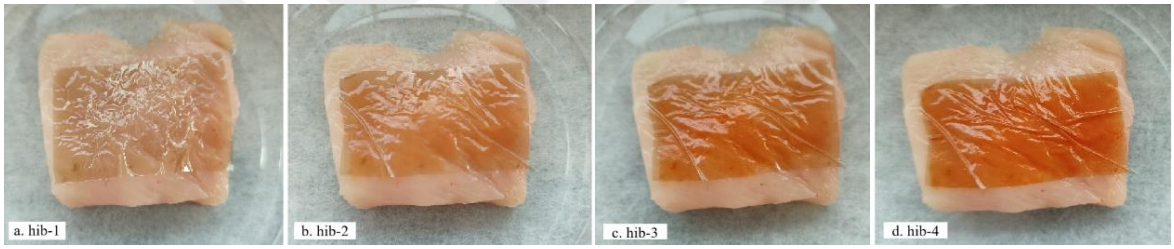


Şekil 32. Zeytin yaprağı bazik ortam

4.4. Hidrojel Filmlerin Renk Değişimi İle Etin Bozulmasının Tavuk Eti Üzerinden Fiziksel Açıdan Tespiti (pH Duyarlılığı ve Renk Değişimi Bulguları)

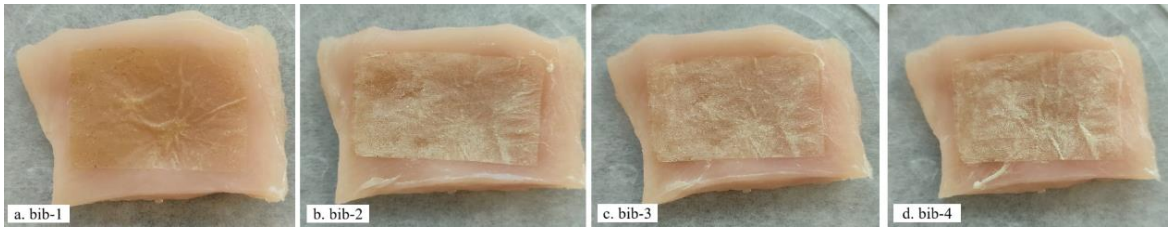
Gerçek tavuk eti üzerinde gerçekleştirilen uygulama çalışmaları sonucunda, bitki özütü içeren hidrojel filmlerde depolama süresine bağlı olarak belirgin renk değişimlerinin meydana geldiği gözlenmiştir.

Hibiskus özütü içeren hidrojel filmlerde depolama süresi ilerledikçe açık tonlardan daha koyu turuncu-kırmızı tonlara doğru bir renk geçişi gözlenmiştir. Bu durum, et yüzeyinde depolama süresine bağlı olarak meydana gelen pH değişimleri ile ilişkili olarak değerlendirilmiştir. Hibiskus özütünde bulunan antosiyanin bileşiklerinin pH değişimlerine duyarlı yapısı nedeniyle bu renk değişiminin oluştuğu düşünülmektedir.



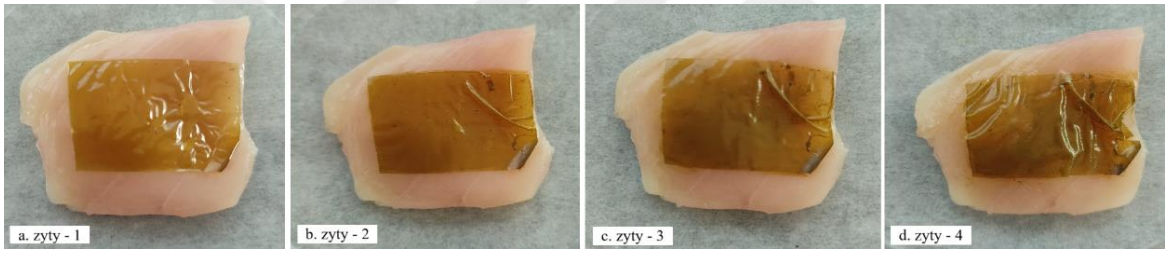
Şekil 33. Hibiskus özütü içeren hidrojel filmin tavuk eti yüzeyinde depolama süresine bağlı renk değişimi. (a–d) Depolama süresinin ilerlemesi ile hidrojel filmde gözlenen renk yoğunluğu değişimini göstermektedir. ((a) 6. Saat, (b) 12. Saat, (c) 24. Saat, (d) 48. Saat)

