BAHÇE BİTKİLERİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM:

BİTKİ SAĞLIĞI, BİYOAKTİF BİLEŞENLER VE HASAT SONRASI UYGULAMALAR

EDİTÖR
PROF. DR. AHMET TURHAN



BİDGE Yayınları

BİDGE Yayınları

Bahçe Bitkilerinde Sürdürülebilir Üretim: Bitki Sağlığı, Biyoaktif Bileşenler ve Hasat Sonrası Uygulamalar

Editör: PROF. DR. AHMET TURHAN

ISBN: 978-625-5057-81-5

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-10-25
BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

İÇİNDEKİLER

CEVİZ YETİŞTİRİCİLİĞİNDE İÇ KURDU VE ENTEGRE MÜCADELE 1

YILMAZ SESLİ

SÜS BİTKİLERİNİN YENİLEBİLİR ÇİÇEKLERİ: BOTANİK ÇEŞİTLİLİK, BESİNSEL ÖZELLİKLER, GIDA GÜVENLİĞİ, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE EKONOMİK POTANSİYEL 12

ÖMER ÖZTAŞ, FİKRET YAŞAR, ÖZLEM ÜZAL

BİTKİ–BÖCEK ETKİLEŞİMİNDE ALLELOKİMYASALLARIN ROLÜ 46

MİNE DEMİR, EMİNE SEMA ÇETİN

HASAT SONRASI MEYVE VE SEBZE MUHAFAZASINDA GAZ KLOR DİOKSİT UYGULAMALARI 72

ERDİNÇ BAL

BÖLÜM 1

CEVİZ YETİŞTİRİCİLİĞİNDE İÇ KURDU VE ENTEGRE MÜCADELE

YILMAZ SESLİ[1]

Giriş

Ceviz (*Juglans regia* L.) yetiştiriciliğinde ekonomik başarı, meyve veriminin yanında yenilebilir iç kısmın korunmasına bağlıdır. Kabuklu ürünün dış görünümü kabul edilebilir olsa bile, içteki böcek zararı ticari değeri düşürebilir. Bu nedenle bitki koruma programı, yalnızca ağaçların genel gelişimini değil, hasat edilen ürünün iç kalitesini de dikkate almalıdır. İç kurdu zararı, meyve gelişimi ve zararlının faaliyet döneminin birlikte izlenmesini gerektiren bir üretim sorunudur.

Elma iç kurdu *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae), cevizde de zarar yapan önemli bir meyve zararlısıdır. Aynı türün farklı konukçularda bulunması, elma için geliştirilmiş her uygulamanın cevizde aynı biçimde kullanılabileceği anlamına gelmez. Ağacın taç yapısı, meyvenin gelişimi, bahçe büyüklüğü ve çevredeki konukçular yönetim koşullarını değiştirmektedir. Nitekim Türkiye ve Bulgaristan'daki ceviz araştırmaları, çiftleşmeyi

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi,Bitkisel ve Hayvansal Üretim, Orcid: 0000-0002-3150-2180

engellemenin uygulanabilirliğini gösterirken sonuçların bahçe koşullarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini de ortaya koymaktadır (Öztürk ve Hazır, 2020; Palagacheva vd., 2021).

Bu bölümün amacı, cevizde iç kurdu yönetimini güncel bilimsel kanıtlar üzerinden açıklamak ve üretim koşullarına uyarlanabilecek bir karar çerçevesi sunmaktır. Metin, yeni bir saha denemesinin sonuçlarını bildirmeyen anlatısal bir derlemedir. Kaynaklarda doğrudan gözlenen sonuçlar ile bu sonuçlardan geliştirilen uygulama önerileri birbirinden ayrılmıştır. Evrensel zarar oranı, sabit ilaçlama takvimi veya bütün bahçeler için geçerli tek bir eşik önerilmemiştir.

