



Araştırma Makalesi

Antosiyanin–Kitosan Tabanlı Akıllı Film Geliştirilmesi ve Çabuk Bozulabilen Gıdalara Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi

Emine Aytunga ARIK KİBAR^{1*}, Hatice İmge OKTAY BAŞEĞMEZ²

ÖZ

Bu çalışmada siyah frenk üzümü posasından basınçlı sıvı ekstraksiyonu ile elde edilen antosiyaninlerin kitosan matriksine entegre edilmesiyle pH-duyarlı akıllı bir film geliştirilmiş ve bileşimi RSM tabanlı Merkezi Kompozit Tasarım ile optimize edilmiştir. Optimum film 1–11 pH aralığında test edilmiş, L*, a*, b* değerlerinden hesaplanan renk farkı cevabı (ΔE) iki pH aralığı için modellenmiştir ($R^2=0.99$). Modeller, çabuk bozulabilen gıdaların literatürde belirtilen tazelik/bozulma pH aralıklarına uygulanmış ve renk geçişlerinin tahmini yapılmıştır. Bu sonuçlar, geliştirilen filmin çok çeşitli bozulabilir gıdalar için ayarlanabilir bir akıllı etiket bileşeni olarak kullanılabileceğini ve oluşturulan matematiksel modellerin mobil uygulamalara entegre edilerek tüketiciye sayısal tazelik değerlendirmesi sunma potansiyeli taşıdığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kitosan film, antosiyanin, akıllı ambalaj, pH duyarlılığı

Development of a pH-Sensitive Chitosan–Anthocyanin Smart Film and Applicability to Various Perishable Foods

ABSTRACT

This study reports the development of a pH-sensitive smart film based on chitosan incorporated with pressurized liquid extraction-derived anthocyanins from blackcurrant pomace. The formulation was optimized using Response Surface Methodology with a Central Composite Design, and the optimized film was evaluated across a wide pH range (1–11). Color responses (ΔE), calculated from L*, a*, b* values, were modelled for two pH ranges ($R^2=0.99$). The pH– ΔE models were applied to literature-reported spoilage pH ranges of perishable foods, enabling predictive color transitions. These findings reveal that the developed chitosan–anthocyanin film can serve as a versatile smart label for freshness monitoring and that the mathematical model can be adapted to mobile applications, enabling consumer-oriented digital freshness assessment.

Keywords: Chitosan film, anthocyanin, intelligent packaging, pH sensitivity

ORCID ID (Yazar sırasına göre)

0000-0001-6657-6342; 0000-0003-0969-593X

Yayın Kuruluna Geliş Tarihi: 05.12.2025

Kabul Tarihi: 24.12.2025

¹TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Gıda Teknolojileri Araştırma Grubu, Gebze, Kocaeli

²Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Biyomühendislik Bölümü, Adana

*E-posta: aytunga.kibar@tubitak.gov.tr

Antosiyanin–Kitosan Tabanlı Akıllı Film Geliştirilmesi ve Çabuk Bozulabilen Gıdalara Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi

Giriş

Gıda güvenliğinde hızlı, güvenilir ve tüketici dostu tazelik izleme teknolojilerine duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır; çünkü et, balık, sebze ve meyve gibi çabuk bozulabilen ürünlerde mikrobiyal bozulma, oksidasyon gibi biyolojik, fiziksel ve kimyasal bozulmalar kısa sürede kalite kaybına yol açmakta ve halk sağlığı açısından risk oluşturmaktadır (Prasetya ve ark., 2025). Geleneksel tazelik değerlendirme ve kalite ölçüm yöntemlerinin—mikrobiyal analiz, amonyak ve uçucu bazik azot bileşiklerinin (TVB-N) tayini, biyojenik amin analizi, GC-MS ölçümleri—zaman alıcı, pahalı ve çoğu zaman destrüktif olması ise endüstride daha pratik çözümlere yönelimi artırmaktadır (Shaddel ve ark., 2025).

Bu çerçevede akıllı ambalaj teknolojileri, paket içi ortamda gerçekleşen kimyasal değişimleri gerçek zamanlı izleyebilme potansiyeli nedeniyle son yıllarda yoğun ilgi görmektedir. Özellikle pH duyarlı renk indikatörleri, tüketicilere paket açılmadan ürün durumu hakkında bilgi verebilmesi sayesinde et ve balık zincirlerinde önemli bir avantaj sunmaktadır. Doğal pigmentlerin pH değişimine karşı gösterdikleri belirgin renk dönüşümleri nedeniyle akıllı ambalajlarda indikatör olarak kullanılmaları hızla yaygınlaşmıştır (Wu ve ark., 2025; Ponciano ve ark., 2025).

Antosiyaninler, kırmızı lahana, hibiskus ve siyah frenk üzümü gibi bitkisel kaynaklarda bulunan, pH'a duyarlı zengin bir flavonoid ailesidir. Bu pigmentler asidik pH'ta kırmızı, düşük asidik ya da nötr pH'ta mor, bazik pH'ta mavi-yeşil tonlarına döndükleri için özellikle bozulma sırasında artan uçucu aminlerle ilişkili pH artışını tespit etmede etkilidir (Prasetya ve ark., 2025). Ancak antosiyaninlerin ışığa ve oksijene duyarlılığı film matriksinin seçiminde kritik önem taşımaktadır.

Kitosan, film oluşturma kabiliyeti, biyobozunur ve yenilebilir yapısı nedeniyle akıllı ambalaj filmlerinde en çok kullanılan biyopolimerlerden

biridir. Son yıllarda kitosan–antosiyanin temelli akıllı ambalaj filmleri üzerine yapılan araştırmalar, doğal pH duyarlılığının gıda bozulmasını izlemek için yüksek bir potansiyel taşıdığını göstermektedir. Örneğin, Mutmainna ve ark. (2025) PVA/kitosan filmlerine kırmızı lahana antosiyanini ve Cu-MOF entegre ederek 2–9 pH aralığında belirgin renk geçişleri elde etmiş, ayrıca Cu-MOF ilavesinin mekanik dayanımı (≈ 9.8 MPa) ve antibakteriyel etkinliği artırdığını, karides tazeliği testlerinde ise raf ömrünü uzattığını göstermiştir. Benzer şekilde Masfufah ve ark. (2025), glutaraldehit ile çapraz bağlanmış kitosan filmlerinin kırmızı lahana antosiyanini kaplandığında 2–13 aralığında geniş bir pH duyarlılığı sergilediğini; ayrıca glutaraldehit ilavesiyle mekanik dayanımın üç kat arttığını ve *S. aureus* üzerinde belirgin antibakteriyel etki oluştuğunu raporlamıştır. Ayrıca Wu ve ark. (2025) tarafından geliştirilen kitosan–TiO₂–antosiyanin filmleri, balık bozulması sırasında açığa çıkan uçucu aminlere karşı hızlandırılmış renk yanıtı göstermiş ve TiO₂'nin UV stabilitesini artırarak pigment solmasını önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir. Shaddel ve ark. (2025) ise jelatin–kitosan matrisine *Echium amoenum* antosiyaninleri ekleyerek hem balık tazeliğini izleyen hem de çapraz bağlama sayesinde mekanik olarak güçlendirilmiş biyofilmler geliştirmiştir; çalışma bozulma süreciyle renk değişimi arasındaki güçlü korelasyonu ortaya koymuştur. Prasetya ve ark. (2025), PVA / selüloz / grafen oksit / antosiyanin kompozit filmler geliştirerek sistemin tavuk etinde depolama süresine bağlı pH artışını yüksek duyarlılıkla izlediğini göstermiştir. Çalışmada bozulma sırasında salınan uçucu aminlerin artışıyla filmdeki ΔE değerinin doğrusal şekilde yükseldiği, grafen oksit katkısının ise hem bariyer özelliklerini hem de renk stabilitesini belirgin biçimde iyileştirdiği raporlanmıştır. Bu araştırmalara ek olarak, Ponciano ve ark. (2025) tarafından yayımlanan kapsamlı derleme, mevcut çalışmaların çoğunun

Antosiyanin–Kitosan Tabanlı Akıllı Film Geliştirilmesi ve Çabuk Bozulabilen Gıdalara Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi

renk değişimini görsel olarak nitel anlamda değerlendirdiğini, oysa kantitatif renk farkı ölçütü (ΔE) ve matematiksel modelleme içeren çalışmaların son derece sınırlı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, birçok çalışmanın tek bir gıda türüne odaklandığı vurgulanmıştır.

