MAVİYEMİŞTE RAF ÖMRÜ DİNAMİKLERİ VE MUHAFAZA STRATEJİLERİ

Arş. Gör. Şefik Tunahan ÇENGEL
Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü
ORCID: 0009-0003-0336-6825

Prof. Dr. Mustafa AKBULUT
Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü
ORCID: 0000-0003-1028-162X

ÖZET
Maviyemiş, yüksek antioksidan kapasitesi ve taze tüketime yönelik güçlü talep nedeniyle küresel ölçekte ekonomik önemi hızla artan bir üzümsü meyvedir. Bununla birlikte, ince kabuk yapısı, yüksek solunum hızı ve özellikle mantari etmenlere duyarlılığı nedeniyle hasat sonrası dönemde kalite kayıplarına belirgin ölçüde açıktır. Bu derleme, maviyemişte raf ömrünü belirleyen temel fizyolojik ve biyokimyasal mekanizmaları özetlemekte ve kalite korunmasına yönelik güncel muhafaza yaklaşımlarını bütüncül bir çerçevede değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Hasat sonrası süreçte su kaybı ve doku yumuşaması, hücresel membran bütünlüğündeki bozulma ve patojen kaynaklı çürümeler raf ömrünü sınırlayan başlıca faktörlerdir. Solunum temelli metabolik aktivite ve etilenle ilişkili düzenleyici süreçler kalite değişimlerinin merkezinde yer alırken, depolama sıcaklığı ve bağıl nem koşulları bu süreçlerin hızını doğrudan belirlemektedir. Soğuk zincirin etkin yönetimi, modifiye atmosfer depolama, yenilebilir kaplamalar ve biyokontrol temelli uygulamalar raf ömrünün uzatılmasında öne çıkan stratejiler olarak rapor edilmektedir. Ayrıca, hasat zamanı ve olgunluk düzeyinin doğru belirlenmesi, mekanik hasarın azaltılması ve hijyen uygulamalarının iyileştirilmesi, muhafaza başarısını güçlendiren kritik adımlardır. Mevcut bulgular, tek bir uygulamanın çoğu koşulda yeterli olmadığını ve entegre yaklaşımların daha tutarlı sonuçlar sunduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, sertlik, ağırlık kaybı, çözünür kuru madde, titrasyon asitliği, renk parametreleri ve mikrobiyal yük gibi göstergeler üzerinden standartlaştırılmış değerlendirme çerçevelerinin kullanımı önem kazanmaktadır. Derleme, çeşit ve yetiştirme koşullarına bağlı değişkenliği dikkate alarak üretici ölçeğinde uygulanabilir protokollerin geliştirilmesine yönelik araştırma önceliklerini tartışmaktadır.
Anahtar Kelimeler: maviyemiş, hasat sonrası kalite, raf ömrü, modifiye atmosfer paketleme, soğuk zincir yönetimi, mikrobiyal bozulma

SHELF LIFE DYNAMICS AND PRESERVATION STRATEGIES IN BLUEBERRIES

ABSTRACT
Blueberries have gained increasing global economic importance due to their high antioxidant capacity and strong demand for fresh consumption. Nevertheless, their delicate skin, high respiration rate, and susceptibility to fungal pathogens make them highly prone to postharvest quality deterioration. This review summarizes the key physiological and biochemical mechanisms that govern shelf life in blueberries and evaluates current preservation approaches for maintaining postharvest quality within an integrated framework. Water loss and tissue softening, loss of cellular membrane integrity, and pathogen-driven decay are among the primary factors limiting shelf life. Respiration-related metabolic activity and ethylene-associated regulatory processes are central to quality changes, while storage temperature and relative humidity directly modulate the rate of these processes.

Effective cold chain management, modified atmosphere storage, edible coatings, and biocontrol-based applications are frequently reported as leading strategies to extend shelf life. In addition, appropriate harvest timing and maturity assessment, reduced mechanical damage, and improved hygiene practices represent critical steps that enhance preservation outcomes. The available evidence indicates that single interventions are often insufficient across conditions, whereas integrated approaches tend to deliver more consistent results. In this context, the use of standardized assessment frameworks based on firmness, weight loss, soluble solids content, titratable acidity, color attributes, and microbial load is increasingly important. The review also discusses research priorities for developing producer-scale, implementable protocols while accounting for variability driven by cultivar differences and production environments.
Keywords: blueberry**,** postharvest quality, shelf life, modified atmosphere packaging, cold chain management, microbial decay

GİRİŞ

Maviyemiş (Vaccinium corymbosum L.), özellikle Doğu Karadeniz Bölgesi başta olmak üzere Türkiye'de üretimi giderek yaygınlaşan, ekonomik ve besinsel açıdan yüksek değere sahip üzümsü meyvelerden biridir (Akbulut ve Bakoğlu, 2017). Dünya genelinde üretim ve tüketim miktarındaki artış, tüketici tercihlerinde sağlıklı beslenmeye yönelik eğilimin güçlenmesiyle yakından ilişkilidir (Guo, 2023; Krishna ve diğerleri, 2023). Türkiye'de de maviyemiş üretimi son yıllarda hem taze tüketim hem de işlenmiş ürün sanayii bakımından hızla gelişen bir alan hâline gelmiştir. Bu gelişimde, meyvenin yüksek besin değeri ile antosiyaninler, kateşinler, flavanoller, lif, vitamin ve mineraller gibi biyolojik olarak aktif bileşikler bakımından zengin olması belirleyici rol oynamaktadır (Ünal ve diğerleri, 2023). Maviyemiş, içerdiği bu biyoaktif bileşikler sayesinde insan sağlığı açısından önemli bir fonksiyonel gıda olarak değerlendirilmektedir. Antioksidan kapasitesi yüksek olan bu bileşikler, yaşlanma karşıtı etkiler, bağışıklık sisteminin desteklenmesi ve çeşitli kronik hastalıklara karşı koruyucu potansiyelleri nedeniyle dikkat çekmektedir (Liang ve diğerleri, 2023; Piechowiak ve diğerleri, 2021). Özellikle antosiyaninler, meyveye kırmızı, mor ve mavi tonlarını kazandıran pigmentler olmanın yanı sıra güçlü antioksidan aktiviteleriyle de öne çıkmaktadır (Pateiro ve diğerleri, 2022). Bu durum, maviyemişin hem üretim hem de tüketim açısından küresel ölçekte artan önemini desteklemektedir (Montanari ve diğerleri, 2022).

Antosiyaninler, suda çözünür fenolik bileşikler olup bitkilerde doğal pigmentler olarak bulunmakta ve geleneksel olarak doğal gıda renklendiricileri olarak da kullanılmaktadır (Manzoor ve diğerleri, 2022). Bunun yanında, antioksidan, antienflamatuar ve tümör karşıtı etkiler gibi geniş bir biyolojik aktivite yelpazesine sahip oldukları bildirilmektedir (Lee ve diğerleri, 2021). Maviyemişte antosiyanin profili; delphinidin, cyanidin, petunidin, peonidin ve malvidin olmak üzere beş temel aglikon ile arabinoz, galaktoz ve glikoz gibi şeker gruplarının farklı kombinasyonlarından oluşmaktadır (Mengist ve diğerleri, 2022). Söz konusu bileşikler yalnızca meyvenin görsel çekiciliğini artırmakla kalmamakta, aynı zamanda sağlık üzerindeki olumlu etkilerini de güçlendirmektedir (Lakshmikanthan ve diğerleri, 2024; Wu ve diğerleri, 2023).

Antosiyaninler, flavonoid heterozitler grubunda yer almakta ve stabiliteleri başta pH olmak üzere çevresel ve kimyasal koşullardan önemli ölçüde etkilenmektedir. Bununla birlikte, peptit ve polisakkarit ilavesi gibi bazı yaklaşımlarla bu bileşiklerin stabilitesi artırılabilmektedir (Tóth ve diğerleri, 2023).