1. Zararlının Biyolojisi ve Cevizle İlişkisi

C. pomonella tam başkalaşım geçirmekte; yumurta, larva, pupa ve ergin dönemlerinden oluşan bir yaşam döngüsüne sahip bulunmaktadır. Meyve zararını larvalar oluşturur (Şekil 1). Yumurtadan çıkan larvanın meyveye ulaşması ve iç dokulara girmesi, koruyucu müdahalelerin zamanlaması açısından kritik bir süreçtir. Meyveye girişten sonraki larvaya ulaşmak daha güç olduğundan, ergin uçuşunu izlemek tek başına yeterli değildir; yumurta açılımı ve meyvenin duyarlı dönemi de değerlendirilmelidir.

Yıllık döl sayısı ve uçuş dönemleri sıcaklık, konum ve sezon koşullarıyla değişmektedir. Silva ve Bento (2023), Portekiz'deki bir ceviz bahçesinde iki belirgin uçuş dönemi bildirmiştir. Bu sonuç, başka bölgelerde aynı tarihlerde aynı döl yapısının görüleceği biçiminde yorumlanmamalıdır. Bölgesel uçuş kayıtları, takvimden bağımsız bir değerlendirme için gereklidir. Bahçenin geçmiş yıllardaki zarar kayıtları da mevcut sezonun gözlemleriyle birlikte ele alınmalıdır.

Şekil 1 C. pomonella ve cevizdeki zararı



Ceviz ile zararlı arasındaki ilişki yalnızca fiziksel meyve özelliklerinden oluşmamaktadır. Li vd. (2024), ceviz organlarından yayılan uçucu bileşiklerin zararlının konukçu bulma davranışı ile ilişkisini incelemiştir. Araştırmada ilk döl yumurtalarının %90,3'ünün meyvelerin yakınında bulunduğu bildirilmiştir. Bu gözlem, meyve çevresindeki organların örneklemeye dahil edilmesini desteklemektedir. Bununla birlikte, deneysel davranış yanıtlarından doğrudan ticari bir çekici veya uzaklaştırıcı ürünün etkinliği sonucuna geçilmemelidir; bunun için ayrıca saha doğrulaması gereklidir.

2. Zarar Biçimi ve Ekonomik Değerlendirme

Larvanın meyveye girişi, beslenme galerileri ve iç dokulardaki tüketim, cevizde kalite kaybına yol açabilir (Şekil 1). Dış yüzeyde giriş izi veya dışkı bulunması tanıya yardımcıdır; ancak yalnızca dış belirti üzerinden kesin tür teşhisi yapılması uygun

değildir. Şüpheli meyveler açılarak iç zararı ve varsa larva birlikte incelenmelidir. Özellikle farklı meyve zararlılarının bulunduğu bahçelerde örneklerin uzman tarafından teşhis edilmesi, mücadele programının doğru zararlıya yöneltilmesini sağlar.

Zararın ekonomik karşılığı, yalnızca kurtlu meyve yüzdesiyle açıklanamaz. Toplam üretim, iç kalite sınıfı, ayıklama maliyeti, pazarlama biçimi ve müdahale giderleri birlikte değerlendirilmelidir. Ayrıca ağaç üzerinde kalan meyvelerle yere dökülen meyvelerin ayrı kaydedilmesi, örnekleme yanlılığını azaltır. Hasat örneğinin yalnızca görünüşü sağlam ürünlerden seçilmesi, gerçek bahçe zararını olduğundan düşük gösterebilir. Bu nedenle örnekleme yöntemi sezon başlamadan belirlenmelidir.

Silva ve Bento (2023), çiftleşmeyi engelleme uygulanan parselde iç zarar oranını %7, karşılaştırma parselinde %11 olarak bildirmiş; bu farkın istatistiksel olarak anlamlı olmadığını belirtmişlerdir. Tuzak yakalamalarının güçlü biçimde baskılanmasına rağmen zarar sonuçlarının daha sınırlı olması, biyoteknik uygulamaların değerlendirilmesinde kullanılan göstergenin önemini ortaya koymaktadır. Bu sonuçlardan bütün ceviz bahçeleri için tek bir ekonomik zarar eşiği çıkarılamaz.