Sonuç olarak, literatürde yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde kitosan–antosiyenin temelli sistemler üzerine yapılan güncel çalışmaların önemli ilerlemeler sağladığını; ancak literatürde hâlen bazı bilgi boşluklarının bulunduğunu söylemek mümkündür. Şöyle ki; film formülasyonlarının çoğu deneysel olarak belirlenmekte, istatistiksel optimizasyon yapılmamaktadır. Renk değişiminin şiddeti ile pH ilişkisini tanımlayan matematiksel modeller neredeyse hiç bulunmamaktadır. Ayrıca mevcut çalışmalar çoğunlukla tek bir gıda türü ile sınırlı olup, geliştirilen indikatörler farklı gıdalarda test edilmemiştir. Ayrıca, indikatör filmlerin dijital tarama sistemleri veya mobil uygulamalarla entegrasyonuna yönelik çalışmalar literatürde oldukça sınırlıdır ve renk verisinin dijital ortama aktarımını sağlayan algoritmalar yeterince rapor edilmemiştir. Bu çalışmada, literatürde belirlenen boşluklar dikkate alınarak; doğal renk indikatörü içeren kitosan esaslı pH-duyarlı bir indikatör filmin geliştirilmesi, renk değişimine dayalı kantitatif ΔE –pH modellemesinin oluşturulması, filmlerin farklı gıda türlerine uygulanabilirliği literatürde bildirilen pH aralıkları esas alınarak değerlendirilmesi ve mobil uygulamaya aktarılacak bir algoritmanın geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak, siyah frenk üzümü posasından elde edilen antosiyanin ekstraktı ile kitosan esaslı film formülasyonu Tepki Yüzey Metodolojisi (RSM) - Merkezi Kompozit Tasarım (CCD) kullanılarak olarak optimize edilmiştir. Optimum film için pH 1–11 aralığında Lab* ölçümleri yapılarak ΔE değerleri hesaplanmış ve pH– ΔE ilişkisi matematiksel modelleme ile kantitatif olarak tanımlanmıştır. Bu model, literatürde bildirilen

kırmızı et, tavuk, balık, sebze ve meyvelere ait bozulma pH aralıklarına teorik olarak uygulanarak, filmin farklı gıdalar için kullanım potansiyeli ilk kez sayısal bir yaklaşımla gösterilmiştir. Ayrıca çalışmada elde edilen model, akıllı telefon tabanlı bir uygulamaya entegre edilebilecek nitelikte bir algoritma şeklinde yapılandırılarak, akıllı ambalaj literatürüne dijital ve kavramsal bir yenilik sunmaktadır.

Materyal ve Yöntem

Materyal

Bu çalışmada film matriksi olarak kitosan, pH-duyarlı renk indikatörü olarak ise siyah frenk üzümü posasından elde edilen antosiyanin ekstraktı kullanılmıştır. Kitosan, gıda sınıfında ticari olarak temin edilmiştir. Siyah frenk üzümü posası, meyve suyu üretimi sonrasında yan ürün olarak elde edilmiş ve ekstraksiyon işlemine kadar derin dondurucuda muhafaza edilmiştir. Film çözeltilerinin hazırlanmasında kullanılan asetik asit, etanol ve diğer kimyasallar analitik saflıkta (p.a. derecesinde) kullanılmıştır.

Antosiyanin ekstraktının hazırlanması

Çalışmada kullanılan siyah frenk üzümü ekstraktı, daha önce aynı hammaddeden antosiyanin izolasyonu için optimize edilen basınçlı sıvı ekstraksiyonu yöntemine göre hazırlanmıştır (Başegmez ve ark., 2017). Ekstraksiyon işlemleri, 10 mL ekstraksiyon hücrelerine sahip hızlandırılmış çözücü ekstraksiyon sisteminde (ASE 350, Dionex, Sunnyvale, CA, USA) gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, kurutulmuş siyah frenk üzümü posası diatomlu toprak ile karıştırılmış; ekstraksiyon hücresine üst ve alt kısımda birer selüloz filtre olacak şekilde yerleştirilmiştir. Ekstraksiyon koşulları (10.3 MPa basınç, Etanol ve su için sıcaklıklar sırasıyla 70 °C ve 130 °C, her biri 5 dakikalık 3 çevrim) önceki çalışmalarda belirlenen optimum değerlere göre seçilmiştir (Başegmez ve ark., 2017). Ekstraksiyon sonrası çözücü, döner buharlaştırıcıda uzaklaştırılmış ve dondurarak kurutma yöntemi ile kurutulmuştur.

Antosiyanin–Kitosan Tabanlı Akıllı Film Geliştirilmesi ve Çabuk Bozulabilen Gıdalara Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi

Film çözeltilerinin hazırlanması ve film üretimi

Kitosan esaslı film çözeltilerinin hazırlanmasında döküm (casting) yöntemi kullanılmıştır. Öncelikle kitosan, deney tasarımına göre değişen miktarlarda (%a/h) asetik asit çözeltisi içerisinde manyetik karıştırıcı altında tamamen çözünene kadar karıştırılmıştır. Elde edilen kitosan çözeltisine, deney tasarımına göre değişen miktarlarda antosiyanin ekstraktı ve çapraz bağlayıcı ajan ilave edilmiştir. Formülasyona ait kitosan (A, %), ekstrakt (B, mg/100 ml) ve çapraz bağlayıcı (C, %) seviyeleri CCD kapsamında belirlenmiş olup 20 koşullu deney seti uygulanmıştır.

Hazırlanan film çözeltileri, hava kabarcığı oluşumunu en aza indirmek için kısa süreli ultrasonik banyoya alınmış, ardından belirli miktarda (20 ml) cam petri kaplarına dökülmüştür. Filmler oda sıcaklığında ve tozdan korunmuş ortamda sabit koşullarda kurutulmuştur. Kuruyan filmler petri kaplarından dikkatlice çıkarılmış, iklimlendirme kabiniinde belirlenmiş sıcaklık ve bağıl nem koşullarında (25 °C, %50 BN) dengelenmiş ve deneylerde kullanılmak üzere hava geçirmez dosyalarda saklanmıştır.

Filmlerin şişme oranının belirlenmesi

Filmlerin şişme davranışı, RSM analizinde yanıt değişkeni olarak kullanılmıştır. Şişme deneyleri için her bir film den 2×2 cm boyutunda örnekler kesilmiştir. Film örnekleri önce desikatörde dengelenmiş, daha sonra analitik terazide tartılarak başlangıç kütlesi (m_o) kaydedilmiştir. Ardından film örnekleri, 24 saat boyunca distile su içerisinde bekletilmiştir. Belirtilen sürenin sonunda film örnekleri çözelti içinden çıkarılarak yüzeyindeki serbest su, filtre kâğıdı ile alınmış ve tekrar tartılarak şişme sonrası kütle (m_t) değeri belirlenmiştir.

Şişme oranı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$S (\text{Şişme oranı}) (\%) = \frac{m_t - m_o}{m_o} \times 100$$

Her deney koşulu için üç tekerrürlü ölçüm gerçekleştirilmiş ve şişme değerleri ortalama $\pm$ standart sapma olarak raporlanmıştır.