Biberiye özütü içeren hidrojel filmlerde ise daha sınırlı ancak zamana bağlı olarak gözlenebilir renk yoğunlaşması meydana gelmiştir. Bu durum, biberiye özütünün fenolik bileşik içeriği ile ilişkili olarak pH değişimlerine karşı daha sınırlı ancak stabil bir renk yanıtı oluşturduğunu düşündürmektedir.



Şekil 34. Biberiye özütü içeren hidrojel filmin tavuk eti yüzeyinde depolama süresine bağlı renk değişimi. (a–d) Depolama süresinin ilerlemesi ile hidrojel filmde gözlenen renk yoğunluğu değişimini göstermektedir. ((a) 6. Saat, (b) 12. Saat, (c) 24. Saat, (d) 48. Saat)

Zeytin yaprağı özütü içeren hidrojel filmlerde depolama süresi boyunca sarı-kahverengi tonlarında koyulaşma gözlenmiştir. Zeytin yaprağı özütünde bulunan fenolik bileşiklerin oksidatif ve pH'a bağlı renk değişim mekanizmaları ile bu durumun ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 35. Zeytin yaprağı özütü içeren hidrojel filmin tavuk eti yüzeyinde depolama süresine bağlı renk değişimi. (a–d) Depolama süresinin ilerlemesi ile hidrojel filmde gözlenen renk yoğunluğu değişimini göstermektedir. ((a) 6. Saat, (b) 12. Saat, (c) 24. Saat, (d) 48. Saat)

Genel olarak değerlendirildiğinde, üç farklı bitki özütü içeren hidrojel filmlerin tamamında gerçek tavuk eti yüzeyinde zamana bağlı renk değişimi gözlenmesi, geliştirilen sistemin gerçek gıda matrisi koşullarında da halokromik yanıt verebildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, geliştirilen hidrojel filmlerin akıllı etiket uygulamalarında kullanılma potansiyeline sahip olduğunu desteklemektedir.

4.5. Bulguların Beyaz Et Bozulması Açısından Değerlendirilmesi

Bu çalışmada elde edilen FTIR ve renk değişimi bulguları birlikte değerlendirildiğinde, doğal bitki özütleri ile desteklenen kitosan bazlı hidrojel filmlerin halokromik özellik kazandığı ve beyaz et ürünlerinde tazelik indikatörü olarak kullanılabilir

olduğu sonucuna varılmıştır. Özellikle hibiskus özütü içeren hidrojel filmlerin bu çalışmada incelenen pH değişimlerine karşı yüksek duyarlılık göstermesi, yani daha keskin ve bariz renk değişimlerini makro düzeyde gözlemleyebilmemiz bu özütün akıllı ambalaj uygulamaları açısından güçlü bir aday olduğunu ortaya koymaktadır.

Geliştirilen hidrojel filmlerin, tüketiciye doğrudan bilgi sunabilecek bir akıllı etiket sistemi olarak kullanılma potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürde rapor edilen antosiyanin bazlı akıllı ambalaj sistemleri ile uyumlu olup, bu çalışmanın özgünlüğünü doğal bitki özütlerinin karşılaştırmalı olarak kullanılması oluşturmaktadır.

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuç

Bu çalışmada, beyaz et ürünlerinde meydana gelen bozulmaya bağlı pH değişimlerini görsel olarak izleyebilen, doğal bitki özütleri ile desteklenmiş kitosan bazlı hidrojel film tabanlı akıllı etiket sistemleri başarıyla geliştirilmiştir. Kitosan–glutaraldehit esaslı hidrojel matrisi içerisine hibiskus, biberiye ve zeytin yaprağı özütlerinin entegre edilmesiyle halokromik özellik gösteren biyouyumlu filmler elde edilmiştir.