Antosiyanin biyosentezi bitkilerde karmaşık biyokimyasal reaksiyonlar yoluyla gerçekleşmekte olup, bu bileşikler yalnızca taze meyvede değil, işleme yan ürünlerinde de yüksek miktarlarda bulunabilmektedir (Yücetepe ve diğerleri, 2024; Zhang ve diğerleri, 2023). Siyanidin ve delphinidin gibi antosiyanidinlerin bazı Vaccinium türlerinde yoğun olduğu, malvidin ve delphinidinin ise yaban mersininde daha baskın bileşenler arasında yer aldığı bildirilmektedir (Nguyen ve diğerleri, 2023). Ayrıca bu bileşiklerin glikozilasyon ve hidroksilasyon düzeyleri, antioksidan aktivitelerini ve biyoyararlılıklarını doğrudan etkileyebilmektedir (Rodríguez-Mena ve diğerleri, 2022).
Maviyemişte raf ömrü dinamiklerinin ve muhafaza stratejilerinin ayrıntılı biçimde anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Hasat sonrası dönemde meydana gelen fizyolojik ve biyokimyasal değişimler, yalnızca meyvenin ticari kalitesini değil, aynı zamanda antosiyaninler başta olmak üzere biyoaktif bileşiklerin korunma düzeyini de belirlemektedir. Bu çerçevede, maviyemişin hasat sonrası fizyolojisi, bozulma mekanizmaları ve depolama koşullarının kalite üzerine etkileri, taze tüketim pazarının sürdürülebilirliği ve işlenmiş ürün kalitesinin korunması açısından kritik bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

Araştırma ve Bulgular

1. Maviyemişte Raf Ömrü Dinamikleri

Raf ömrü, bir ürünün hasattan veya işlenmeden tüketime kadar geçen sürede tüketici tarafından kabul edilebilir kalite özelliklerini koruduğu zaman dilimi olarak tanımlanmakta olup, maviyemiş gibi hassas meyvelerde bu özellik oldukça karmaşık bir yapı göstermektedir (Guo, 2023; Ünal ve diğerleri, 2023). Maviyemişte raf ömrünü belirleyen başlıca faktörler arasında solunum hızı, su kaybı, etilen üretimi, doku yumuşaması, mikrobiyal bozulma ve biyoaktif bileşiklerin degradasyonu yer almaktadır (Ayvaz ve diğerleri, 2022; Samkumar ve diğerleri, 2022; Vaneková ve Rollinger, 2022). Bu süreçlerin hızı ise büyük ölçüde depolama sıcaklığı, bağıl nem, atmosfer bileşimi, hasat zamanı ve uygulanan postharvest işlemlere bağlı olarak değişmektedir.
Maviyemişlerde antosiyaninlerin stabilitesi; pH, ışık, sıcaklık ve moleküler yapı farklılıkları gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir (Janseerat ve diğerleri, 2024). Özellikle yüksek sıcaklık ve yoğun ışık koşulları, antosiyaninlerin kimyasal yapısında bozulmalara yol açarak renk kaybı ve biyoaktivitede azalma meydana getirebilmektedir (Gondo ve diğerleri, 2024; Zhou ve diğerleri, 2025). Bunun yanı sıra, farklı gıda matrislerinde ve depolama koşullarında fenolik bileşiklerin bozunma hızları önemli ölçüde değişebilmekte, bu durum ürünün genel kalite özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Depolama süresince toplam fenolik madde, flavonoid ve antioksidan kapasitede meydana gelen azalmalar, meyvenin yalnızca duyusal kalitesini değil, aynı zamanda fonksiyonel değerini de düşürmektedir (Guo, 2023).
Hasat zamanlaması da raf ömrü üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Özellikle orta hasat döneminde toplanan maviyemişlerde ağırlık kaybı ve çürüme oranlarının yaklaşık ve5 oranında azalabildiği ve bunun raf ömrünün uzamasına katkı sağladığı bildirilmektedir (Guo, 2023). Bu bulgu, uygun hasat olgunluğunun seçilmesinin depolama performansı ve ürün kalitesi açısından kritik olduğunu göstermektedir. Bu nedenle hasat zamanı, postharvest kalite yönetiminin temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmelidir.
Soğuk depolama koşulları, maviyemişte raf ömrü yönetiminin en temel araçlarından biridir. Düşük sıcaklıklar, meyvenin solunum hızını ve metabolik aktivitesini azaltmakta; buna bağlı olarak su kaybı, yumuşama ve mikrobiyal gelişim sınırlanmaktadır. Özellikle 1 ± 0.5 °C sıcaklık ve yaklaşık ve85 bağıl nem koşullarında yapılan depolamanın, antosiyanin stabilitesinin korunmasına ve kalite kayıplarının azaltılmasına önemli katkı sağladığı belirtilmektedir (Gondo ve diğerleri, 2024; Kulapichitr ve diğerleri, 2025).

Soğuk zincirin üretimden tüketime kadar kesintisiz olarak sürdürülmesi, turgorun korunması ve mikrobiyal yükün kontrol altında tutulması bakımından büyük önem taşımaktadır.
Maviyemişte raf ömrünün belirlenmesinde yalnızca fiziksel bozulma parametreleri değil, aynı zamanda biyoaktif bileşiklerin korunumu da dikkate alınmalıdır. Antosiyaninler, fenolik asitler, flavonoidler, askorbik asit ve diğer antioksidan bileşikler, meyvenin sağlık faydalarının temelini oluşturmakta ve depolama sürecinde bu bileşiklerin korunması ürünün fonksiyonel kalitesinin devamı açısından kritik kabul edilmektedir (Pellegrino ve diğerleri, 2024; Li ve diğerleri, 2021). Bu nedenle, raf ömrü kavramı yalnızca pazarlanabilirlik süresi ile sınırlı görülmemeli; besinsel ve fonksiyonel kaliteyi koruyan bütüncül bir kalite süreci olarak ele alınmalıdır.

2. Kalite Kayıplarının Başlıca Nedenleri

Maviyemişin hasat sonrası raf ömrünü sınırlayan ve ticari değerini azaltan faktörler, genetik yapı, hasat zamanlaması ve depolama koşulları ile doğrudan ilişkilidir (Guo, 2023; Ünal ve diğerleri.,2023). Meyvenin kalite kaybına yol açan temel süreçler aşağıdaki başlıklar altında değerlendirilebilir.

2.1. Su Kaybı ve Ağırlık Azalması

Maviyemişler hasat edildikten sonra metabolik olarak aktif kalmayı sürdürmekte ve terleme (transpirasyon) yoluyla su kaybetmektedirler (Guo, 2023). Hasat sonrası meydana gelen bu su kaybı, yalnızca ağırlık azalmasına neden olmakla kalmamakta, aynı zamanda meyvenin görsel kalitesini, turgor durumunu ve genel pazarlanabilirliğini de olumsuz yönde etkilemektedir.
Yapılan bir çalışmada, 14 günlük soğuk depolama sonunda kontrol grubu meyvelerinde ağırlık kaybı oranının ve3.04 olduğu belirlenmiş ve bu düzeydeki kaybın görsel kalite üzerinde olumsuz etki oluşturduğu bildirilmiştir (Ünal ve diğerleri.,2023). Hasat zamanının da bu süreç üzerinde belirleyici olduğu görülmektedir. Erken veya geç hasat edilen meyvelerde su kaybı daha yüksek seyrederken, tam çiçeklenmeden 60–65 gün sonra, yani orta hasat döneminde toplanan meyvelerde ağırlık kaybı ve çürüme oranlarının diğer dönemlere kıyasla ve5 oranında daha düşük olduğu saptanmıştır (Guo, 2023).