Deney tasarımı ve RSM analizi

Film formülasyonunu optimize etmek amacıyla RSM kullanılmış ve üç faktörlü CCD uygulanmıştır. Deney tasarımı; A: Kitosan konsantrasyonu (% a/h), B: Antosiyanin ekstrakt miktarı (mg/100 ml) ve C: Çapraz bağlayıcı (Trisodyum sitrat) oranı (% a/h) bağımsız değişken olarak seçilmiş; şişme oranı (S, %) ise yanıt (response) değişkeni olarak kullanılmıştır. Faktör seviyeleri, ön denemeler ve literatür dikkate alınarak uygun alt ve üst sınırlar çerçevesinde belirlenmiş ve tasarım kapsamında beş seviye ($-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$) olacak şekilde kodlanmıştır. Toplam 20 koşullu deney seti (merkez noktalar dahil) yürütülmüştür. Şişme yanıtı ile faktörler arasındaki ilişkiyi tanımlamak için ikinci dereceden bir polinom model kullanılmıştır:

$$S = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_{11} A^2 + \beta_{22} B^2 + \beta_{33} C^2 + \beta_{12} AB + \beta_{13} AC + \beta_{23} BC$$

Burada β_0 sabit terimi; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ doğrusal etkileri; $\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$ ikinci dereceden (eğrisel) etkileri ve $\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$ ise ikili etkileşim terimlerini ifade etmektedir. Regresyon katsayıları en küçük kareler yöntemi ile tahmin edilmiş; model anlamlılığı varyans analizi (ANOVA) ile test edilmiştir. Modelin uyumu, R^2 ve düzeltilmiş R^2 (Adj. R^2) değerleri, F-testi ve p-değerleri üzerinden değerlendirilmiş; anlamlı terimler belirlenmiştir.

Ayrıca, kitosan ve ekstrakt (A–B), kitosan ve çapraz bağlayıcı (A–C) kombinasyonlarının şişme yanıtı üzerindeki ortak etkisini göstermek üzere yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri oluşturulmuştur. Optimum film formülasyonu, şişme oranının maksimize edilmesi kriteri göz önüne alınarak model üzerinden tahmin edilmiş ve doğrulama deneyleri ile kontrol edilmiştir.

Antosiyanin–Kitosan Tabanlı Akıllı Film Geliştirilmesi ve Çabuk Bozulabilen Gıdalara Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi

Çalışmada kullanılacak deney koşullarının belirlenmesi için üç faktörlü CCD, Design-Expert yazılımı (Version 12, Stat-Ease Inc., Minneapolis, ABD) kullanılarak oluşturulmuştur. Tasarım doğrultusunda elde edilen 20 koşullu deney seti laboratuvar ortamında uygulanmıştır. Deney tasarımı ve elde edilen veriler Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Merkezi kompozit tasarımı ve cevap değerleri

Örnek no	Kitozan (A, g/100mL)	Ekstrakt (B, mg/100 mL)	Sodyum Sitrat (C, g/100 mL)	Şişme Oranı (S, %)
1	3.2	720	9	87.8
2	2.4	520	11	75.0
3	1.6	320	9	54.5
4	3.7	520	6	97.8
5	3.2	320	9	85.7
6	1.6	720	3	116.8
7	1.6	320	3	132.2
8	2.4	520	6	76.6
9	3.2	720	3	85.9
10	2.4	520	6	76.5
11	2.4	520	6	68.5
12	1.6	720	9	64.6
13	2.4	184	6	80.8
14	3.2	320	3	77.5
15	2.4	520	6	81.2
16	2.4	520	1	105.4
17	2.4	856	6	85.1
18	2.4	520	6	61.1
19	1.0	520	6	86.6
20	2.4	520	6	74.7

pH duyarlılığı ve renk ölçümleri

RSM ile belirlenen optimum film formülasyonu seçildikten sonra, bu film için geniş bir pH aralığında (pH 1–11) renk değişimi değerlendirilmiştir. Bu amaçla pH kalibrasyon çözeltileri (Merck) kullanılmıştır. Film örnekleri her bir pH çözeltisi ile 10 dk temas ettirilmiştir; daha sonra renk ölçümü yapılmıştır.

Renk ölçümleri, CIE Lab* renk uzayında çalışan renk ölçer (DigiEye) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her film örneği için en az üç farklı noktadan L*, a*, b* değerleri ölçülmüş ve ortalama alınmıştır. Farklı pH seviyelerindeki renk farkını nicel olarak ifade etmek için, kurutulmuş film örneği esas alınarak toplam renk farkı (ΔE) hesaplanmıştır:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2}$$

Burada L_0^* , a_0^* , b_0^* kuru film örnekleri için ölçülen değerleri; L^* , a^* , b^* ise diğer pH seviyeleri için elde edilen değerleri göstermektedir.

pH– ΔE Modellemesi ve çabuk bozulabilen gıdalara uyarlanması

Optimum film formülasyonu için elde edilen ΔE değerlerinin pH ile ilişkisi, veri dağılımı ve eğilimleri dikkate alınarak modellenmiştir. Ön değerlendirmeler, pH– ΔE ilişkisinin 1-11 pH aralığında tek bir matematiksel model ile yeterince temsil edilemediğini, farklı pH bölgelerinde farklı davranışlar sergilediğini göstermiştir. Bu nedenle modelleme, pH aralığına bağlı olarak iki ayrı bölgede ele alınmıştır.

Asidik bölgede (pH 1–5), ΔE değerlerinin pH ile yaklaşık doğrusal bir ilişki gösterdiği belirlenmiş ve bu aralık için doğrusal regresyon modeli kullanılmıştır.

$$\Delta E = \alpha_0 + \alpha_1 pH$$

Daha yüksek pH aralığında (pH 5–8) ise ΔE değerlerinin doğrusal modelden sapma gösterdiği ve eğrisel bir davranış sergilediği gözlenmiştir. Bu nedenle bu pH aralığında ikinci dereceden polinom regresyon modeli uygulanmış ve ΔE –pH ilişkisi başarıyla tanımlanmıştır.

Antosiyanin–Kitosan Tabanlı Akıllı Film Geliştirilmesi ve Çabuk Bozulabilen Gıdalara Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi

$$\Delta E = \alpha_0 + \alpha_1 pH + \alpha_2 pH^2$$

Her iki model katsayıları en küçük kareler yöntemi ile tahmin edilmiş; modelin uyumu R^2 , düzeltilmiş R^2 , standart hata ve ANOVA yardımıyla değerlendirilmiştir. Tüm istatistiksel hesaplamalar ve modelleme işlemleri, Python programlama dili kullanılarak açık kaynaklı statsmodels paketinde gerçekleştirilmiştir. ΔE , veri düzenlemeleri (pandas) ve grafiksel değerlendirmeler (matplotlib) yine Python ortamında yürütülmüştür.

Elde edilen parçalı pH– ΔE modelleri kullanılarak literatürde rapor edilen tavuk, kırmızı et, balık, bazı meyve ve sebzeler ile diğer bozulabilir gıda ürünlerine ait karakteristik tazelik/bozulma pH aralıkları modele yerleştirilmiş; her gıda grubu için teorik renk paletleri ve ΔE değişimleri tahmin edilmiştir. Böylece geliştirilen pH-duyarlı filmin farklı gıda ürünlerine kullanılma potansiyeli sayısal olarak ortaya konmuştur.