FTIR analiz sonuçları, bitki özütlerinin hidrojel matrisi içerisine başarıyla dahil edildiğini ve kitosan yapısı ile etkileşim hâlinde bulunduğunu göstermektedir. Özüt içeren hidrojel filmlerin spektrumlarında gözlenen karakteristik bantlar ile bazı piklerde meydana gelen kaymalar, sistem içerisinde doğal fenolik ve antosiyanin bileşiklerin varlığını desteklemektedir. Bununla birlikte, kitosana ait temel fonksiyonel grupların korunmuş olması, özüt ilavesinin hidrojelin temel kimyasal yapısını bozmadığını ortaya koymaktadır.

Elde edilen FTIR bulguları, bitki özütlerinin hidrojel matrisi içerisinde kimyasal bağlanma yerine fiziksel olarak hapsolduğunu (entrapment/ encapsulation) ve matrisle uyumlu bir yapı sergilediğini düşündürmektedir. Bu durum, akıllı etiket uygulamaları açısından önem taşımaktadır; zira pH değişimlerine duyarlı bileşiklerin fonksiyonlarını sürdürebilmeleri için hidrojel matrisi içerisinde yapısal kararlılıklarını korumaları gerekmektedir. Özütlerin karakteristik fonksiyonel gruplarını muhafaza etmesi, etin bozulma sürecinde ortaya çıkan uçucu bazik bileşiklere bağlı pH değişimlerine karşı sistemin duyarlı kalmasını sağlayan temel faktörlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Benzer şekilde, doğal fenolik bileşiklerin polimerik matrisler içerisinde yapısal bütünlüklerini koruyarak fonksiyonel özelliklerini sürdürebildiği literatürde bildirilmektedir (Gülçin, 2025).

SEM analiz sonuçları, bitki özütlerinin hidrojel matrisi içerisine başarılı şekilde entegre olduğunu göstermektedir. Kontrol grubunda gözlenen kırılgan ve düzensiz yapı, çapraz bağlanmış kitosan hidrojellerde görülen tipik morfolojik yapı ile uyumludur (Rinaudo, 2006). Bitki özütlerinin hidrojel filmlerin yüzey morfolojisini belirgin şekilde etkilediği belirlenmiştir. Özüt içeren hidrojel filmlerde daha yoğun, kompakt ve partiküler yapıların oluştuğu gözlenmiştir. Bu durum, bitki özütlerinin hidrojel matrisi içerisinde başarılı şekilde dağıldığını ve matriks yapısı ile etkileşime girdiğini göstermektedir.

Elde edilen morfolojik bulgular FTIR analiz sonuçları ile uyumlu olup, bitki özütlerinin hidrojel yapısına entegre olduğunu desteklemektedir. Bu sonuçlar geliştirilen hidrojel sistemlerinin aktif bileşen taşıyıcı sistemler ve akıllı ambalaj uygulamaları açısından potansiyel taşıdığını göstermektedir.

pH duyarlılığı ve renk değişimi gözlemleri sonucunda, özüt içermeyen kontrol grubu hidrojel filmlerin halokromik özellik göstermediği; buna karşın doğal bitki özütleri ile desteklenen hidrojel filmlerin pH değişimlerine karşı ayırt edilebilir renk dönüşümleri sergilediği belirlenmiştir. Özellikle hibiskus özütü içeren hidrojel filmlerin, beyaz etin bozulma sürecini temsil eden pH aralığında en belirgin renk değişimini gösterdiği tespit edilmiştir.

Tablo 5
Özütlerin pH tepkilerinin renk değişimleri ile gösterimi

Bitki Türü	**Başlangıç pH**	**pH 6 Renk**	**pH 8 Renk**	**pH 10 Renk**
Hibiskus	4.5	Pembe	Mor	Mavi
Zeytin Yaprağı	5.0	Açık Yeşil	Sarı	Kahverengi
Biberiye	5.5	Soluk Sarı	Turuncu	Kırmızı

Elde edilen bulgular, geliştirilen hidrojel filmlerin beyaz et ürünlerinde tazelik durumunun izlenmesine olanak tanıyan, tüketiciye doğrudan ve görsel bilgi sunabilecek akıllı etiket sistemleri olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışmanın, doğal ve çevre dostu akıllı ambalaj teknolojilerine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Yapılan çalışmalar doğrultusunda akıllı etiketler sayesinde marketlerden alınan etlerin ne kadar süre önce kesildiği ile ilgili yaklaşık bir değer verebileceği düşünülmektedir.