2.2. Doku Yumuşaması ve Yapısal Deformasyon

Meyve sertliğinde meydana gelen azalma, maviyemişin raf ömrünü belirleyen en kritik fiziksel değişimlerden biridir (Li ve diğerleri.,2021). Doku yumuşaması, meyvenin hem taşıma ve depolama dayanıklılığını hem de tüketici tarafından algılanan kalite düzeyini doğrudan etkilemektedir.
Bu süreç, hücre duvarında yer alan pektik maddelerin poligalakturonaz ve pektin metilesteraz gibi hidrolitik enzimler tarafından parçalanması sonucunda gerçekleşmektedir (Gün ve diğerleri.,2025). Özellikle poligalakturonaz enzim aktivitesindeki artış, meyvenin yapısal bütünlüğünü kaybetmesine ve buna bağlı olarak pazar değerinin düşmesine neden olmaktadır (Ünal ve diğerleri.,2023). Buna ek olarak, hasat ve taşıma sırasında oluşan mekanik darbeler meyve dokusunda hücresel hasar oluşturarak “internal browning” olarak tanımlanan iç kararma gelişimini tetiklemektedir (Moggia ve diğerleri.,2017). Bu durum, yalnızca tekstürel özellikleri değil, aynı zamanda meyvenin duyusal kalitesini de olumsuz etkilemektedir.

2.3. Antosiyanin ve Fenolik Bileşenlerin Degradasyonu

Maviyemişe fonksiyonel değer kazandıran biyoaktif bileşikler, depolama süreci boyunca oksidatif stresin etkisiyle azalma eğilimi göstermektedir (Guo, 2023; Zhou ve diğerleri.,2025). Bu değişim, meyvenin yalnızca besinsel niteliğini değil, aynı zamanda renk, görünüm ve antioksidan kapasite gibi kalite özelliklerini de doğrudan etkilemektedir.

Fenolik bileşiklerin ve antosiyaninlerin parçalanmasında başlıca rol oynayan enzimler polifenol oksidaz ve peroksidazdır (Gondo ve diğerleri.,2024; Rodríguez-Mena ve diğerleri.,2022). Bu enzimlerin aktivitesi sonucunda fenolik maddeler o-kinonlara yükseltgenmekte, ardından kahverengi pigmentlerin oluşumu ile enzimatik esmerleşme meydana gelmektedir (Sortino ve diğerleri.,2022). Depolama süresince toplam fenol içeriğinde ve8.90 ile ve11.75 arasında, antosiyanin miktarında ise hasat zamanına bağlı olarak ve4.21 ile ve12.21 arasında azalmalar gözlemlenmiştir (Guo, 2023). Oksijen varlığı ise bu degradasyon sürecini daha da hızlandırmaktadır (Rodríguez-Mena ve diğerleri.,2022).

2.4. Mikrobiyal Bozulma ve Çürüme

Meyvenin yüksek şeker içeriği ve hassas yapısı, hasat sonrası patojenlerin gelişimi için elverişli bir ortam oluşturmaktadır (Li ve diğerleri.,2021). Bu nedenle mikrobiyal bozulma, maviyemişte raf ömrünü kısıtlayan temel etmenlerden biri olarak değerlendirilmektedir.

Kalite kayıplarının önemli bir bölümü maya, küf ve mantar enfeksiyonlarından kaynaklanmaktadır (Li ve diğerleri.,2021). Özellikle depolama ortamında yüksek nemin bulunması ve sıcaklık dalgalanmalarının yaşanması, mikrobiyal aktiviteyi artırarak çürüme oranlarının yükselmesine ve buna bağlı olarak ekonomik kayıpların artmasına yol açmaktadır (Kalkan, 2025).

2.5. Oksidatif Stres ve Reaktif Oksijen Türleri

Hasat sonrası dönemde meyveler aşırı olgunlaşma ve yaşlanma sürecine girdikçe hücrelerde oksidatif stres belirtileri belirginleşmektedir (Ngubane ve diğerleri.,2026). Bu süreç, hücresel bütünlüğün bozulmasında ve kalite kayıplarının hızlanmasında önemli rol oynamaktadır.

Kontrolsüz şekilde üretilen reaktif oksijen türleri, hücresel bileşenlerde peroksidasyona, mutasyonlara ve nihayetinde hücre ölümüne neden olarak meyve kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir (Corpas ve diğerleri.,2023; Piechowiak ve diğerleri.,2021). Aynı zamanda bu stres koşulları, meyvenin antioksidan savunma sistemini zayıflatarak besin değerinin hızla düşmesine yol açmaktadır (Corpas ve diğerleri.,2023; Piechowiak ve diğerleri.,2020).

3. Raf Ömrünü Uzatmaya Yönelik Muhafaza Stratejileri ve Kalite Yönetimi

Maviyemiş gibi çabuk bozulan meyvelerde raf ömrünün uzatılması, hasat sonrası fizyolojik bozulmaların en aza indirilmesi ve besin değerinin korunması için uygun muhafaza stratejilerinin uygulanmasını gerektirmektedir. Bu kapsamda kontrollü atmosferde depolama, modifiye atmosfer paketleme, uygun sıcaklık ve nem yönetimi, yenilebilir kaplamalar, UV-C uygulamaları ve yeni nesil nanoteknolojik çözümler ön plana çıkmaktadır. Bu uygulamalar meyvenin solunum hızını düşürmekte, etilen üretimini sınırlamakta ve mikrobiyal gelişimi baskılayarak bozulma süreçlerini yavaşlatmaktadır (Samkumar ve diğerleri, 2022). Ayrıca antosiyaninler gibi hassas biyoaktif bileşiklerin degradasyonunu geciktirerek sağlık açısından değerli bileşenlerin korunmasına katkıda bulunmaktadır (Janseerat ve diğerleri, 2024; Yücetepe ve diğerleri, 2024).

Hasat sonrası ön işlemler, raf ömrü yönetiminin ilk basamağını oluşturmaktadır. Bu uygulamalar, meyvenin fiziksel bütünlüğünün korunması, yaralanmaların azaltılması ve mikrobiyal yükün düşürülmesi amacıyla uygulanmaktadır.

Uygun hasat zamanı ile birlikte değerlendirildiğinde bu işlemler, kalite kayıplarının geciktirilmesinde etkili olmaktadır. Nitekim orta hasat döneminde toplanan meyvelerde ağırlık kaybı ve çürümenin azaltılabildiği, böylece raf ömrünün uzatılabildiği belirtilmektedir (Guo, 2023).

Soğuk depolama, solunum hızını, metabolik aktiviteyi, su kaybını ve mikrobiyal gelişimi sınırlayarak raf ömrünün uzatılmasında temel yöntemlerden biridir. Bununla birlikte, kontrollü atmosfer depolama ve modifiye atmosfer paketleme teknikleri, meyvenin çevresindeki gaz kompozisyonunu düzenleyerek daha ileri düzeyde koruma sağlayabilmektedir. Bu tekniklerde oksijen konsantrasyonunun azaltılması ve karbondioksit düzeyinin artırılması yoluyla solunum hızı ve etilen sentezi baskılanmakta, böylece yaşlanma ve bozulma süreçleri geciktirilmektedir (Samkumar ve diğerleri, 2022; Corpas ve diğerleri, 2023). Sonuç olarak bu yöntemler, kalite kayıplarını azaltırken ürünün tazeliğini ve duyusal özelliklerini daha uzun süre koruyabilmektedir.

Yenilebilir kaplamalar ve nano-kaplama teknolojileri de maviyemişte umut verici muhafaza stratejileri arasında yer almaktadır. Özellikle kitozan bazlı SiO_2-TiO_2 filmler gibi nano-kaplamalar, meyve yüzeyinde oksijen bariyeri oluşturarak antifungal etki sağlamakta, oksidatif enzimlerin aktivitesini baskılamakta ve maya-küf gelişimini sınırlandırmaktadır. Bu sayede meyvenin tazeliği, sertliği ve görsel kalitesi korunabilmektedir (Li ve diğerleri, 2021; Messinese ve diğerleri, 2023). Antosiyaninlerin oksidasyon ve enzimatik degradasyona duyarlı yapısı dikkate alındığında, bu tür kaplamaların raf ömrü yönetiminde önemli bir koruyucu işlev üstlendiği söylenebilir (Rodríguez-Mena ve diğerleri, 2022).