Bulgular ve Tartışma

Film Formülasyonunun Matematiksel Modellemesi ve Optimizasyonu

Film formülasyonunun optimize edilmesi amacıyla üç faktörlü CCD uygulanmış ve

Çizelge 2. Merkezi kompozit tasarımı ANOVA tablosu

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F-değeri	p-değeri	Önem
Model	10605.53	9	1178.39	64.20	1.48E-08	**
A	6456.21	1	6456.21	351.50	<0.0001	**
B	813.47	1	813.47	44.32	<0.0001	ns
C	1290.35	1	1290.35	70.31	<0.0001	**
A ²	123.91	1	123.91	6.75	0.025	*
B ²	314.42	1	314.42	17.14	0.002	ns
C ²	756.02	1	756.02	41.19	<0.0001	*
AB	15.78	1	15.78	0.86	0.37	ns
AC	180.61	1	180.61	9.83	0.010	**
BC	654.76	1	654.76	35.71	<0.0001	ns
Uyum Eksikliği	422.85	5	84.57	1.65	0.298	ns
Artık (hata)l	679.31	10	67.93	CV%	7.18	-
R ²	0.9257			Ortalama değer 82.41		

modelleme işlemleri Design-Expert yazılımında oluşturulan deney planı doğrultusunda yürütülmüştür. Bağımsız değişkenler olarak kitosan konsantrasyonu (A, g/100 mL), antosiyanin ekstrakt miktarı (B, mg/100 mL) ve çapraz bağlayıcı oranı (C, g/100 mL) seçilmiş; yanıt değişkeni olarak film şişme oranı (S, %) kullanılmıştır. Bu üç parametre ile kurulan ikinci dereceden polinom modelinin geçerliliği ANOVA testi ile değerlendirilmiştir (Çizelge 2).

ANOVA sonuçları modelin yüksek derecede anlamlı olduğunu göstermiştir ($p < 0.001$). Lack-of-fit testinin anlamsız çıkması ($p > 0.05$), kurulan matematiksel modelin deneysel verileri uygun şekilde temsil ettiğini doğrulamaktadır. Modelin determinasyon katsayısı (R^2), düzeltilmiş determinasyon katsayısı (R_{adj}^2) ve tahmin determinasyon katsayısı (R_{pred}^2) sırasıyla 0.942, 0.903 ve 0.861 olarak hesaplanmış, R_{adj}^2 – R_{pred}^2 farkının 0.2'nin altında olması modelin tahmin gücünün yeterli olduğunu göstermiştir. Ayrıca düşük varyasyon katsayısı ($CV\% = 3.12$), deneysel verilerin yüksek tekrarlanabilirlik ve hassasiyetle elde edildiğini ortaya koymuştur.

Antosiyanin–Kitosan Tabanlı Akıllı Film Geliştirilmesi ve Çabuk Bozulabilen Gıdalara Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi

Düzeltilmiş R² 0.9032

Standart
Sapma 5.92

Tahmin edilmiş
R² 0.8614

Kitosan (A), ekstrakt (B) ve çapraz bağlayıcı (C) ana etkilerinin tümü şişme davranışını anlamlı şekilde etkilemiştir ($p < 0.05$). İkinci dereceden etkilerden A² ve C² terimleri de anlamlı çıkmış olup, yanıtın eğrisel bir davranış gösterdiğini ve optimum noktanın faktör aralığında bir yerde bulunduğunu göstermektedir. Etkileşim terimlerinden AB ve AC etkilerinin anlamlı bulunması, kitosan–ekstrakt ve kitosan–çapraz bağlayıcı kombinasyonlarının şişme üzerinde önemli sinerjik etkileri olduğunu göstermektedir.

Model için elde edilen ikinci dereceden denklem (kodlanmış değerlere göre) aşağıdaki gibidir:

$$S = 74.62 + 11.62A + 3.87B + 19.82C - 9.14A^2 - 4.74B^2 - 8.45C^2 - 1.41AB - 17.21AC + 2.11BC$$

Modelin tahminlerine göre optimum noktaya yakın formülasyonun %2.18 kitosan, 298 mg ekstrakt ve %3.20 çapraz bağlayıcı ile elde edildiği belirlenmiştir. Bu bileşimde model tarafından öngörülen şişme değeri ile deneysel olarak ölçülen değer arasında yüksek bir uyum görülmüş ve doğrulama deneyinde model hata payının %5'in altında olduğu tespit edilmiştir.

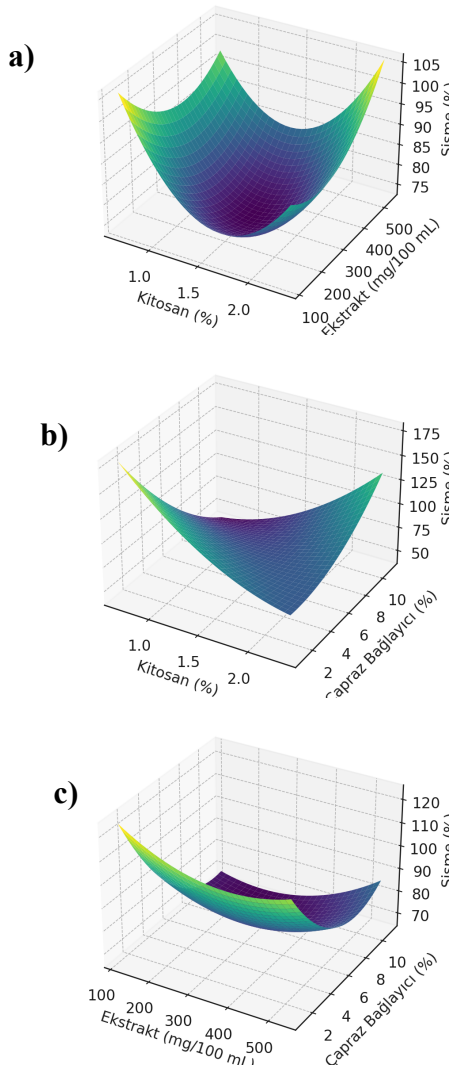
3D yanıt yüzeyi analizleri, bağımsız değişkenlerin yanıt üzerindeki birleşik etkilerini açık bir şekilde ortaya koymuştur (Şekil 1).

A–B etkileşim yüzeyinde, şişme davranışının özellikle orta düzeyde kitosan ve ekstrakt kombinasyonlarında maksimuma ulaştığı, buna karşılık çok düşük veya çok yüksek kitosan seviyelerinde belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum, yüksek kitosan konsantrasyonlarında polimer zincir yoğunluğunun artması nedeniyle su

penetrasyonunun sınırlanması; düşük konsantrasyonlarda ise yeterli polimer ağının oluşamamasıyla açıklanabilir. Benzer eğilimler kitosan temelli biyopolimer filmler üzerinde yapılan çalışmalarda da bildirilmiştir. Örneğin, Timur ve Paşa (2018) çapraz bağlanmış kitosan hidrojenlerinde çapraz bağlayıcı miktarı arttıkça polimer ağ yoğunluğunun yükseldiğini ve bunun doğrudan şişme oranını azalttığını göstermiştir. Benzer şekilde, Zheng ve ark., (2024) kitosan–antosiyenin filmlerinde selüloz nanokristal takviyesinin matriks bütünlüğünü artırarak film geçirgenliği ve su tutma davranışını önemli ölçüde modüle ettiğini bildirmiştir.

A–C etkileşim yüzeyi incelendiğinde, çapraz bağlayıcı oranının artışıyla şişmenin önce azaldığı, ardından belirli bir aralıktaki kararlı hale geldiği gözlenmiştir. Çapraz bağlayıcı düzeyinin artması, polimer zincirleri arasındaki bağlanma yoğunluğunu artırarak ağ yapısını daha kompakt hale getirmekte ve suyun matrikse difüzyonunu sınırlamaktadır. Bu eğilim, kitosan ve diğer doğal polimerlerin genipin veya kimyasal çapraz bağlayıcılarla modifiye edildiği çalışmalarda rapor edilen sonuçlarla uyumludur (Shaddel ve ark., 2025; Prasetya ve ark., 2025).