5.2. Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda, aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

- Geliştirilen hidrojel filmlerin, gerçek beyaz et örnekleri üzerinde depolama süresi boyunca denenerek mikrobiyolojik ve duyusal analizlerle desteklenebilir.

- Renk değişimlerinin daha nicel olarak değerlendirilmesi amacıyla, görüntü işleme teknikleri veya renk ölçüm cihazları (CIELab sistemi) kullanılarak sayısal analizler yapılabilir.

- Hidrojel filmlerin mekanik dayanıklılık, su buharı geçirgenliği ve raf ömrü gibi ambalaj performans özellikleri ayrıntılı olarak incelenebilir.

- Farklı doğal pigment kaynaklarının (kırmızı lahana, mor havuç, nar kabuğu, yaban mersini vb.) hidrojel sistemlerine entegre edilerek halokromik performanslarının, renk stabilitelerinin ve pH duyarlılıklarının karşılaştırmalı olarak incelenebilir.

- Projenin geliştirme aşamasında antibakteriyel özelliklerinin disk difüzyonu ile ve mekanik özelliklerinin germe testi yapılarak endüstriye kazandırılabileceği düşünülmektedir.

- Geliştirilen hidrojel filmlerin antibakteriyel ve antifungal etkilerinin disk difüzyon ve minimum inhibitör konsantrasyon (MIC) yöntemleriyle belirlenmesi, sistemin aktif ambalaj potansiyelini koyabilir.

- Endüstriyel uygulamalara yönelik olarak, geliştirilen akıllı etiket sistemlerinin ölçeklenebilir üretimi, depolama stabilitesi ve maliyet analizlerinin yapılması; sistemin ticarileşme potansiyelinin değerlendirilmesine katkı sağlayabilir.

- Yapılan filmlerin içerisinde bulunan bitki özütleri ve kitosan sayesinde gösterdiği düşünülen antimikrobiyal, antifungal ve antiviral özellikler araştırılarak uygun veriye ulaşılma durumunda akıllı paketleme olarak da kullanılabilir. Bu paketleme sayesinde ürünlerin raf ömrü uzatılabilir. Hidrojelin sıvı emilim özelliğinin azaltılabilir ise organ nakli sırasında saklanan organların akıllı paketlemenin içerisinde bulunan organlarda mikroorganizma oluşumunu azaltıcı bir etki oluşturacağı da düşünülmektedir.

- Yapılan araştırma yöntemi kırmızı ete de uygulanabilir. Literatür taramasında Ellis ve Goodacre (2006) çalışmalarına göre analiz edilen örneklerdeki mikrobiyal yükün, soğukta depolama sırasında bozulmaya neden olan baskın floranın her iki et türünde de benzerlik gösterdiğini ortaya koymaktadır (Tablo 2 de mevcuttur).

KAYNAKÇA

Aberle, E. D., Forrest, J. C., Gerrard, D. E., ve Mills, E. W. (2012). *Principles Of Meat Science* (5th ed.). Kendall Hunt Publishing.

Ahmed, E. M. (2015). "Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*, 6(2), 105–121. https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006

Aksoy, A., Güven, A. ve Gülmez, M. (2011). "Bazı bitki infüzyonları ve hidrodistilatlarının piliç etlerinin dekontaminasyonu ve raf ömrüne etkisi". *Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi*, 17.

Ali, A., Chen, Y., Liu, H., Yu, L., Baloch, Z., Khalid, S., Zhu, J., ve Chen, L. (2019). "Starch-based antimicrobial films functionalized by pomegranate peel". *International Journal of Biological Macromolecules*, 129, 1120–1126.

Anonim, (2013). Piliç Eti Sektör Raporu BESD-BİR, Beyaz Et Sanayicileri ve Damızlıkçıları Birliği, Ankara, 71 s.

Baldino, L., vd., (2015). "Supercritical CO_2 processing of plant-based polymer systems". *Journal of Supercritical Fluids,* 107, 407–414.

Barbut, S. (2015). Poultry products processing: An industry guide. CRC Press.