UV-C ışınlama gibi fiziksel uygulamalar da postharvest kalite yönetiminde kullanılmaktadır. Özellikle 254 nm dalga boyunda 5 dakika süreyle uygulanan UV-C'nin, kitozan kaplama ile birlikte kullanıldığında poligalakturonaz aktivitesini sınırlandırdığı, ağırlık kaybını azaltarak genel kaliteyi koruduğu bildirilmektedir. Bu kombinasyonun ağırlık kaybını kontrol grubuna kıyasla ve1.59 düzeyine kadar düşürebildiği ve meyvenin bütünlüğünü daha iyi koruduğu belirtilmiştir (Ünal ve diğerleri, 2023). Ayrıca bu uygulamaların antioksidan aktivite ile fenolik bileşiklerin korunmasına da katkı sağladığı ifade edilmektedir (Adhikari ve diğerleri, 2024; Ünal ve diğerleri, 2023). Kalsiyum klorür uygulamaları, farklı meyve türlerinde hücre duvarı bütünlüğünü destekleyerek raf ömrünü uzatan bir diğer yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Çilek, liçi, mango ve yaban mersini gibi meyvelerde başarılı sonuçlar veren bu uygulamalar, tekstürel kaliteyi koruma açısından önem taşımaktadır (Çolak ve diğerleri, 2025). Benzer şekilde görünür spektrumlu ışık uygulamaları, biyobozunur ve aktif ambalaj sistemleri ile polifenol antioksidanlarla zenginleştirilmiş filmler de oksidatif bozulmayı azaltmak ve antimikrobiyal etki sağlamak suretiyle raf ömrünü uzatmada yenilikçi çözümler sunmaktadır (Castillejo ve diğerleri, 2025; Priyadarshi ve diğerleri, 2024).

Son yıllarda soğuk plazma, ozon, nanoteknoloji ve biyokontrol ajanlarının kullanımı gibi yeni nesil teknikler de postharvest yönetimde dikkat çekmektedir. Bu yöntemlerin mikrobiyal kontaminasyonu azaltma, duyusal kaliteyi koruma ve besin değerini sürdürme açısından etkili oldukları bildirilmektedir (Ashraf ve diğerleri, 2025; Palumbo ve diğerleri, 2022). Örneğin, çinko oksit nanopartiküllerinin küf gelişimini baskılayarak turunçgil meyvelerinin raf ömrünü uzattığı, kitosan bazlı kaplamaların ise çileklerde fungal çürümeyi azaltabildiği gösterilmiştir (Ashraf ve diğerleri, 2025). Ozon ve ultraviyole ışık gibi uygulamalarla entegre edilen bu stratejiler, taze ürünlerin pazar değerini artırırken gıda israfının azaltılmasına da katkı sağlamaktadır (El-Beltagi ve diğerleri, 2023; Olveira-Bouzas ve diğerleri, 2022; Chan ve diğerleri, 2025; Fang ve Wakisaka, 2021).

3.1 Soğuk Zincir ve Depolama Parametrelerinin Optimizasyonu

Meyve ve sebzelerde hasat sonrası kalite kayıplarının en aza indirilmesinde soğuk zincir yönetimi kritik öneme sahiptir. Hasattan tüketime kadar geçen süreçte depolama sıcaklığı, bağıl nem ve atmosfer bileşiminin hassas biçimde kontrol edilmesi, ürünün metabolik faaliyetlerinin yavaşlatılmasını ve mikrobiyal gelişimin sınırlandırılmasını sağlamaktadır (Ngubane ve diğerleri, 2026; Valenzuela, 2023). Özellikle düşük sıcaklık ile yüksek nem kombinasyonu, su kaybını ve solunum hızını azaltarak ürünün turgorunu ve besin değerini korumaktadır. Kontrollü atmosfer uygulamaları ise oksijen seviyesini düşürüp karbondioksit düzeyini artırarak yaşlanma sürecini yavaşlatmaktadır (Corpas ve diğerleri, 2023).

Nanoteknoloji destekli uygulamalar, soğuk zincir ve depo yönetiminin tamamlayıcı unsurları olarak değerlendirilmektedir. Nanokapsüllenmiş biyoaktif bileşikler, ürün yüzeyine uygulandığında bozulma etmenlerine karşı daha etkili koruma sağlayabilmekte; gıda güvenliği, duyusal kalite ve raf ömrü bakımından avantaj sunmaktadır (El-Ashaal ve diğerleri, 2025; Kumar ve diğerleri, 2023; Valenzuela, 2023). Benzer biçimde biyobozunur ambalajlama sistemleri ve yenilebilir kaplamalar, oksidatif bozulmanın azaltılmasında ve antimikrobiyal koruma sağlanmasında sürdürülebilir alternatifler olarak öne çıkmaktadır (Rizzo, 2025).

Gümüş, çinko oksit ve titanyum dioksit gibi nanopartikülleri içeren akıllı ambalajlama materyalleri, meyvenin solunum hızını düzenleyerek ve mikrobiyal büyümeyi baskılayarak raf ömrünü anlamlı düzeyde uzatabilmektedir (Ngubane ve diğerleri, 2026). Bu yaklaşımlar, yalnızca kalite kayıplarını azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda küresel tedarik zincirlerinde lojistik verimliliği artırarak ürünlerin uzak pazarlara daha uzun süre taze ve kaliteli biçimde ulaştırılmasını mümkün kılmaktadır (Palumbo ve diğerleri, 2022; Ashraf ve diğerleri, 2025). Böylece hem üretici gelirinin korunmasına hem de tüketicilerin taze ve besleyici ürünlere erişimine katkı sağlanmaktadır.

Sürdürülebilir postharvest inovasyonları, yalnızca kalite koruma odaklı değil, aynı zamanda çevresel etkilerin azaltılmasını hedefleyen bütünleşik yaklaşımları da içermektedir. Biyolojik kontrol ajanları ile doğal bileşiklerin kullanımı, sentetik kimyasallara bağımlılığı azaltarak ekolojik dengeyi koruyan önemli bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Kalkan, 2025; Lawal ve diğerleri, 2025). Nanoteknoloji ile entegre edilen biyokontrol ajanlarının stabiliteyi artırdığı, hedef patojenlere daha etkili yönelim sağladığı ve kontrollü salım mekanizmaları sunduğu bildirilmektedir (Lawal ve diğerleri, 2025). Bu doğrultuda modern postharvest teknolojileri, kalite koruma, gıda güvenliği, ekonomik sürdürülebilirlik ve çevresel sorumluluk ekseninde birlikte değerlendirilmelidir.

3.2. Kontrollü Atmosfer Depolama ve Modifiye Atmosfer Paketleme (CA/MAP)

Kontrollü atmosfer depolama, büyük ölçekli depolama birimlerinde hava geçirmez ortamlar oluşturularak oksijen düzeyinin genellikle ve1–3 seviyelerine düşürülmesi ve karbondioksit konsantrasyonunun belirli oranlarda artırılması esasına dayanmaktadır. Bu uygulama, solunum hızını yavaşlatmakta, etilen üretimini azaltmakta ve yaşlanma ile mikrobiyal bozulmayı geciktirmektedir (Corpas ve diğerleri, 2023). Modifiye atmosfer paketleme ise benzer etkiyi, ürünlerin gaz geçirgenliği kontrollü filmlerle ambalajlanması yoluyla sağlayarak paket içi O_2 ve CO_2 dengesini değiştirmektedir. Bu yöntem, özellikle taze ürünlerde solunum oranını düşürmek, duyusal kaliteyi korumak ve postharvest kayıpları azaltmak bakımından önemli avantajlar sunmaktadır (Ngubane ve diğerleri, 2026; Valenzuela, 2023).