Antosiyanin–Kitosan Tabanlı Akıllı Film Geliştirilmesi ve Çabuk Bozulabilen Gıdalara Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi



Şekil 1. Tepki yüzey grafikleri: kitosan–antosiyenin filmlerinin şişme yanıtı (S, %) üzerine bağımsız değişkenlerin etkileşim etkileri. (a) Kitosan (A) ve ekstrakt miktarı (B) etkileşimi (çapraz bağlayıcı düzeyi C sabit tutulmuştur); (b) Kitosan (A) ve çapraz bağlayıcı düzeyi (C) etkileşimi (ekstrakt miktarı B sabittir); (c) Ekstrakt miktarı (B) ve çapraz bağlayıcı düzeyi (C) etkileşimi (kitosan oranı A sabittir).

B–C yüzeyinde ekstrakt miktarının, özellikle çapraz bağlayıcı ile birlikte değerlendirildiğinde, şişme davranışı üzerinde plastifiyan benzeri bir etki yarattığı görülmektedir. Antosiyanin

ekstraktı matriks içinde hidrofilik bölgelerin artmasına ve polimer zincirlerinin gevşemesine neden olarak su tutma kapasitesini modüle etmektedir. Ancak çapraz bağlayıcı oranı yükseldiğinde bu etki kısmen bastırılmakta ve daha sınırlı bir şişme yanıtı elde edilmektedir. Bu durum, pigment yükünün polimer ağ yapısı üzerindeki dengeleyici rolünü göstermektedir. Sonuç olarak, film formülasyonuna ilişkin model yüksek istatistiksel güvenilirlik göstermiş, optimum bileşen oranları başarıyla belirlenmiş ve model tahminleri deneysel doğrulama ile desteklenmiştir. Bu bulgular, geliştirilen pH-duyarlı filmin kompozisyonunun istatistiksel olarak optimize edildiğini ve film performansının matematiksel olarak açıklanabildiğini göstermektedir.

Optimum Film Formülasyonunun Belirlenmesi

Optimum formülasyon, polimer matrisin yeterli esnekliği korurken aynı zamanda antosiyaninlerin homojen dağıldığı, fiziksel olarak stabil bir yapı oluşturmasını sağlamıştır. Kitosan oranının optimuma doğru artışı, polimer zincirleri arasındaki hidrojen bağlarının güçlenmesiyle su absorpsiyon kapasitesinden sorumlu hidrofobik/hidrofilik dengenin istenilen seviyeye geldiğini göstermektedir. Çapraz bağlayıcı seviyesinin optimumda nispeten düşük çıkması ise aşırı ağ yoğunluğunun şişmeyi sınırladığı yönündeki genel biyopolimer bilgilerle tutarlıdır. Bu bulgular, kitosan temelli akıllı ambalaj filmlerinin formülasyon optimizasyonunda benzer davranışlar bildiren güncel literatürle uyumludur (Mutmainna ve ark., 2025; Westlake ve ark., 2025).

pH Duyarlılığı ve Renk Değişimi (Lab – ΔE)*

Optimum formülasyonun belirlenmesinin ardından film örneklerinin pH 1–11 aralığındaki renk değişimleri değerlendirilmiştir. L*, a* ve b* değerleri kullanılarak hesaplanan ΔE, pH ile belirgin bir ilişki göstermiştir (Şekil 2a). Ancak

Antosiyanin–Kitosan Tabanlı Akıllı Film Geliştirilmesi ve Çabuk Bozulabilen Gıdalara Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi

pH– ΔE ilişkisinin tüm aralık boyunca tek bir matematiksel davranış sergilemediği, pH seviyesine bağlı olarak farklı eğilimler gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 2b-c).

Asidik pH aralığında (pH 1–5), ΔE değerlerinin pH ile yaklaşık doğrusal bir ilişki sergilediği ve bu bölgede renk değişiminin daha düzenli ve öngörülebilir olduğu belirlenmiştir (Şekil 2b). Buna karşılık, pH 5–8 aralığında ΔE değerlerinin doğrusal davranıştan saparak eğrisel bir karakter kazandığı ve bu bölgede ikinci dereceden polinom model ile daha iyi temsil edildiği görülmüştür (Şekil 2c). Bu durum, antosiyaninlerin pH artışıyla birlikte geçirdiği yapısal dönüşümlerin özellikle nötr ve alkali bölgede daha karmaşık renk geçişlerine yol açmasıyla ilişkilendirilebilir.

ΔE değerlerini açıklayan modeller aşağıdaki şekilde elde edilmiştir:

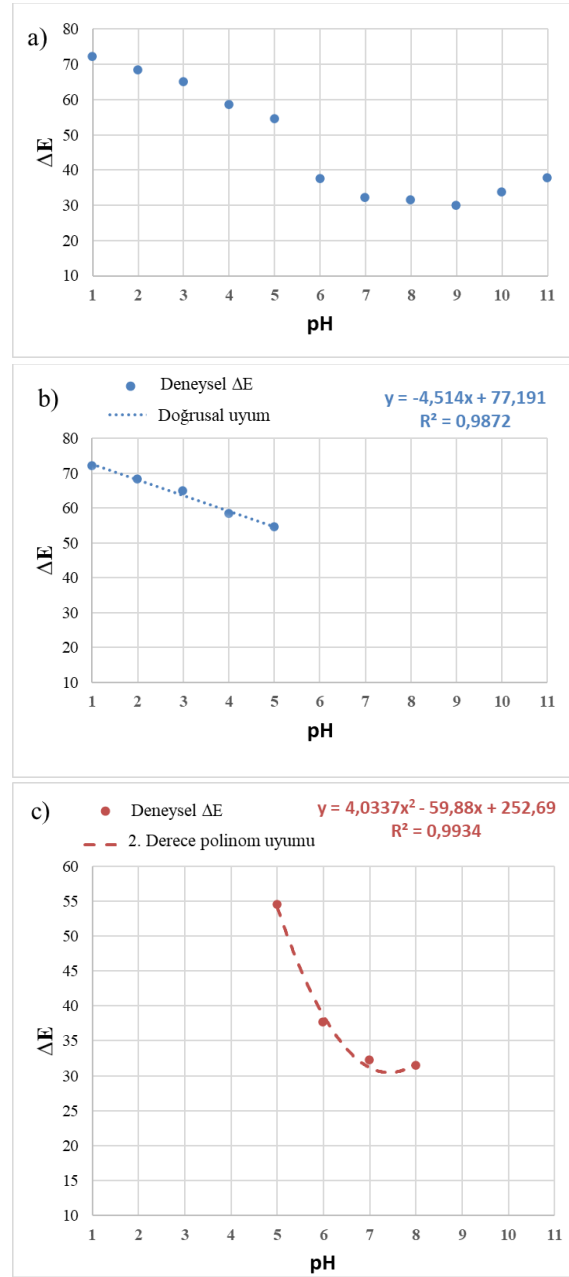
pH 1-pH $\leq$ 5 aralığında:

$$\Delta E = 77.19 - 4.51pH$$

pH>5- pH $\leq$ 8 ise:

$$\Delta E = 252.69 - 59.88pH + 4.03pH^2$$

Her iki pH bölgesi için elde edilen modellerin yüksek uyum katsayıları, antosiyaninlerin pH değişimine karşı duyarlılığının film matrisinde korunduğunu göstermektedir. pH arttıkça antosiyanin moleküllerinin yapısal dönüşümleri (flavylium katyonundan mavi/yeşil tonlara geçiş) sonucunda ΔE 'nin yükseldiği gözlenmiştir. $\Delta E > 5$ değerleri çıplak gözle belirgin renk farkı olarak yorumlanmakta olup filmin tüm pH aralığında net bir renk geçişi sunduğu görülmüştür. Bu bulgu, siyah havuç, kırmızı lahana ve hibiskus gibi antosiyanin kaynaklı filmlerde rapor edilen renk geçişleriyle benzer düzeydedir (Westlake ve ark., 2025; Marappan ve ark., 2025).