3. İzleme ve Müdahale Zamanının Belirlenmesi

İzleme programı, ergin uçuşunun başlangıcını ve sezon içindeki değişimini belirlemek amacıyla kurulmalıdır. Feromon tuzaklarında yakalanan birey sayısı; tuzağın konumu, çekici tipi, bakım durumu ve çevredeki feromon kaynaklarıyla birlikte yorumlanmalıdır. Sayım aralığı, kapsül değişimi ve yapışkan yüzey yenilemesi kayıt altına alınmalı; böylece haftalar arasında karşılaştırılabilir veri elde edilmelidir. Tuzak kaydı, doğrudan meyve örneklemesinin yerine geçmemelidir.

Çiftleşmeyi engelleme uygulanan bahçelerde klasik eşey feromonu tuzaklarının düşük yakalama göstermesi beklenebilir. Bu

durum, popülasyonun tamamen ortadan kalktığını kanıtlamaz. Knight vd. (2025) dişilerin çiftleşme durumunun değerlendirilmesini ve her iki eşeyi çekebilen yeni çekici karışımların kullanımını tartışmıştır. Dişi yakalama ve diseksiyon, araştırma düzeyinde yöntemin gerçek etkisini anlamayı güçlendirmektedir. Üretici düzeyinde ise düzenli meyve kontrolü, zarar odağı haritalaması ve geçmiş sezon kayıtları temel tamamlayıcı göstergelerdir.

Sıcaklık verileriyle oluşturulan fenoloji tahminleri, uçuş ve yumurta açılımı arasındaki ilişkiyi değerlendirmeye yardımcı olabilir. Bununla birlikte, modelin alt gelişme eşiği, başlangıç noktası ve hesaplama yöntemi belirtilmeden yalnızca derece-gün toplamı vermek yeterli değildir. Başka bir bölgedeki modelin doğrudan aktarılması yerine yerel tuzak ve meyve kayıtlarıyla doğrulanması gerekir. Whitfield ve Fountain (2024), değişen iklim koşullarının tahmine dayalı yönetim bakımından oluşturduğu güçlükleri vurgulamaktadır.

Bu bölüm kapsamında önerilen kayıt düzeninde tarih, tuzak kodu, yakalanan ergin sayısı, çekici değişimi, örneklenen meyve sayısı ve zarar gören meyve sayısı birlikte tutulmalıdır. Meyve zararı, zarar gören meyve sayısının incelenen toplam meyve sayısına bölünüp 100 ile çarpılmasıyla hesaplanabilir. Farklı örneklem büyüklükleri bulunan tarihlerde yalnızca zarar gören meyve sayısının karşılaştırılması yanıltıcıdır. Kayıtlara uygulama tarihi ve hava koşullarının eklenmesi, sezon sonu yorumunu kolaylaştırır.

4. Entegre Mücadele Yaklaşımı

Entegre mücadelede amaç, zararlı baskısını kabul edilebilir düzeyde tutarken gereksiz müdahaleleri azaltmaktır. Bahçenin önceki zarar düzeyi, çevredeki bulaşma kaynakları ve mevcut izleme sonuçları bir arada değerlendirilmelidir. Yalnızca bir yönteme bağlı kalmak yerine kültürel önlemler, biyoteknik araçlar ve gerektiğinde uygun biyolojik ya da kimyasal müdahaleler birbirini tamamlayacak

biçimde planlanmalıdır. Programın başarısı, sezon sonunda ürün kalitesine ilişkin ölçümlerle sınanmalıdır.

4.1. Kültürel Önlemler ve Bahçe Hijyeni

Zarar görmüş ve yere dökülmüş meyvelerin izlenmesi, bahçe içindeki bulaşma odaklarının anlaşılmasına yardımcı olur. Bu bölüm için önerilen uygulama yaklaşımı, bulaşık meyvelerin bahçede kontrolsüz biçimde birikmesini önlemek ve hasat artıklarıyla ilişkili riskleri azaltmaktır. Ancak bahçe hijyeninin tek başına yeterli kontrol sağlayacağı varsayılmamalıdır. Yapılan işlerin tarihi ve kapsamı kaydedilerek izleyen sezonun zarar düzeyiyle ilişkilendirilmesi yararlıdır.