CA ve MAP teknikleri, meyve ve sebzelerde çevresel gaz bileşiminin dikkatli biçimde düzenlenmesi yoluyla yaşlanma sürecini yavaşlatmakta ve mikrobiyal bozulmayı azaltmaktadır. Elma ve armut gibi ürünlerde raf ömrünü aylar düzeyinde uzatabildiği bilinen bu teknikler, maviyemiş gibi hassas meyveler için de büyük potansiyel taşımaktadır (Palumbo ve diğerleri, 2022; Lisboa ve diğerleri, 2024). Bu teknolojilerin etkinliği; ürün çeşidi, depolama sıcaklığı, film geçirgenliği ve başlangıç kalite düzeyi gibi birçok faktöre bağlı olmakla birlikte, uygun koşullarda uygulandığında kalite kayıplarını önemli ölçüde azaltabildiği görülmektedir.

Hasat Sonrası Fizyolojik ve Biyokimyasal Değişimler

Maviyemiş gibi hassas meyvelerde hasat sonrası depolama sürecinde antosiyanin içeriği, toplam fenolik bileşikler ve antioksidan kapasite gibi fitokimyasal özelliklerde meydana gelen değişimler, ürünün besinsel ve fonksiyonel kalitesini doğrudan belirleyen başlıca fizyolojik göstergeler arasında yer almaktadır. Bu nedenle, depolama süresince söz konusu bileşiklerin korunması, yalnızca kalite devamlılığı açısından değil, aynı zamanda tüketiciye ulaştırılan ürünün sağlık değerinin sürdürülebilmesi bakımından da büyük önem taşımaktadır. Özellikle düşük sıcaklıkta depolama, meyvenin hücresel metabolizmasını yavaşlatarak enzimatik bozunma süreçlerini sınırlandırmakta ve bu temel biyokimyasal özelliklerin korunmasına katkı sağlamaktadır.

Hasat sonrası kalite yönetiminde kullanılan yenilikçi yaklaşımlardan biri olan titanyum dioksit gibi yarı iletken katalizörlerin ultraviyole ışık ile kombinasyonu, depolama ortamındaki etilen düzeyini ihmal edilebilir seviyelere indirerek solunum şiddetini baskılamakta ve yaşlanma sürecinin daha etkin biçimde kontrol edilmesini mümkün kılmaktadır (Bodaghi, 2024). Benzer şekilde, şitozan ve nano-silika esaslı kompozit kaplamalar, antioksidan enzim aktivitelerini artırarak ürünlerin soğuk depolama koşullarına toleransını yükseltmekte ve özellikle loquat gibi hassas meyvelerde şeker içeriğinin korunmasına katkıda bulunmaktadır (Mahmoudi ve diğerleri.,2022). Bu tür uygulamalar, yalnızca fiziksel bariyer etkisi sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda oksidatif stresin sınırlandırılmasına da yardımcı olarak genel depolama performansını iyileştirmektedir.

Modifiye atmosfer paketleme uygulamaları da hasat sonrası kalite kayıplarının azaltılmasında etkili stratejiler arasında önemli bir yer tutmaktadır. Bu uygulamalar, meyve dokusunda hücre duvarı yıkımında rol oynayan pektin metilesteraz ve poligalakturonaz gibi hidrolitik enzimlerin aktivitesini baskılayarak doku yumuşamasını yavaşlatmakta ve böylece depolama süresince yapısal bütünlüğün korunmasına katkı sunmaktadır (Gün ve diğerleri.,2025). Aynı zamanda düşük oksijen ve yüksek karbondioksit konsantrasyonlarına dayanan MAP sistemleri, fenolik oksidasyonu sınırlandırarak renk ve aroma kaybı gibi duyusal kalite unsurlarının daha stabil kalmasını sağlamaktadır (Çolak ve diğerleri.,2025; Gün ve diğerleri.,2025). Bunun yanında, oksalik ve sitrik asit gibi organik asit uygulamalarının modifiye atmosfer paketleme ile birlikte kullanılması, meyve eti sertliğinin korunmasına, su kaybının azaltılmasına ve genel depolama performansının iyileştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır (Tekin ve diğerleri.,2025).

Bu entegre muhafaza stratejileri, meyve fizyolojisinde oksidatif stresin kontrol altına alınmasında da önemli rol oynamaktadır. Antioksidan savunma sistemlerinin aktive edilmesi sayesinde reaktif oksijen türlerinin neden olduğu hücresel zarar hafifletilmekte, böylece kalite kayıplarının ilerleyişi yavaşlatılmaktadır (Lagarda-Clark ve diğerleri.,2024).

Özellikle hasat sonrası uygulanan biyokimyasal müdahaleler, enzimatik esmerleşmenin temel belirleyicilerinden biri olan polifenol oksidaz aktivitesini baskılayarak ürünün piyasa değerinin ve organoleptik özelliklerinin korunmasında kritik işlev görmektedir (Sortino ve diğerleri.,2022). Ayrıca, gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan askorbik asit ve çeşitli fenolik bileşikler, enzimatik esmerleşmeyi önleyici özellikleri sayesinde kaplama formülasyonlarına dahil edilerek raf ömrünün uzatılmasında etkili bir bariyer oluşturmaktadır (Sortino ve diğerleri.,2022). Benzer biçimde, kalsiyum klorür gibi mineral desteklerin modifiye atmosfer paketleme ile birlikte uygulanması, askorbik asit oksidasyonunu sınırlandırmakta, antioksidan enzim aktivitelerini güçlendirmekte ve depolama süresince fenolik bileşiklerin stabilitesini desteklemektedir (Çolak ve diğerleri.,2025).

3.3. Yenilebilir Kaplamalar ve Nano-Kaplama Teknolojileri

Meyve yüzeyine uygulanan yenilebilir kaplamalar, fiziksel ve mikrobiyal bariyer oluşturarak raf ömrünün uzatılmasında önemli rol oynamaktadır. Bu kaplamalar, meyve yüzeyinden su kaybını azaltmakta, gaz değişimini düzenlemekte ve mikrobiyal gelişimi sınırlayarak kalite kayıplarını geciktirmektedir.

Kitozan bazlı kaplamalar, maviyemişlerde en yaygın araştırılan uygulamalar arasında yer almaktadır. ve1–2 oranında uygulanan kitozan kaplamalarının meyvenin solunum hızını düşürdüğü, transpirasyon kayıplarını azalttığı ve raf ömrünü belirgin biçimde uzattığı bildirilmektedir (Li ve diğerleri., 2021; Ünal ve diğerleri., 2023). Benzer şekilde, kitozan uygulamalarının meyve dokusundaki su kaybını azaltarak pazarlanabilir kaliteyi koruduğu farklı çalışmalarda da rapor edilmiştir.

Nanoteknolojik yaklaşımlar ise bu kaplama sistemlerinin performansını daha da geliştirmeyi amaçlamaktadır. Kitozan matrisine eklenen Nano-$\boldsymbol{SiO_2}$ veya Nano-$\boldsymbol{TiO_2}$ parçacıkları, filmin mekanik dayanıklılığını ve gaz bariyer özelliklerini artırmaktadır (Li ve diğerleri., 2021). Bu nanokompozit kaplamalar, oksijen difüzyonunu sınırlayarak antosiyaninlerin ve fenolik bileşiklerin oksidatif degradasyonunu azaltmakta ve meyvenin antioksidan kapasitesinin depolama süresi boyunca korunmasına katkı sağlamaktadır.