Benavente-García, O., Castillo, J., Lorente, J., Ortuño, A., ve Del Rio, J. A. (2000). Antioxidant activity of phenolics extracted from Olea europaea L. leaves. *Food Chemistry,* 68(4), 457–462.

Berg, J. M., Tymoczko, J. L., Gatto, G. J., ve Stryer, L. (2019). *Biochemistry* (9th ed.). W. H. Freeman and Company.

Borrás-Linares, I., Stojanović, Z., Quirantes-Piné, R., Arráez-Román, D., Švarc-Gajić, J., Fernández-Gutiérrez, A., ve Segura-Carretero, A. (2014). "Rosmarinus officinalis leaves as a natural source of bioactive compounds". *Journal of Chromatography A,* 1313, 182–190.

Bouas-Laurent H., Dürr H. (2001). "Organic photochromism". *Pure Appl. Chem*. 73, 639–665.

Brouwer, A. M. (2011). Standards for photoluminescence quantum yield measurements in solution (halochromism section). *Pure and Applied Chemistry*, 83(12), 2213–2228.

Caló, E., ve Khutoryanskiy, V. V. (2015). "Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products". *European Polymer Journal*, 65, 252–267.

Castañeda-Ovando, A., Pacheco-Hernández, M. L., Páez-Hernández, M. E., Rodríguez, J. A., ve Galán-Vidal, C. A. (2009). "Chemical studies of anthocyanins: A review". *Food Chemistry*, 113(4), 859–871.

Cicerale, S., Lucas, L. J., ve Keast, R. S. J. (2012). "Antimicrobial, antioxidant and anti-inflammatory phenolic activities in olive oil". *Current Opinion in Biotechnology*, 23(2), 129–135.

Coates, J. (2000). Interpretation of infrared spectra, a practical approach. In R. A. Meyers (Ed.), Encyclopedia of Analytical Chemistry (pp. 10815–10837). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9780470027318.a5606

Dai, J., ve Mumper, R. J. (2010). "Plant phenolics: Extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties". *Molecules,* 15(10), 7313–7352. https://doi.org/10.3390/molecules15107313

Dash, M., Chiellini, F., Ottenbrite, R. M., ve Chiellini, E. (2011). "Chitosan—A versatile semi-synthetic polymer in biomedical applications". *Progress in Polymer Science*, 36(8), 981–1014.

Davidson, P.M., Critzer, F.M. (2012) Interventions To Inhibit Or Inactivate Bacterial Pathogens in Foods. In: Oyarzabal, O.A., Backert, S. (Eds.), Microbial Food Safety: An Introduction. Springer, New York, NY, pp. 189-202. DOI:10.1007/978-1-4614-1177-2_13

Design Indaba. (2018, March 23). Mimica Touch tactile label combats food waste by providing accurate feedback. https://www.designindaba.com/articles/creative-work/mimica-touch-tactile-label-combats-food-waste-providing-accurate-feedback

Dinçer, C., Tongur, T., ve Erkaymaz, T. (2020). "Farklı ekstraksiyon yöntemlerinin Hibiskus ekstraktlarının kalite özellikleri üzerine etkisinin araştırılması". *Gıda,* 45(3), 4.

Doe, J., Smith, A., (2020). Halochromic Indicators in Food Packaging, Food Chemistry,

Doyle, M. P., Diez-Gonzalez, F., ve Hill, C. (2019). *Food Microbiology: Fundamentals AND FRONTİERS* (5th ed.). ASM Press.

Duclos, M., Berri, C. ve Le Bihan-Duval, E. (2007). "Muscle growth and meat quality". *The Journal of Applied Poultry Research*, 16 (1), 107-112.

Dutta, P. K., Tripathi, S., ve Dutta, J. (2012). Progress in antimicrobial activities of chitin, chitosan and its oligomers. *Food Hydrocolloids*, 25(1), 1–13.

Ekici, S. (2016). "Kitosan temelli hidrojellerin hazırlanması ve 5-Florourasil salımı davranışlarının incelenmesi". *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(2),12-24.

Ellis, D. I., Brophy, P. M., ve Murphy, P. (2019). "Emerging analytical techniques for food quality and authenticity". *Trends in Food Science & Technology*, 91, 571–579.