Komşu bahçeler ve bakımsız konukçu ağaçlar da değerlendirmeye dahil edilmelidir. Yalnızca işletme sınırları içerisinde yürütülen bir program, çevreden gelen çiftleşmiş dişiler nedeniyle sınırlanabilir. Bu nedenle üreticiler arasında uçuş başlangıcı ve zarar odaklarına ilişkin bilgi paylaşımı önerilebilir. Alan ölçeğinde planlama, bireysel bahçe uygulamasının yerini alan değil, onun etkinliğini destekleyen bir yönetim düzenidir (Whitfield ve Fountain, 2024).

4.2. Çiftleşmeyi Engelleme

Çiftleşmeyi engelleme, sentetik eşey feromonuyla erginlerin eş bulma iletişimini aksatmayı amaçlayan biyoteknik bir yöntemdir. Uygulamanın tasarımında ilk uçuşun zamanı, ağaç yüksekliği, taç yapısı ve kenar etkisi değerlendirilmelidir. Farklı yayıcıların salım özellikleri değişebildiği için bir araştırmadaki yayıcı sayısı, başka bir ürün için doğrudan uygulama dozu olarak kullanılmamalıdır. Yerleştirme ve yenileme işlemleri kullanılan sistemin teknik özelliklerine göre planlanmalıdır.

Öztürk ve Hazır (2020), Kahramanmaraş ceviz bahçelerinde yürüttükleri çalışmada çiftleşmeyi engelleme parseli ile ilaçsız

karşılaştırma bahçesinde meyve kurtlanmasını iki yılda sırasıyla %5,1–%21,3 ve %4,8–%20,1 olarak bildirmiştir. Bu sonuçlar, yöntemin ceviz koşullarındaki yararını desteklemektedir. Bununla birlikte, uygulama sonrası kalan zararın tamamen ortadan kalkmaması, özellikle başlangıç baskısının ve çevresel bulaşmanın ayrıca yönetilmesi gerektiğini düşündürmektedir.

Palagacheva vd. (2021), Bulgaristan'daki iki yıllık çalışmada feromon ve kairomon içeren yayıcıların kullanıldığı organik ceviz bahçesinde son değerlendirmede %0,6 ve %0,5 zarar; konvansiyonel karşılaştırma bahçesinde ise %17,2 ve %18,1 zarar bildirmiştir. Bahçelerin farklı yerlerde ve farklı yönetim koşullarında bulunması, gözlenen farkın yalnızca yayıcı etkisine bağlanmasını sınırlar. Çalışma, yaklaşımın potansiyeline ilişkin saha kanıtı olarak değerlendirilmeli; kesin ve evrensel bir etkinlik oranı olarak sunulmamalıdır.

4.3. Biyolojik Araçlar ve Seçici Müdahale

Cydia pomonella granulovirüsü (CpGV), zararlı yönetiminde kullanılan biyolojik araçlardan biridir. Ancak biyolojik kökenli bir etmenin kullanılması, direnç gelişme olasılığını ortadan kaldırmaz. Ju vd. (2021), C. pomonella'da kontrol araçlarına karşı direncin yönetim açısından önemini ortaya koymuştur. Biyolojik ürünler de hedef döneme uygun zamanlama, doğru uygulama ve etkinlik takibi gerektirir. Bir üründe başarısızlık gözlenmesi durumunda neden yalnızca direnç olarak değerlendirilmemeli; uygulama ve çevre koşulları da incelenmelidir.

Kimyasal müdahale gerektiğinde karar, izleme sonuçları ve hedef biyolojik dönem üzerinden verilmelidir. Sürekli aynı etki mekanizmasına başvurulması yerine direnç yönetimi dikkate alınmalıdır. Bu bölüm belirli bir ticari ürün veya doz önermemektedir. Uygulamada ceviz ve hedef zararlı için geçerli ruhsat, etiket dozu, uygulama sayısı ve hasat öncesi süre esas

alınmalıdır. Böylece literatürdeki deneysel etkinlikle üretimdeki yasal kullanım birbirinden ayrılmış olur.