Şekil 2. Geliştirilen akıllı filmde (a) pH– ΔE ilişkisi; (b), pH 1-pH $\leq$ 5 aralığında ve (c) pH >5- pH $\leq$ 8 aralığında pH– ΔE kantitatif modellemesi

Çabuk Bozulabilen Gıdalar İçin Modelin Uygulanabilirliği

Çabuk bozulabilir gıdalar; et, balık, tavuk, taze sebzeler ve meyveler gibi mikrobiyal çoğalma, enzimatik reaksiyonlar ve oksidatif süreçlere karşı yüksek duyarlılık gösteren ürünlerdir ve bu nedenle depolama boyunca kalite özelliklerinde

Antosiyanin–Kitosan Tabanlı Akıllı Film Geliştirilmesi ve Çabuk Bozulabilen Gıdalara Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi

hızlı değişimler meydana gelir (FAO, 2022). Bozulma sürecinin temel biyokimyasal mekanizmaları arasında proteinlerin mikrobiyal enzimler tarafından hidrolizi, amino asitlerin deaminasyonu sonucu TVB-N oluşumu, lipid oksidasyonu ve karbonhidrat fermentasyonu yer alır (Sallam, 2004). Bu süreçlerin ortak çıktılarından biri ürünün pH değerindeki değişimdir; çünkü bozulma sırasında organik asitlerin azalması ve bazik bileşiklerin birikmesi gıdanın pH'nın yükselmesine yol açar. Bu nedenle pH, tazeliğin izlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir kimyasal göstergedir ve geliştirilen pH-duyarlı indikatör filmler açısından kritik bir parametredir (Fan ve ark., 2024).

Tavuk etinde bozulma, özellikle *Pseudomonas* spp. ve *Enterobacteriaceae* gibi aerobik psikotrofik mikroorganizmaların hızlı çoğalmasıyla ilişkilidir ve bu mikroorganizmaların amino asit metabolizması sonucu amonyak üretmeleri pH'nın artmasına neden olur. Literatürde taze tavuk etinin pH aralığının 5.8–6.2 olduğu, bozulmanın 6.3–6.8 aralığında başladığı ve tamamen bozulmuş örneklerde pH'nın genellikle 6.8'in üzerine çıktığı bildirilmiştir (Sallam, 2004; Wang ve ark., 2022). Benzer şekilde kırmızı ette post-mortem glikoliz sonucunda pH ~5.5'e kadar düşmekte, daha sonra proteoliz ve TVB-N oluşumu ile pH tekrar yükselme eğilimi göstermektedir. Sığır etinde taze ürünlerin pH değerinin 5.4–5.8 arasında olduğu, bozulma başlangıcının 5.9–6.2 aralığında gerçekleştiği ve 6.3'ün üzerindeki pH değerlerinin bozulmuş ete işaret ettiği rapor edilmiştir (Zhang ve ark., 2024). Balık ve su ürünlerinde bozulma daha hızlı gerçekleşmekte olup, kas dokusunda bulunan trimetilamin oksitin, bakteriyel enzimlerle trimetilamin ve diğer bazik bileşiklere dönüşmesi pH'nın hızlı şekilde artmasına yol açmaktadır. Taze balık genellikle 6.0–6.4 pH aralığındayken, bozulma başlangıcı 6.5–6.9 aralığında ve bozulmuş ürünler ≥ 7.0 pH

seviyesinde karakterize edilmektedir (Fan ve ark., 2024).

Taze sebze ve meyvelerde mikrobiyal bozulma et ürünlerine kıyasla daha yavaş seyretse de hücre duvarı yıkımı, pektin depolimerizasyonu, fenolik bileşiklerin oksidasyonu ve fermentasyon süreçleri ürünün hem kimyasal bileşimini hem de pH profilini önemli ölçüde değiştirmektedir (Barth ve ark., 2009; Alegbeleye ve ark., 2022). Asidik meyvelerde, örneğin çilek ve vişnede, başlangıç pH değerlerinin genellikle 3.0–3.8 aralığında olduğu rapor edilmiş; olgunluk ve aşırı olgunluk / bozulmaya doğru ilerledikçe organik asitlerin kısmen tüketilmesine bağlı olarak pH'nın 3.6 ve üzeri değerlere doğru yükseldiği bildirilmiştir (USDA ARS, 2024; Beyer, 2020). Sebzelerde ise tipik tazelik pH aralığı çoğunlukla 5.5–6.5 civarında olup, düşük asitli bu yapı bakteriyel bozulmaya daha duyarlıdır; depolama ve mikrobiyal çoğalma süreci ilerledikçe organik asitlerin azalması ve nitrojenli bileşiklerin birikimi sonucu pH'nın 6.5–6.9 aralığına ve bazı durumlarda nötr civarına yükseldiği, bunun da belirgin bozulma göstergesi olduğu ifade edilmektedir (Barth ve ark., 2009; Alegbeleye ve ark., 2022; Anonymous, 2025).

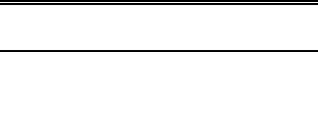
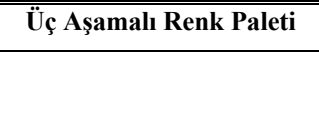
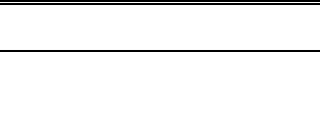
Bu çalışmada geliştirilen matematiksel modeller (Şekil 2), renk değişiminin nicel göstergesi olan ΔE değerinin pH ile ilişkisini tanımlamaktadır. Bu modeller kullanılarak literatürde bildirilen gıda gruplarının taze, bozulma başlangıcı ve bozulmuş durumlarına karşılık gelen karakteristik pH değerleri için teorik ΔE değerleri hesaplanmıştır. Modelin sağladığı bu hesaplama, akıllı etiketin herhangi bir gıda grubuna spesifik bir analiz gerektirmeden uyarlanabilmesini sağlamaktadır. Böylece farklı gıdalar için pH üzerinden beklenen ΔE değerleri teorik olarak elde edilmiş, bu ΔE değerleri deneysel renk ölçümlerinden elde edilen Lab^* verileriyle eşleştirilerek her gıda grubu için üç aşamalı (taze–bozulma başlangıcı–bozulmuş) renk paletleri oluşturulmuştur (Çizelge 3)

Antosiyanin–Kitosan Tabanlı Akıllı Film Geliştirilmesi ve Çabuk Bozulabilen Gıdalara Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında geliştirilen filmin pH-duyarlı renk değişimi, pH aralığına bağlı olarak iki farklı matematiksel model ile tanımlanmıştır. $pH \leq 5$ aralığında ΔE –pH ilişkisi doğrusal model ile, $5 < pH \leq 8$ aralığında ise ikinci dereceden polinom model ile açıklanmıştır. Bu yaklaşıma göre tavuk eti için $pH=6.0$ seviyesinde polinom

modelden hesaplanan $\Delta E \approx 47.5$ değeri açık mavi tonlarına karşılık gelirken, bozulmuş tavuk $pH=7.2$ için $\Delta E \approx 29.9$ değeri daha koyu mavigr tonlara karşılık gelmiştir (Çizelge 3).