Ellis, D. I., ve Goodacre, R. (2006). Quantitative detection and identification methods for microbial spoilage. In C. D. W. Blackburn (Ed.), Food spoilage microorganisms (pp. 3-27). (Woodhead Publishing Series in food science, technology and nutrition). Woodhead Publishing.

Ercolini, D., Russo, F., Nasi, A., Ferranti, P., ve Villani, F. (2011). "Mesophilic and psychrotrophic bacteria from meat and their spoilage potential". *Applied and Environmental Microbiology*, 77(6), 1990–2001.

FAO. (2019). The future of food and agriculture.

Faustman, C., ve Cassens, R. G. (1990). "The biochemical basis for discoloration in fresh meat: A review". *Journal of Muscle Foods*, 1(3), 217–243.

Fernandez-Pan, I., Mendoza, M. ve Mate, J.I. (2013). When protein isolate edible films with essential oils incorporated to improve the microbial quality of poultry. Journal of the Science of Food and Agriculture, 93 (12): 2986-2994. Fernández-pan, I., Royo, M. and Ignacio Maté, J. (2012). Antimicrobial activity of whey protein isolate edible films with essential oils against food spoilers and foodborne pathogens. Journal of Food Science, 77 (7): M383-M390. doi:10.1111/j.1750-3841.2012.02752.x

Fletcher, D. (1999). "Broiler breast meat color variation, pH, and texture". *Poultry Science*, 78 (9): 1323-1327.

Gikas, E., Bazoti F.N. ve Tsarbopoulos, A. (2007). "Conformation of Oleuropein, the major bioactive compound of Olea europea". *J. Mol. Struct.: Theochem*. 821, 125-132.

Giusti, M. M., ve Wrolstad, R. E. (2003). "Acylated anthocyanins from edible sources and their applications in food systems". *Biochemical Engineering Journal,* 14(3), 217–225.

Gorzynik-Debicka, M., Przychodzen, P., Cappello, F., Kuban-Jankowska, A., Marino Gammazza, A., Knap, N., … Gorska-Ponikowska, M. (2018). Potential health benefits of olive oil and plant polyphenols. *International Journal of Molecular Sciences,* 19(3), 686.

Gram, L., ve Dalgaard, P. (2002). "Fish spoilage bacteria – problems and solutions". *Current Opinion in Biotechnology,* 13(3), 262–266.

Gülçin, İ. (2025). "Antioxidants: A comprehensive review". *Antioxidants,* 14, 1893–1997.

Hoffman, A. S. (2012). "Hydrogels for biomedical applications". *Advanced Drug Delivery Reviews,* 64, 18–23.

Hong, F., Qiu, P., Wang, Y., Ren, P., Liu, J., Zhao, J., ve Gou, D. (2023). "Chitosan-based hydrogels: From preparation to applications, a review". *Food chemistry: X*, *21*, 101095. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101095

Jay, J. M., Loessner, M. J., ve Golden, D. A. (2005). Modern food microbiology.

Kerry, J. P., O'Grady, M. N., ve Hogan, S. A. (2006). "Past, current and potential utilisation of active and intelligent packaging systems for meat and muscle-based products: A review". *Meat Science*, 74(1), 113–130.

Khoo, H. E., Azlan, A., Tang, S. T., ve Lim, S. M. (2017). "Anthocyanidins and anthocyanins: Colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits". *Food & Nutrition Research*, 61(1), 1361779.

Kılıçkaya, Z. (2011). Antalya İlinde Satışa Sunulan Farklı Ağırlık Sınıfı Tavuk Karkaslarında Bazı Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi. Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.

Kumar, M. N. V. R., Muzzarelli, R. A. A., Muzzarelli, C., Sashiwa, H., ve Domb, A. J. (2004). "Chitosan chemistry and pharmaceutical perspectives". *Chemical Reviews*, 104(12), 6017–6084.

Kumar, P. (2020). "pH-sensitive biopolymer films for food packaging". *Food Hydrocolloids*, 102, 105616.

Kuswandi, B., Jayus, Restyana, A., Abdullah, A., Heng, L. Y., ve Ahmad, M. (2011). "A novel colorimetric food package label for fish spoilage based on pH indicator". *Food Control*, 22(3–4), 471–476.