Mücadele maliyetinin değerlendirilmesinde yalnızca satın alınan ürünün bedeli kullanılmamalıdır. Yayıcı yerleştirme işçiliği, izleme, ekipman ve ürün ayıklama giderleri de kaydedilmelidir. Bu bölüm için önerilen ekonomik karşılaştırma, toplam koruma maliyetinin pazarlanabilir ürün miktarıyla birlikte ele alınmasıdır. Daha az uygulama yapılması tek başına ekonomik üstünlük göstermediği gibi, daha çok uygulama da mutlaka daha iyi koruma anlamına gelmez.

5. Güncel Araştırmalar ve Türkiye İçin Öncelikler

Konukçu uçucuların davranış üzerindeki etkisi, iç kurdu yönetiminde yeni araçların geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Li vd. (2024) tarafından ortaya konan ceviz uçucularına ilişkin bulgular, özellikle dişilere yönelik çekici ve uzaklaştırıcı sistemlerin araştırılması bakımından önemlidir. Ancak laboratuvar davranış sonuçlarının farklı çeşit, iklim ve bahçe yapılarında tekrarlanması gerekmektedir. Araştırma aşamasındaki bir bileşiğin üretimde kullanılabilecek ürün olarak tanımlanması, saha etkinliği ve ilgili değerlendirmeler tamamlanmadan uygun değildir.

Cao vd. (2024), iç kurdu beslenmesi sonrasında ceviz yeşil kabuğunda savunma hormonları ve gen ifade ağlarıyla ilişkili değişimleri incelemiştir. Bu çalışma, bitkinin zarar karşısında etkin bir biyolojik yanıt oluşturduğunu göstermektedir. Bulgular, dayanıklılık araştırmaları açısından değerlidir; ancak bir çeşidin ekonomik düzeyde dayanıklı olduğunu kanıtlamaz. Islah çalışmalarında moleküler göstergelerin gerçek meyve zararı, larva gelişimi ve ürün kalitesiyle birlikte sınanması gerekir.

Türkiye'de araştırma önceliklerinden biri, farklı ceviz yetiştirme bölgelerinde ortak bir izleme ve meyve örnekleme protokolü geliştirilmesidir. Bu bölümde önerilen yaklaşım, farklı

çeşit ve rakımlarda birden fazla sezonu kapsayan çalışmaların yürütülmesidir. Bahçe büyüklüğü, taç hacmi, çevredeki konukçular ve önceki zarar düzeyi raporlanmalıdır. Böylece bir bölgede elde edilen sonucun başka bir bölgeye hangi koşullarda aktarılabileceği daha açık biçimde değerlendirilebilir.

Denemelerde yöntem etkisiyle bahçe etkisinin ayrılması ayrıca önemlidir. Tek uygulama bahçesi ile tek karşılaştırma bahçesi arasındaki fark, güçlü bir gözlem sağlayabilir; ancak bağımsız bahçe tekerrürü bulunmadığında genellenebilirlik sınırlıdır. Gelecekteki çalışmalar için önerilen tasarım, mümkün olduğunda birden fazla bağımsız bahçe ve sezon kullanılmasıdır. Tuzaklar veya aynı bahçeden alınan çok sayıda meyve, kendiliğinden bağımsız bahçe tekerrürü oluşturmaz. Ekonomik analiz ile hasat kalitesi de biyolojik etkinlik ölçümlerine eklenmelidir.

6. Sonuç

Cevizde iç kurdu yönetimi, larvanın meyve içerisinde beslenmesi nedeniyle doğru zamanlama ve düzenli izleme gerektirir. 2020 ve sonrasında yayımlanan ceviz araştırmaları, çiftleşmeyi engellemenin önemli bir seçenek olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte çalışma koşulları ve değerlendirme ölçütleri farklı olduğundan tek bir etkinlik yüzdesi üzerinden genel öneri geliştirmek uygun değildir. Özellikle tuzak baskılanması ile gerçek ürün koruması ayrı değerlendirilmelidir.