Çizelge 3. Çabuk bozulabilen farklı gıdalar için üç aşamalı pH–renk paletleri ve ΔE değerleri

Tavuk eti	Üç Aşamalı Renk Paleti		
			
Tazelik durumu	Taze	Bozulma başlangıcı	Bozuk
pH	5.9	6.5	7.1
HEX	#5C4864	#48475D	#3C4656
ΔE	0.0	9.34	15.29
RGB	(92,72,100)	(72,71,93)	(60,70,86)
Tüketime hazır (Fresh-cut)	Üç Aşamalı Renk Paleti		
			
Tazelik durumu	Taze	Bozulma başlangıcı	Bozuk
pH	3.85	3.5	3.2
HEX	#A15477	#A8506D	#AF4C64
ΔE	0.0	7.28	13.52
RGB	(161,84,119)	(168,80,109)	(175,76,100)
Asidik meyveler	Üç Aşamalı Renk Paleti		
			
Tazelik durumu	Taze	Bozulma başlangıcı	Bozuk
pH	3.5	3.2	3.0
HEX	#A8506D	#AF4C64	#B34A5E
ΔE	0.0	6.24	10.40
RGB	(168,80,109)	(175,76,100)	(179,74,94)
Balık	Üç Aşamalı Renk Paleti		
			

Antosiyanin–Kitosan Tabanlı Akıllı Film Geliştirilmesi ve Çabuk Bozulabilen Gıdalara Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi

			
Tazelik durumu	Taze	Bozulma başlangıcı	Bozuk
pH	6.15	6.7	7.2
HEX	#524660	#42485B	#3F4554
ΔE	0.0	8.18	9.94
RGB	(82,70,96)	(66,72,91)	(63,69,84)
Kırmızı et	Üç Aşamalı Renk Paleti		
			
Tazelik durumu	Taze	Bozulma başlangıcı	Bozuk
pH	5.5	5.95	6.25
HEX	#734D6D	#594763	#4F475F
ΔE	0.0	9.73	14.11
RGB	(115,77,109)	(89,71,99)	(79,71,95)

Benzer şekilde kırmızı ette taze pH=5.6 için $\Delta E \approx 38.7$, bozulmuş pH=6.4 için $\Delta E \approx 31.0$ olarak hesaplanmış ve bu değerler sırasıyla daha açık ve daha koyu mavi tonlarına karşılık gelmiştir. Balık için taze pH=6.2’de $\Delta E \approx 34.8$ iken bozulmuş pH=7.0’de $\Delta E \approx 29.3$ bulunmuştur. Asitli meyvelerde ise pH ≤ 5 aralığında doğrusal modelin yüksek eğimi nedeniyle ΔE değerleri 63.2–49.2 aralığında daha yüksek renk duyarlılığı göstermiştir. Sebzelerde taze pH=6.0 için $\Delta E \approx 47.5$, bozulmuş pH=7.1 için $\Delta E \approx 30.2$ olarak hesaplanmış ve renk değişimi net bir şekilde ayırt edilebilir bulunmuştur (Çizelge 3).

Bu sonuçlar, geliştirilen iki parçalı pH– ΔE modelinin ve optimum film formülasyonunun farklı gıda gruplarının bozulma dinamiklerine yüksek uyumluluk gösterdiğini ortaya koymaktadır. Böylece geliştirilen film, yalnızca tek bir gıda türüne özgü bir sensör değil; pH değişimi ile bozulmanın iyi tanımlandığı tüm

çabuk bozulabilen gıdalara uygulanabilir çok amaçlı bir akıllı etiket niteliği taşımaktadır. Model tabanlı ΔE tahmin yaklaşımı, ilerleyen aşamalarda mobil uygulamalar ve tüketici odaklı dijital değerlendirme sistemleri ile entegre edilerek nesnel, hızlı ve düşük maliyetli bir tazelik izleme aracı geliştirilmesine olanak sağlayacaktır.

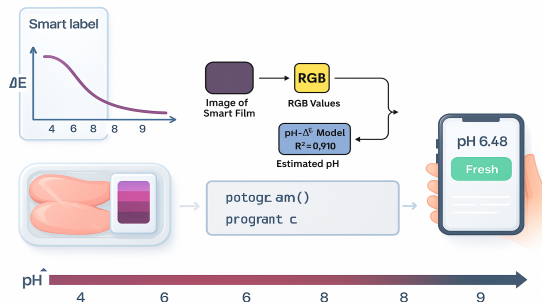
Geliştirilen Filmin Akıllı Telefon ile Entegrasyon Potansiyeli

Bu çalışmanın yenilikçi yönlerinden biri, laboratuvar ortamında geliştirilen pH– ΔE modellerinin akıllı telefon tabanlı bir karar destek sistemi ile entegre edilebilecek yapıda olmasıdır. Geleneksel akıllı etiket uygulamalarında renk değişimi çoğunlukla tüketici veya operatör tarafından çıplak gözle değerlendirilmekte, bu durum ışık şiddeti, ambalaj malzemesinin rengi, bireyler arası renk algısı farkları ve hatta renk körlüğü gibi

Antosiyanin–Kitosan Tabanlı Akıllı Film Geliştirilmesi ve Çabuk Bozulabilen Gıdalara Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi

faktörlere bağlı olarak önemli bir subjektiflik taşımaktadır. İnsan gözünün özellikle ara tonları ayırt etme kapasitesinin sınırlı olması ve çevresel koşullara duyarlılığı, akıllı ambalajın sunduğu bilginin güvenilirliğini kısıtlayabilmektedir.

Geliştirilen filmde ise renk değişimi CIELab uzayında sayısal olarak tanımlanmakta ve ΔE değerleri üzerinden pH tahmini yapılabilmektedir. Bu yapı, akıllı telefon kamerası ile film etiketinin görüntülenmesi, görüntüden renk bilgilerinin (R–G–B veya doğrudan Lab^* koordinatlarının) çıkarılması ve bu verinin gömülü pH– ΔE modeli ile işlenmesi için uygun bir çerçeve sunmaktadır. Böyle bir mobil uygulama, filmdeki renk değişimini kullanıcıdan bağımsız bir şekilde sayısallaştırarak, ürün tazeliğini “renk tonu” yerine “tahmini pH değeri” ve buna karşılık gelen “tazelik durumu” (taze/bozulma başlangıcı/bozuk) şeklinde gösterebilir (Şekil 3). Bu yaklaşım, hem subjektif değerlendirmeyi ortadan kaldırmakta hem de farklı kullanıcılar ve ortamlar arasında karşılaştırılabilir, standartlaştırılmış sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 3. Akıllı etiketin mobil uygulama ile pH ve tazelik tahmini için entegrasyonu

Literatürde akıllı telefon kamerası ile renk analizine dayalı bazı gıda kalite izleme uygulamaları bulunsa da, bunların büyük bölümü süt, meyve suyu veya içeceklerde basit renk ölçümüne odaklanmakta ve çoğunlukla

hazır renk skalaları ile görsel karşılaştırma prensibiyle çalışmaktadır; pH– ΔE tabanlı, model entegrasyonuna dayalı ve çoklu gıda gruplarına genellenmiş bir yaklaşımın örnekleri ise oldukça sınırlıdır. Bu çalışma kapsamında oluşturulan pH– ΔE modeli, doğrudan Python ortamında kodlanmış ve bir mobil uygulamanın arka ucu (back-end) için kullanılabilecek örnek bir algoritma haline getirilmiştir. Hazırlanan Python kodu, ölçülen veya kameradan hesaplanan ΔE değerini girdi olarak almakta, buna karşılık gelen pH'yı tahmin etmekte ve ilgili gıda grubuna ait tazelik aralığı ile eşleştirmektedir. Söz konusu kod, yazılım geliştirme ayrıntılarına girmeden, olası bir mobil uygulama için kavramsal ispat (proof-of-concept) niteliğinde olması amacıyla ek dosya olarak sunulmuştur. Böylece geliştirilen kitosan–antosiyanin esaslı akıllı film yalnızca bir ambalaj bileşeni olarak değil, gelecekte nesne-tabanlı internet (IoT) uygulamaları ve tüketici odaklı dijital platformlarla bütünleşebilecek, veri üreten bir sensör arayüzü olarak da değerlendirilebilecek potansiyel taşımaktadır.