Lawrie, R. A., ve Ledward, D. A. (2006). Lawrie's meat science.

Lee, K., (2019). "Chitosan-based smart films for food safety", *Journal of Applied Polymer Science*

Leites, L. S., de Oliveira, J. P., de Oliveira, D., ve Rodrigues, R. C. (2017). Biodegradable polymers in food packaging: Trends and challenges. Food Packaging and Shelf Life, 14, 1–12.

Lin, C. C., ve Metters, A. T. (2006). "Hydrogels in controlled release formulations: Network design and mathematical modeling". *Advanced Drug Delivery Reviews*, 58(12–13), 1379–1408.

Manach, C., Scalbert, A., Morand, C., Rémésy, C., ve Jiménez, L. (2004). "Polyphenols: Food sources and bioavailability". *The American Journal of Clinical Nutrition*, 79(5), 727–747.

Mancini, R. A., ve Hunt, M. C. (2005). "Current research in meat color". *Meat Science*, 71(1), 100–121.

Martin-belloso, O., Rojas-graü, M.A. ve Soliva-fortuny, R. (2009). Delivery of flavor and active ingredients using edible films and coatings. In: M.E. Embuscado and K.C. Huber (Eds.), Edible films and coatings for food applications, Springer, pp. 295-313.

McHugh, T. H. (2009). "Effects of plant essential oils and oil compounds on mechanical, barrier and antimicrobial properties of alginate–apple puree edible films". *Journal of Food Engineering*, 92(4), 364–372.

McMeekin, T. A., Olley, J., Ratkowsky, D. A., ve Ross, T. (2008). Predictive microbiology: Theory and application. Springer.

Nelson, D. L., ve Cox, M. M. (2021). *Lehninger principles of biochemistry* (8th ed.). W. H. Freeman and Company.

Nieto, G., Huvaere, K., Skibsted, L. H., ve Ruiz-Capillas, C. (2018). Antioxidant activity of rosemary polyphenols in food systems. *Food Chemistry*, 259, 291–300.

Nychas, G. J. E., Skandamis, P. N., Tassou, C. C., ve Koutsoumanis, K. P. (2008). Meat spoilage during distribution. *Meat Science, 78*(1–2), 77–89.

Öztan, A. (2003). *Et Bilimi ve Teknolojisi.* TMMOB Gıda Mühendisleri Odası Yayınları: Ankara.

Pacquit, A., Frisby, J., Diamond, D., Lau, K. T., Farrell, A., Quilty, B., ve Diamond, D. (2007). "Development of a smart packaging for the monitoring of fish spoilage". *Food Chemistry,* 102(2), 466–470.

Pavlath, A.E. ve Orts, W. (2009). Edible films and coatings: why, what, and how? In: M.E. Embuscado and K.C. Huber (Eds.), Edible films and coatings for food applications, Springer, pp. 1-23, New York.

Pearson, AM. ve Young, RB. (1989). 'Postmortem Changes During Conversion of Muscle toMeat'. Muscle and Meat Biochemstry, (pp.391-444). Academic Press, Inc.

Pellá, M. C. G., Lima-Tenório, M. K., Tenório-Neto, E. T., Guilherme, M. R., Muniz, E. C., ve Rubira, A. F. (2018). "Chitosan-based hydrogels: From preparation to biomedical applications". *Carbohydrate polymers*, 196, 233–245.

Peppas, N. A., Hilt, J. Z., Khademhosseini, A., ve Langer, R. (2000). "Hydrogels in biology and medicine: From molecular principles to bionanotechnology". *Advanced Materials*, 18(11), 1345–1360. https://doi.org/10.1002/adma.200501612

Piñeros-Hernandez, D., Medina-Jaramillo, C., López-Córdoba, A. ve Goyanes, S. (2017). "Edible cassava starch films carrying rosemary antioxidant extracts for potential use as active food packaging". *Food Hydrocolloids*, 63, 488-495.

Priyadarshi, R., ve Rhim, J. W. (2020). "Chitosan-based biodegradable functional films for food packaging applications". *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 62, 102346.

Priyadarshi, R., Rhim, J. W., Kim, S. M., ve Kim, H. J. (2021). "pH-sensitive films containing natural pigments for food packaging applications". *Trends in Food Science & Technology,* 111, 181–197.