Üretim açısından önerilen temel yaklaşım, bahçeye özgü risk değerlendirmesi yapılması, uçuş kayıtlarının meyve örneklemesiyle desteklenmesi ve müdahalelerin birbirini tamamlayacak biçimde planlanmasıdır. Bilimsel açıdan ise yerel fenoloji, dişi davranışı, dayanıklılık ve bağımsız bahçe tekerrürlü uygulama denemeleri öne çıkmaktadır. Nihai başarı ölçütü, yalnızca zararlı sayısının azalması değil, pazarlanabilir ceviz kalitesinin ekonomik ve sürdürülebilir biçimde korunmasıdır.

Kaynakça

Geçerli belCao, X., Ye, X., & Sattar, A. (2024). Transcriptomic and coexpression network analyses revealed the regulatory mechanism of *Cydia pomonella* infestation on the synthesis of phytohormones in walnut husks. PeerJ, 12, e18130. https://doi.org/10.7717/peerj.18130

Ju, D., Mota-Sanchez, D., Fuentes-Contreras, E., Zhang, Y.-L., Wang, X.-Q., & Yang, X.-Q. (2021). Insecticide resistance in the *Cydia pomonella* (L): Global status, mechanisms, and research directions. Pesticide Biochemistry and Physiology, 178, 104925. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2021.104925

Knight, A. L., Preti, M., & Basoalto, E. (2025). What can we learn from dissecting tortricid females about the efficacy of mating disruption programs? Insects, 16(3), 248. https://doi.org/10.3390/insects16030248

Li, P., Wei, Y., Chen, G., & Sattar, A. (2024). Perceptual effects of walnut volatiles on the codling moth. Insects, 15(6), 402. https://doi.org/10.3390/insects15060402

Öztürk, N., & Hazır, A. (2020). Efficacy of mating disruption technique against Codling moth [*Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae)] in walnut orchards in Kahramanmaraş. Derim, 37(1), 76–85. https://doi.org/10.16882/derim.2020.622159

Palagacheva, N., Kutinkova, H., & Dzhuvinov, V. (2021). Effect of mating disruption on the pheromone trap catches of codling moth (*Cydia pomonella* L.) and fruit damage in walnut (*Juglans regia* L.) orchards under organic farming. Journal of Biopesticides, 14(1), 79–82. https://jbiopestic.com/journals/vol_14_1_79-82.pdf

Silva, L., & Bento, A. (2023). O bichado, *Cydia pomonella* L. em nogueira: Bioecologia e avaliação de estratégias de proteção

contra a praga. Revista de Ciências Agrárias, 46(2), 154–160. https://doi.org/10.19084/rca.31326

Whitfield, E. C., & Fountain, M. T. (2024). Future semiochemical control of codling moth, *Cydia pomonella*. Frontiers in Horticulture, 3, 1446806. https://doi.org/10.3389/fhort.2024.1446806gede kaynak yok.

BÖLÜM 2

SÜS BİTKİLERİNİN YENİLEBİLİR ÇİÇEKLERİ: BOTANİK ÇEŞİTLİLİK, BESİNSEL ÖZELLİKLER, GIDA GÜVENLİĞİ, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE EKONOMİK POTANSİYEL

Ömer ÖZTAŞ[1]
Fikret YAŞAR[2]
Özlem ÜZAL[3]

[1] Yük. Zir. Müh. Ömer ÖZTAŞ
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bahçe Bitkileri Anabilim Dalı, Orcid ID:0000-0001-9034-5675
[2] Prof. Dr. Fikret YAŞAR
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Sebze Yetiştiriciliği ve Islahı Anabilim Dalı, Orcid ID: 0000-0001-6598-8580
[3] Prof. Dr. Özlem ÜZAL
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Sebze Yetiştiriciliği ve Islahı Anabilim Dalı, Orcid ID: 0000-0002-1538-820X