3.4. Fiziksel ve Kimyasal Postharvest Uygulamalar

Hasat sonrası kalite yönetiminde kullanılan bir diğer yaklaşım, meyve yüzeyine doğrudan uygulanan fiziksel ve kimyasal işlemlerdir. Bu uygulamalar meyvenin fizyolojik bozulma süreçlerini yavaşlatmayı ve mikrobiyal kontaminasyonu azaltmayı amaçlamaktadır.

1-MCP (1-Metilsiklopropen) uygulaması, etilen reseptörlerini bloke ederek meyvede olgunlaşma ve yumuşama süreçlerini geciktirmektedir. Yaklaşık 0.3–1 $\boldsymbol{\mu l/L}$dozunda ve 12–24 saat süreyle uygulanan 1-MCP işlemlerinin özellikle kontrollü atmosfer depolama ile birlikte kullanıldığında daha etkili sonuçlar verdiği bildirilmektedir (Chiabrando & Giacalone, 2010; Zhang ve diğerleri., 2020).

Organik asit uygulamaları da doğal sanitasyon yöntemleri arasında yer almaktadır. Sitrik asit veya asetik asit içeren sprey uygulamaları, meyve yüzeyindeki mikrobiyal yükü azaltarak depolama sürecinde oluşabilecek çürümeleri sınırlandırabilmektedir (Pleşoianu ve diğerleri., 2020).

UV-C ışınlama ise meyvede savunma mekanizmalarını aktive eden bir diğer fiziksel uygulamadır. Yaklaşık 254 nm dalga boyunda gerçekleştirilen UV-C uygulamalarının, solunum hızını azaltarak oksidatif hasarı sınırladığı ve antosiyanin stabilitesinin korunmasına katkı sağladığı bildirilmektedir (Bilgin & Güneş, 2024; Ünal ve diğerleri., 2023). Bu tür uygulamaların UV-C ile birlikte 1-MCP kullanımında daha güçlü sonuçlar verdiği de çeşitli araştırmalarda gösterilmiştir.

3.5. Yenilikçi Postharvest Teknolojileri

Son yıllarda geliştirilen yeni nesil muhafaza teknolojileri, maviyemişlerin raf ömrünü uzatmak amacıyla giderek daha fazla araştırılmaktadır. Bu yöntemler genellikle ileri teknoloji uygulamaları olup mikrobiyal kontaminasyonu azaltma, oksidatif stresi sınırlama ve kalite parametrelerini koruma hedefi taşımaktadır.

Ozon ($\boldsymbol{O_3}$) gazı, güçlü oksidatif özellikleri sayesinde depo ortamlarının sterilizasyonunda ve meyve yüzeyindeki patojenlerin azaltılmasında kullanılmaktadır. Ozon uygulamalarının depolama süresince çürüme oranlarını düşürdüğü ve fenolik bileşiklerin korunmasına katkı sağladığı çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur.

Biyoteknolojik gazlar olarak tanımlanan hidrojen sülfür ($\boldsymbol{H_2S}$) ve nitrik oksit ($\boldsymbol{NO}$) uygulamaları da son yıllarda dikkat çeken yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Bu gazların hücresel düzeyde antioksidan savunma sistemlerini aktive ederek oksidatif stresi sınırlandırdığı ve senesans sürecini yavaşlatabildiği bildirilmektedir (Corpas ve diğerleri., 2023).

Bunun yanında akıllı paketleme sistemleri, tazelik sensörleri ve gaz göstergeleri içeren ambalaj teknolojileri sayesinde meyvenin depolama ve taşınma sürecindeki kalite durumunun izlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu tür sistemler, tedarik zincirinde kalite kontrolünü kolaylaştırarak postharvest yönetimin daha etkin biçimde yürütülmesine katkıda bulunmaktadır (Cao ve diğerleri., 2025; Ngubane ve diğerleri., 2026).

SONUÇ

Maviyemiş, yüksek antosiyanin içeriği, güçlü antioksidan kapasitesi ve artan tüketici talebi nedeniyle ekonomik ve fonksiyonel değeri yüksek bir üzümsü meyve olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, ince kabuk yapısı, yüksek solunum hızı, su kaybına yatkınlığı, doku yumuşaması, mikrobiyal bozulma ve biyoaktif bileşiklerin depolama süresince degradasyona uğraması gibi nedenlerle hasat sonrası kalite kayıplarına oldukça duyarlıdır. Bu durum, maviyemişte raf ömrünün yalnızca fiziksel bozulma göstergeleriyle değil, aynı zamanda besinsel ve fonksiyonel kalite ölçütleriyle birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Derlemede ele alınan bulgular, maviyemişte raf ömrünü belirleyen temel süreçlerin su kaybı, hücre duvarı yıkımı, oksidatif stres, fenolik bileşiklerin azalması ve patojen kaynaklı çürümeler etrafında şekillendiğini göstermektedir. Özellikle antosiyaninler, fenolik asitler, flavonoidler ve diğer antioksidan bileşiklerin korunumu, yalnızca meyvenin ticari değerinin sürdürülmesi açısından değil, aynı zamanda insan sağlığına yönelik fonksiyonel katkılarının devamlılığı bakımından da büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, hasat sonrası yönetim stratejilerinin yalnızca görünüm, sertlik ve ağırlık kaybı gibi fiziksel kalite parametrelerine değil, biyokimyasal ve mikrobiyolojik kalite göstergelerine de odaklanması gerekmektedir.

Maviyemişte raf ömrünü uzatmaya yönelik yaklaşımlar değerlendirildiğinde, sıcaklık ve bağıl nemin optimize edildiği soğuk zincir uygulamaları ile kontrollü atmosfer depolama ve modifiye atmosfer paketleme sistemlerinin temel muhafaza araçları olduğu anlaşılmaktadır. Bunun yanında yenilebilir kaplamalar, nanokompozit filmler, UV-C ışınlama, 1-MCP, organik asit uygulamaları, kalsiyum bazlı destekler, ozon, biyoteknolojik gazlar ve akıllı ambalaj sistemleri gibi yöntemler, kalite kayıplarının azaltılmasında önemli potansiyel taşımaktadır. Ancak mevcut veriler, tek bir uygulamanın tüm kalite kayıplarını önlemede çoğu zaman yeterli olmadığını; buna karşılık sıcaklık yönetimi, atmosfer kontrolü, yüzey koruma teknolojileri ve biyokimyasal müdahalelerin birlikte kullanıldığı entegre yaklaşımların daha tutarlı ve etkili sonuçlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

Ayrıca, hasat zamanı ve olgunluk düzeyinin doğru belirlenmesi, mekanik hasarın azaltılması, hijyen koşullarının iyileştirilmesi ve standardize kalite değerlendirme kriterlerinin kullanılması, muhafaza başarısını doğrudan etkileyen temel unsurlar arasında yer almaktadır. Sertlik, ağırlık kaybı, çözünür kuru madde, titre edilebilir asitlik, renk parametreleri, toplam fenolik madde, antosiyanin içeriği, antioksidan kapasite ve mikrobiyal yük gibi göstergelerin birlikte değerlendirilmesi, hem bilimsel çalışmaların karşılaştırılabilirliğini artıracak hem de üretici ölçeğinde uygulanabilir depolama protokollerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.
Sonuç olarak, maviyemişte hasat sonrası kalite yönetimi; fizyolojik, biyokimyasal ve mikrobiyolojik süreçlerin birlikte ele alındığı bütüncül bir yaklaşım gerektirmektedir. Gelecekte yürütülecek çalışmaların, çeşitler arası farklılıkları, üretim çevresinin etkilerini ve farklı muhafaza tekniklerinin kombinasyonel kullanımını daha ayrıntılı biçimde incelemesi önem taşımaktadır. Böylece, üretici ve tedarik zinciri koşullarına uyarlanabilir, ekonomik açıdan uygulanabilir ve kalite koruma başarısı yüksek postharvest yönetim stratejilerinin geliştirilmesi mümkün olabilecektir.