Sonuç

Bu çalışmada siyah frenk üzümü posasından elde edilen antosiyanin ekstraktı ile zenginleştirilmiş kitosan temelli pH-duyarlı bir akıllı ambalaj filmi başarıyla geliştirilmiş ve film formülasyonu RSM/CCD yaklaşımıyla optimize edilmiştir. Şişme yanıtına dayalı modelleme, üç temel faktörün (kitosan, ekstrakt, çapraz bağlayıcı) film özellikleri üzerinde anlamlı etkileri olduğunu göstermiş ve yüksek istatistiksel uyum değerleri elde edilmiştir. Optimum bileşimle hazırlanan film, pH 1–11 aralığında belirgin ve ölçülebilir renk değişimleri göstermiş; pH– ΔE ilişkisi pH aralığına bağlı olarak doğrusal ($pH \leq 5$) ve ikinci dereceden polinom ($5 < pH \leq 8$) modeller kullanılarak yüksek doğrulukla tanımlanmıştır. Modelin literatürde bildirilen farklı gıda gruplarına ait tazelik ve bozulma pH aralıklarına

Antosiyanin–Kitosan Tabanlı Akıllı Film Geliştirilmesi ve Çabuk Bozulabilen Gıdalara Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi

uygulanması, geliştirilen sistemin kırmızı et, tavuk eti, balık, taze kesilmiş ürünler ve asidik meyveler gibi çeşitli bozulabilir gıdalarda da kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Ayrıca modelin dijital ortama aktarılabilir nitelikte olması, film sensörünün akıllı telefon uygulamalarıyla bütünleşerek tüketicilere gerçek zamanlı ve nesnel tazelik değerlendirmesi sunabilmesine olanak tanımaktadır. Bu yönleriyle çalışma, biyopolimer temelli akıllı ambalaj alanında optimizasyon, kantitatif renk modellemesi ve çoklu gıda uygulaması gibi unsurları bütünleştiren yenilikçi ve kapsamlı bir yaklaşım sunmakta; gelecekte hem tüketici düzeyinde hem de endüstriyel izleme sistemlerinde kullanılabilecek potansiyel bir akıllı etiket teknolojisi ortaya koymaktadır.

Kaynaklar

- Alegbeleye, O. O., Odeyemi, O. A., Strateva, M., Stratev, D. (2022) Microbial spoilage of vegetables, fruits and cereals. *Applied Food Research* 2(1):100122.
- Anonymous (t.y.) pH Values of Common Foods and Ingredients. Kansas State University, Extension Food Safety. <https://cottonwood.k-state.edu/documents/fcs-docs/pH%20chart.pdf>, Accessed 05 December 2025.
- Barth, M., Hankinson, T. R., Zhuang, H., Breidt, F. (2009) Microbiological spoilage of fruits and vegetables. W. H. Sperber, M. P. Doyle (Ed.), 239-270, *Compendium of the Microbiological Spoilage of Foods and Beverages*, Springer, New York.
- Basegmez, H. I. O., Povilaitis, D., Kitrytė, V., Kraujalienė, V., Šulniūtė, V., Alasalvar, C., Venskutonis, P. R. (2017) Biorefining of blackcurrant pomace into high value functional ingredients using supercritical CO₂, pressurized liquid and enzyme assisted extractions. *The Journal of Supercritical Fluids* 124:10-19.
- da Silva Ponciano, C., Gonzaga, F. C., de Oliveira, C. P. (2025) Smart packaging based on chitosan acting as indicators of changes in food: A technological prospecting review. *International Journal of Biological Macromolecules* 145722.
- Fan, L., Yu, R., Xu, L., Li, H., Jiang, S. (2024) Application of visual intelligent labels for assessing freshness of chilled beef during storage. *Food Chemistry* 437:137720.
- FAO. (2022) The State of Food Security and Nutrition in the World 2022: Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable. FAO, Rome. <https://www.fao.org/3/cc0639en.pdf>, Accessed 05 December 2025.
- Marappan, G., Liu, D., Li, R., Zhang, H. (2025) Natural pigment-based pH/gas-sensitive intelligent packaging films for freshness monitoring of meat and seafood. *Food Reviews International* 41(1):1-29.
- Masfufah, F. I. S., Ngadiwiyana, N., Yassaroh, Y., Wulandari, R., Prasetya, N. B. A. (2025) Antibacterial and pH-Responsive chitosan/glutaraldehyde film with red cabbage anthocyanins for meat freshness detection. *Trends in Sciences* 22(9):10254.
- Mutmainna, I., Tahir, D., Gareso, P. L., Suryani, S. (2025) Development of PVA–chitosan based smart packaging with the addition of red cabbage anthocyanin extract and copper-based metal-organic material (Cu-MOF). *International Journal of Biological Macromolecules* 313:144205.
- Nami, M., Taheri, M., Siddiqui, J., Deen, I. A., Packirisamy, M., Deen, M. J. (2024) Recent progress in intelligent packaging for seafood and meat quality monitoring. *Advanced Materials Technologies* 9(12):2301347.
- Prasetya, N. B. A., Masfufah, F. I. S., Ngadiwiyana, N., Yassaroh, Y., Wulandari, R. (2025) pH-sensitive chitosan/graphene oxide films enriched with red cabbage anthocyanins for visual spoilage detection in chicken meat. *International Journal of Biological Macromolecules* 147866.

Antosiyanin–Kitosan Tabanlı Akıllı Film Geliştirilmesi ve Çabuk Bozulabilen Gıdalara Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi

- Sallam, K. I. (2004) Effects of trisodium phosphate and sodium chloride dipping on the microbial quality and shelf life of refrigerated tray-packaged chicken breasts. *Food Microbiology* 21(3):293-301.
- Shaddel, R., Alighadri, T., Alizadeh-Sani, M., Zahedi, Y., Rhim, J. W. (2025) Production and properties of smart packaging film based on gelatin-chitosan containing Echium amoenum anthocyanins and reinforced with crosslinkers for fish packaging. *International Journal of Biological Macromolecules* 145910.
- Timur, M., Paşa, A. (2018) Synthesis characterization, swelling, and metal uptake studies of aryl cross-linked chitosan hydrogels. *ACS Omega* 3(12):17416-17424.
- USDA ARS. (2024) pH of Selected Foods. Pathogen Modeling Program, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. <https://www.ars.usda.gov>, Accessed 05 December 2025.
- Wang, Y., Kong, J., et al. (2023) Multi-functional pH-sensitive active and intelligent packaging film based on highly cross-linked zein. *Food Chemistry* 404:134679.
- Westlake, J. R., Burrows, A. D., Xie, M. (2025) Turmeric and red cabbage extract composites with chitosan as natural ingredient-based pH-responsive intelligent packaging strips. *ACS Food Science & Technology* 5(8):3159-3168.
- Wu, Y., Li, Z., Wu, Y., Chen, S., Zhao, Y., Li, C., Wang, Y. (2025) Chitosan titanium dioxide emulsion incorporated pH-responsive active packaging film: Real-time freshness monitoring and targeted fishy odor control. *Carbohydrate Polymers* 369:124317.
- Zhai, X., Xue, Y., Sun, Y., Ma, X., Ban, W., Marappan, G., Katona, J. (2025) Colorimetric food freshness indicators for intelligent packaging: Progress, shortcomings, and promising solutions. *Foods* 14(16):2813.
- Zhang, L., Fan, G., Khan, M. A., Xia, X., Zhou, X., Ma, L., Wang, J., Yan, Z. (2024) Recent advances in pH-sensitive indicator films based on natural colorants for smart monitoring of food freshness: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 64(33):12800-12819.