GİRİŞ

Yenilebilir çiçekler, insan beslenmesinde tüketilen, toksik bileşik içermeyen ve sağlık açısından yarar sağlayabilen çiçekler olarak tanımlanmaktadır (Lu ve ark., 2016). Süs bitkilerinin yenilebilir çiçekleri ise gıdaların görünümünü, lezzetini ve estetik niteliğini zenginleştirmek amacıyla kullanılmakta; içerdiği biyoaktif bileşenler ve nutrasötik potansiyeli nedeniyle de önem taşımaktadır (Mlcek ve Rop, 2011). Kavramın kapsamını açıklığa kavuşturmak için süs bitkileri, yenilebilir bitkiler ve yenilebilir süs bitkileri arasındaki ayrımın ortaya konması gerekir. Süs bitkileri öncelikle görsel ve kokusal özellikleri nedeniyle yetiştirilir ve ekonomik değerleri büyük ölçüde estetik niteliklerine dayanır. Yenilebilir bitkiler ise toksik metabolit taşımayan ve sindirilebilir besin öğeleri sağlayan türleri kapsar (Fernandes ve ark., 2017). Yenilebilir süs bitkileri, bu iki grubun kesişiminde yer alan; çiçekçilikte ya da peyzaj düzenlemelerinde estetik amaçlarla yetiştirilmekle birlikte bazı organları gıda hazırlamada da kullanılabilen çok amaçlı taksonlardır (Kumari ve Bhargava, 2021).

Literatürde yenilebilir çiçekler, tüketildiği bilimsel çalışmalarda veya etnobotanik mutfak kültürlerinde belgelenmiş, toksikolojik açıdan güvenli ve beslenme yoluyla sağlık yararı sağlayabilen çiçekler olarak tanımlanmaktadır (Lu ve ark., 2016; Takahashi ve ark., 2020). Dünya genelinde 97 familya ve 100 cinse yayılan yaklaşık 180 türün yenilebilir çiçek niteliği taşıdığı bildirilmiştir (Lu ve ark., 2016). Bu türlerin önemli bir bölümü aynı zamanda süs bitkisi olarak yetiştirilmektedir (Pires ve ark., 2021). Yenilebilir çiçekler gıda taksonomisi içinde farklı biçimlerde sınıflandırılabilse de karnabahar, brokoli ve enginar, botanik açıdan çiçek tomurcuğu ya da çiçek durumu olmalarına karşın pazarlama ve tüketim bağlamında geleneksel sebzeler arasında değerlendirilir (Chitrakar ve ark., 2019).

Yenilebilir çiçeklere yönelik ilginin artmasında, tüketicilerin doğal, katkısız ve sağlığı koruyucu ürünlere yönelmesi etkili olmuştur. Sentetik bileşenlerin olası olumsuz etkilerine ilişkin kaygılar da bu eğilimi güçlendirmiştir (Chen ve Wei, 2017; Pires ve ark., 2019; Pires ve ark., 2021). Diğer yandan, kesme çiçek ve süs bitkisi üretiminde yalnızca görsel standartları karşılamadığı gerekçesiyle elden çıkarılan bitkisel biyokütle, besinsel ve işlevsel değeri dikkate alınmaksızın atılabilmektedir. Bu materyalin gıda zincirine kazandırılması, kaynakların daha verimli kullanılmasına katkı sağlayabilecek sürdürülebilir bir seçenek sunmaktadır (Takahashi ve ark., 2020). Çiçeklerin yalnızca tabak süslemesi olarak değil, besin öğeleri ve sekonder metabolitler bakımından zengin işlevsel gıdalar olarak ele alınmaya başlanması da bu dönüşümün bir parçasıdır (Fakhri ve ark., 2021; Janarny ve ark., 2021).

Çiçek tüketimi, günümüzde ortaya çıkmış bir gastronomi eğilimi değildir, kökleri binlerce yıl öncesine uzanan bir beslenme geleneğine dayanmaktadır (Mlcek ve Rop, 2011; Pires ve ark., 2019). Yazılı kaynaklar, Çin'de çiçeklerin gıda, baharat ve geleneksel bitkisel tıp amacıyla kullanımının M.Ö. 3000'lere kadar uzandığını göstermektedir (Lu ve ark., 2016; Janarny ve ark., 2021). Benzer döneme ait kaynaklarda bahçe ve çiçek kültürüne ilişkin kayıtlara rastlanırken safran, Sümer bitki kayıtlarında (M.Ö. 2500) ve Asur tabletlerinde de anılmaktadır (Kumari ve Bhargava, 2021; Fakhri ve ark., 2021).