KAYNAKÇA

Adhikari, J., Araghi, L. R., Singh, R. K., Adhikari, K., & Patil, B. S. (2024). Continuous-Flow High-Pressure Homogenization of Blueberry Juice Enhances Anthocyanin and Ascorbic Acid Stability during Cold Storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(20), 11629. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c01289

Akbulut, M., & Bakoğlu, N. (2017). Maviyemişlerde Pazarlama Ve Ambalajlama. *Meyve Bilimi*, 4(1), 30-35. https://dergipark.org.tr/tr/pub/meyve/issue/31361/342697

Ashraf, M., et al. (2025). Innovative technologies in postharvest management of fruits and vegetables: a review. *European Food Research and Technology*, 251(11), 3445. https://doi.org/10.1007/s00217-025-04861-4

Ayvaz, H., et al. (2022). Anthocyanins: Metabolic Digestion, Bioavailability, Therapeutic Effects, Current Pharmaceutical/Industrial Use, and Innovation Potential. *Antioxidants*, 12(1), 48. https://doi.org/10.3390/antiox12010048

Bal, E. (2019). Influence of Chitosan-Based Coatings with UV Irradiation on Quality of Strawberry Fruit During Cold Storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(1), e13845.

Bilgin, A. B., & Güneş, G. (2024). Ultraviyole-C uygulamasının hasat sonrası dutsu meyvelerin fizyolojisine ve bozulmasına etkisi: Derleme. *Akademik Gıda*, 22(1), 45-58.

Bodaghi, H. (2024). Characterization and application of the nanocompiste packaging films containing clay and TiO2 on preservation of tomato fruit under cold storage. *BMC Plant Biology*, 24(1). https://doi.org/10.1186/s12870-024-05215-0

Brecht, J. K., et al. (2019). *Protecting Perishable Foods During Transport by Truck and Rail*. USDA Handbook.

Castillejo, N., et al. (2025). Postharvest UV-B and Visible LED Lighting Preserve Quality and Modulate Bioactive Compounds in Strawberries. *Food and Bioprocess Technology*. https://doi.org/10.1007/s11947-025-04052-9

Chan, W., Kaseke, T., & Nyam, K. L. (2025). Recent advances in active, smart and edible packaging applications to enhance post-harvest quality and shelf-life of fruits. *Frontiers in Food Science and Technology*, 5. https://doi.org/10.3389/frfst.2025.1723921

Chang, Y., et al. (2025). Advances in postharvest nanotechnology: Enhancing fresh produce shelf life and quality to reduce losses and waste. *Postharvest Biology and Technology*, 222, 113397. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2025.113397

Chiabrando, V., & Giacalone, G. (2010). Shelf-life extension of highbush blueberry using 1-methylcyclopropene. *Postharvest Biology and Technology*, 58(2), 81-84.

Çolak, A. M., et al. (2025). Physiological effects of MAP and calcium chloride treatments on biochemical metabolites and quality stability by reducing respiration rate in sweet cherry fruit during storage. *BMC Plant Biology*, 25(1). https://doi.org/10.1186/s12870-025-07454-1

Corpas, F. J., et al. (2023). Nitric Oxide (NO) and Hydrogen Sulfide (H2S): New Potential Biotechnological Tools for Postharvest Storage of Horticultural Crops. *Journal of Plant Growth Regulation*. https://doi.org/10.1007/s00344-023-11150-5

El-Ashaal, E. S., et al. (2025). Chitosan and carboxymethyl chitosan nanocarriers enhance mango seed extract stability and antimicrobial activity to improve strawberry postharvest quality. *Scientific Reports*, 15(1). https://doi.org/10.1038/s41598-025-16756-1

El-Beltagi, H. S., et al. (2023). Editorial: Advances in pre- and postharvest applications to reduce qualitative and quantitative food loss and waste. *Frontiers in Plant Science*, 14. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1149358

Falagán, N., Miclo, T., & Terry, L. A. (2020). Graduated Controlled Atmosphere: A Novel Approach to Increase "Duke" Blueberry Storage Life. *Frontiers in Plant Science*, 11, 221.

Fang, Y., & Wakisaka, M. (2021). A Review on the Modified Atmosphere Preservation of Fruits and Vegetables with Cutting-Edge Technologies. *Agriculture*, 11(10), 992. https://doi.org/10.3390/agriculture11100992

Gondo, T. F., et al. (2024). Investigating the quality of extraction and quantification of bioactive compounds in berries through liquid chromatography and multivariate curve resolution. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 416(24), 5387. https://doi.org/10.1007/s00216-024-05474-8

Gün, S., Öztürk, B., Ağlar, E., & Karakaya, O. (2025). Quality preservation of jujube fruit during cold storage: effect of maturity stage and modified atmosphere packaging. *BMC Plant Biology*, 25(1). https://doi.org/10.1186/s12870-025-07492-9

Guo, D. (2023). Effects of harvest dates on the physiology and quality attributes of blueberries during long-term postharvest storage. *The Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 60(2), 203. https://doi.org/10.21162/pakjas/23.189

Huynh, N. K., et al. (2019). Recent advances in postharvest technologies to extend the shelf life of blueberries, raspberries and blackberries. *Journal of Berry Research*, 9(2), 185-207.

Janseerat, et al. (2024). Anthocyanin-Based Natural Color Induced Intelligent Food Packaging Sensor: A Review. *Current Food Science and Technology Reports*, 2(2), 157. https://doi.org/10.1007/s43555-024-00021-z

Kalkan, F. (2025). Management of Postharvest Diseases via Eco-Friendly Technologies: A Review of Recent Research. *Horticulturae*, 11(9), 1056. https://doi.org/10.3390/horticulturae11091056

Krishna, P., et al. (2023). Improving Blueberry Fruit Nutritional Quality through Physiological and Genetic Interventions: A Review of Current Research and Future Directions. *Antioxidants*, 12(4), 810. https://doi.org/10.3390/antiox12040810

Kulapichitr, F., Cadwallader, K. R., & Obenland, D. (2025). Characterization of Changes in Key Odorants in Blueberries During Simulated Commercial Storage and Marketing by Sensory-Directed Flavor Analysis. *Foods*, 14(7), 1244. https://doi.org/10.3390/foods14071244

Kumar, N., et al. (2023). Next generation edible nanoformulations for improving post-harvest shelf-life of citrus fruits. *Journal of Food Measurement & Characterization*, 18(3), 1825. https://doi.org/10.1007/s11694-023-02287-8

Lagarda-Clark, E. A., Goulet, C., & Duarte-Sierra, A. (2024). Biochemical dynamics during postharvest: Highlighting the interplay of stress during storage and maturation of fresh produce. *BioMolecular Concepts*, 15(1). https://doi.org/10.1515/bmc-2022-0048

Lakshmikanthan, M., et al. (2024). A Comprehensive Review on Anthocyanin-rich foods: Insights into Extraction, Medicinal Potential, and Sustainable Applications. *Journal of Agriculture and Food Research*, 17, 101245. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101245

Lawal, H., et al. (2025). Biocontrol and Nanotechnology Strategies for Postharvest Disease Management in Fruits and Vegetables: A Comprehensive Review. *Foods*, 14(16), 2782. https://doi.org/10.3390/foods14162782

Leal, A., et al. (2024). State-of-the-art non-destructive approaches for maturity index determination in fruits and vegetables: principles, applications, and future directions. *Food Production Processing and Nutrition*, 6(1). https://doi.org/10.1186/s43014-023-00205-5

Lee, S. I., et al. (2021). Investigation of soil microbiome under the influence of different mulching treatments in northern highbush blueberry. *AMB Express*, 11(1). https://doi.org/10.1186/s13568-021-01294-6