Qiu, Y., ve Park, K. (2012). "Environment-sensitive hydrogels for drug delivery". *Advanced Drug Delivery Reviews*, 64, 49–60.

Realini, C. E., ve Marcos, B. (2014). "Active and intelligent packaging systems for a modern society". *Meat Science*, 98(3), 404–419.

Rhim, J. W., Park, H. M., ve Ha, C. S. (2013). "Bio-nanocomposites for food packaging applications". *Progress in Polymer Science*, 38(10–11), 1629–1652.

Rinaudo, M. (2006). "Chitin and chitosan: Properties and applications". *Progress in Polymer Science*, 31(7), 603–632.

Robertson, G. L. (2013). *Food Packaging: Principles And Practice* (3rd ed.). CRC Press.

Rojas-Graü, M. A., Soliva-Fortuny, R., ve Martín-Belloso, O. (2009). "Use of natural colorants in intelligent packaging". *Food Research International,* 42(7), 919–925.

Sağun, E., Sancak, Y., Ekici, K. ve Durmaz, H. (2013). "Van'da tüketime sunulan piliç, but ve göğüs etlerinin hijyenik kalitesi üzerine bir araştırma". *2. Uluslararası Beyaz Et Kongresi*, ss. 158-163, 24-28 Nisan, Antalya.

Scalbert, A., Johnson, I. T., ve Saltmarsh, M. (2005). "Polyphenols: Antioxidants and beyond". *The American Journal of Clinical Nutrition*, 81(1), 215S–217S.

Servili, M., Baldioli, M., Selvaggini,R., Macchioni, A., ve Montedoro G., F. (1999). "Phenolic compounds of olive fruit: one and twodimensional nuclear magnetic resonance characterization of nuezhenide and its distribution in the constitutive parts of fruit". *J Agric Food Chem* 47,12- 18. 09-420. DOI: 10.1021/jf9806210

Silverstein, R. M., Webster, F. X., ve Kiemle, D. J. (2005). *Spectrometric Identification Of Organic Compounds*. John Wiley & Sons: NJ.

Silverstein, R. M., Webster, F. X., Kiemle, D. J., ve Bryce, D. L. (2014). *Spectrometric İdentification Of Organic Compounds* (8th ed.). Wiley: NJ.

Sionkowska, A. (2011). "Current research on the blends of natural and synthetic polymers as new biomaterials". *Progress in Polymer Science*, 36, 1254–1276.

Smolander, M. (2008). "Freshness indicators for food packaging". *Trends in Food Science & Technology*, 19(5), 224–231.

Socrates, G. (2001). *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies* (3rd ed.). Wiley: NJ.

Socrates, G. (2004). *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts*. John Wiley & Sons: NJ.

Stuart, B. (2004). *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. Wiley: NJ.

Şen, C. (2011). Hibiscus Sabdariffa L. Bitkisinin Antimikrobiyal ve Antioksidan Aktivitesinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

T. C. Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı (08, 06, 2016). Gıda Zehirlenmeleri Değerlendirme Toplantısı.

Toldrá, F. (2006). *Meat Science And Applications*. CRC Press.

Toldrá, F., ve Reig, M. (2011). Innovations for healthier processed meats. *Trends in Food Science & Technology,* 22(9), 517–522.

Visioli, F., Galli, C., Bornet, F., Mattei, A., Patelli, R., Galli, G., ve Caruso, D. (2002). "Olive oil phenolics are dose-dependently absorbed in humans". *FEBS Letters,* 468(2–3), 159–160.

WHO. (2020). Food safety.

Yoshida, T., Mori, K., ve Hatano, T. (2014). "Interaction of polyphenols with polysaccharides: FTIR and molecular interaction studies". *Carbohydrate Polymers*, 101, 121–128.

Zhang, Y., (2018). "Plant extracts as pH-sensitive agents", *International Journal of Food Science*.

Zhou, G. H., Xu, X. L., ve Liu, Y. (2010). Preservation technologies for fresh meat.

Zollinger, H. (2003). *Color chemistry: Syntheses, properties, and applications of organic dyes and pigments* (3rd ed.). Wiley-VCH.