Li, Y., et al. (2021). Shelf-life, quality, safety evaluations of blueberry fruits coated with chitosan nano-material films. *Scientific Reports*, 11(1). https://doi.org/10.1038/s41598-020-80056-z

Liang, L., et al. (2023). Exploring the potential of ume-derived proanthocyanidins: novel applications for blueberry preservation. *Frontiers in Microbiology*, 14. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1265993

Lisboa, H. M., et al. (2024). Innovative and Sustainable Food Preservation Techniques: Enhancing Food Quality, Safety, and Environmental Sustainability. *Sustainability*, 16(18), 8223. https://doi.org/10.3390/su16188223

Mahmoudi, R., et al. (2022). Postharvest chitosan-arginine nanoparticles application ameliorates chilling injury in plum fruit during cold storage by enhancing ROS scavenging system activity. *BMC Plant Biology*, 22(1). https://doi.org/10.1186/s12870-022-03952-8

Manzoor, M. F., et al. (2022). A Narrative Review of Recent Advances in Rapid Assessment of Anthocyanins in Agricultural and Food Products. *Frontiers in Nutrition*, 9. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.901342

Mengist, M. F., et al. (2022). Dissecting the genetic basis of bioactive metabolites and fruit quality traits in blueberries (Vaccinium corymbosum L.). *Frontiers in Plant Science*, 13. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.964656

Messinese, E., et al. (2023). By-Products as Sustainable Source of Bioactive Compounds for Potential Application in the Field of Food and New Materials for Packaging Development. *Food and Bioprocess Technology*, 17(3), 606. https://doi.org/10.1007/s11947-023-03158-2

Moggia, C., Graell, J., Lara, I., González, G., & Lobos, G. A. (2017). Firmness at Harvest Impacts Postharvest Fruit Softening and Internal Browning Development in Mechanically Damaged and Non-damaged Highbush Blueberries (Vaccinium corymbosum L.). *Frontiers in Plant Science*, 8. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00535

Montanari, S., et al. (2022). High-density linkage map construction in an autotetraploid blueberry population and detection of quantitative trait loci for anthocyanin content. *Frontiers in Plant Science*, 13. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.965397

Ngubane, S., et al. (2026). Nanoparticle-Based Techniques for Preserving Fruit and Vegetables Postharvest Quality: Mechanism and Efficacy in Food Packaging Technology. *Food and Bioprocess Technology*, 19(3). https://doi.org/10.1007/s11947-025-04185-x

Nguyen, H. M., et al. (2023). Two genes, ANS and UFGT2, from Vaccinium spp. are key steps for modulating anthocyanin production. *Frontiers in Plant Science*, 14. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1082246

Olveira-Bouzas, V., et al. (2022). Evaluation of a Packaging System in Pallets Under Modified Atmosphere to Extend the Shelf-life of 'Padrón' Peppers Stored at Refrigeration Temperature. *Food and Bioprocess Technology*, 16(4), 785. https://doi.org/10.1007/s11947-022-02966-2

Palumbo, M., et al. (2022). Emerging Postharvest Technologies to Enhance the Shelf-Life of Fruit and Vegetables: An Overview. *Foods*, 11(23), 3925. https://doi.org/10.3390/foods11233925

Pateiro, M., et al. (2022). The role of emerging technologies in the dehydration of berries: Quality, bioactive compounds, and shelf life. *Food Chemistry X*, 16, 100465. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100465

Pellegrino, M., et al. (2024). Application of Natural Edible Coating to Enhance the Shelf Life of Red Fruits and Their Bioactive Content. *Applied Sciences*, 14(11), 4552. https://doi.org/10.3390/app14114552

Piechowiak, T., Skóra, B., & Balawejder, M. (2020). Ozone Treatment Induces Changes in Antioxidative Defense System in Blueberry Fruit During Storage. *Food and Bioprocess Technology*, 13(7), 1240. https://doi.org/10.1007/s11947-020-02450-9

Piechowiak, T., Sowa, P., Tarapatskyy, M., & Balawejder, M. (2021). The Role of Mitochondrial Energy Metabolism in Shaping the Quality of Highbush Blueberry Fruit During Storage in Ozone-Enriched Atmosphere. *Food and Bioprocess Technology*, 14(11), 1973. https://doi.org/10.1007/s11947-021-02696-x

Pleșoianu, A. M., Tuţulescu, F., & Nour, V. (2020). Postharvest antimicrobial treatments with organic acids to improve the shelf life of fresh blueberries. *Scientific Papers. Series B, Horticulture*, 64(1), 435-442.

Priyadarshi, R., et al. (2024). Advances in strawberry postharvest preservation and packaging: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(4). https://doi.org/10.1111/1541-4337.13417

Rizzo, V. (2025). Sustainable Postharvest Innovations for Fruits and Vegetables: A Comprehensive Review. *Foods*, 14(24), 4334. https://doi.org/10.3390/foods14244334

Rodríguez-Mena, A., et al. (2022). Natural pigments of plant origin: Classification, extraction and application in foods. *Food Chemistry*, 398, 133908. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133908

Samkumar, A., et al. (2022). Flavonoid biosynthesis is differentially altered in detached and attached ripening bilberries in response to spectral light quality. *Frontiers in Plant Science*, 13. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.969934

Santos, J. R., et al. (2023). Application of rosin resin and zinc oxide nanocomposites to chitosan coatings for extending the shelf life of passion fruits. *Sustainable Food Technology*, 2(2), 415. https://doi.org/10.1039/d3fb00189j

Soots, K., & Olt, J. (2017). Non-stationary processing centre for small and medium-sized blueberry farms. A Review. *Agronomy Research*, 15(2), 576-585.

Sortino, G., et al. (2022). Effects of combinational use of controlled atmosphere, cold storage and edible coating applications on shelf life and quality attributes of fresh-cut persimmon fruit. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1). https://doi.org/10.1186/s40538-022-00324-0

Tekin, O., et al. (2025). Effects of postharvest citric, oxalic acid and modified atmosphere packaging applications on fruit quality and biochemical properties in persimmon. *BMC Plant Biology*, 25(1). https://doi.org/10.1186/s12870-025-07368-y

Tóth, A., et al. (2023). Investigation of the effects of bovine collagen peptides and mixed berries on rheological properties and biological activity of egg white-based beverage via central composite design. *Frontiers in Nutrition*, 9. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1011553

Ünal, S., SABIR, F. K., & Sabır, A. (2023). Some physicochemical and bioactive features of organically grown blackberry fruits (Rubus fructicosus L.) as influenced by postharvest UV-C and chitosan treatments. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 47(6), 907. https://doi.org/10.55730/1300-011x.3136

Valenzuela, J. L. (2023). Advances in Postharvest Preservation and Quality of Fruits and Vegetables. *Foods*, 12(9), 1830. https://doi.org/10.3390/foods12091830

Vaneková, Z., & Rollinger, J. M. (2022). Bilberries: Curative and Miraculous – A Review on Bioactive Constituents and Clinical Research. *Frontiers in Pharmacology*, 13. https://doi.org/10.3389/fphar.2022.909914

Wu, Y., et al. (2023). Known and potential health benefits and mechanisms of blueberry anthocyanins: A review. *Food Bioscience*, 55, 103050. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103050

Yücetepe, M., et al. (2024). Unveiling the multifaceted world of anthocyanins: Biosynthesis pathway, natural sources, extraction methods, copigmentation, encapsulation techniques, and future food applications. *Food Research International*, 187, 114437. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114437

Zhang, L., et al. (2023). Effects of four drying methods on the quality, antioxidant activity and anthocyanin components of blueberry pomace. *Food Production Processing and Nutrition*, 5(1). https://doi.org/10.1186/s43014-023-00150-3

Zhou, Y., et al. (2025). Storage stability of berry mueslis with special focus on phenolic compounds. *LWT*, 228, 118119. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.118119