Akdeniz havzasında antik Yunan ve Roma mutfaklarında menekşe (*Viola*) ve gül (*Rosa*) taç yaprakları omlet ve pürelerde, lavanta (*Lavandula*) ise soslarda kullanılmıştır. Menekşeler 17. yüzyılda şeker ve şuruplara renk vermek amacıyla da değerlendirilmiştir (Mlcek ve Rop, 2011; Janarny ve ark., 2021). Orta çağ Fransası'nda aynısefa (*Calendula officinalis*) taç yaprakları, "fakir safranı" adıyla salata, çorba ve peynirlerde

renklendirici olarak kullanılmıştır (Chitrakar ve ark., 2019). Orta Avrupa'da mürver (*Sambucus nigra*) çiçekleri hamura batırılarak kızartılmış; karahindiba (*Taraxacum officinale*) çiçeklerinden ise şurup ve balın yerini alan ürünler hazırlanmıştır (Mlcek ve Rop, 2011; Fernandes ve ark., 2017). İber Yarımadası'nda yabani enginar (*Cynara cardunculus*) çiçekleri peynir üretiminde sütü pıhtılaştırıcı olarak kullanılmıştır (Pires ve ark., 2019). Viktorya dönemi İngiltere'sinde yumurta akı ve toz şekerle kristalize edilen menekşe ve leylak (*Syringa vulgaris*) taç yaprakları, saray pastacılığında prestijli bir süsleme unsuru hâline gelmiştir (Janarny ve ark., 2021).

Asya'da kasımpatı (*Chrysanthemum*) çiçeklerinden şarap üretilmiş, tatlı *osmanthus* ve *sofora* çiçekleri unlu mamullerde kullanılmıştır. Yunan'da hazırlanan taze çiçekli kek ise günümüzde de geleneksel gastronomi mirasının bir parçası olmayı sürdürmektedir (Lu ve ark., 2016). Hindistan'da gül (*Rosa*) taç yaprakları likörlerde ve çeşitli yemeklerde değerlendirilirken Sri Lanka'da *Sesbania bispinosa* çiçekleri hindistan cevizi sosuyla hazırlanan yemeklerde kullanılmaktadır (Pires ve ark., 2019). Latin Amerika'da yıldız çiçeği (*dahlia*) ve kabak çiçekleri Aztek ve İnka kültürlerinin geleneksel tariflerinde yer almış (Kumari ve Bhargava, 2021); Meksika'da yıldız çiçeği (*dahlia*) çiçeklerinin çorbalarda tüketimi günümüzde de sürmüştür (Pires ve ark., 2017). 21. yüzyılda moleküler gastronominin gelişmesi, şeflerin tabaklarda görsel ve dokusal karşıtlık arayışı ve tüketicilerin sentetik katkı maddelerinden uzaklaşma eğilimi, çiçek tüketimini yeniden küresel ölçekte görünür kılmıştır (Rodrigues ve ark., 2017; Pires ve ark., 2018). Taze çiçekler süpermarketlerde şeffaf ambalajlar içinde satışa sunulurken çiçek içeren yoğurt, dondurma, işlevsel içecek ve fırıncılık ürünleri de ilgi görmektedir (Fernandes ve ark., 2020a; Janarny ve ark., 2021). Tüketicilerin bu ürünlere yönelik tutumları merak, aroma ve sağlık bilinci gibi etkenlerle şekillenmekte; çiçek

içeren gıdalar çoğunlukla sağlık yararıyla ilişkilendirilmektedir (Chen ve Wei, 2017; Pires ve ark., 2021).

Bu derlemenin amacı, yenilebilir çiçekleriyle öne çıkan süs bitkilerinin botanik çeşitliliğini ve başlıca türlerini ortaya koymak; besinsel değerlerini, biyoaktif bileşenlerini ve sağlık üzerindeki olası etkilerini mevcut literatür ışığında değerlendirmektir. Ayrıca bu bitkilerin gıda güvenliği, sürdürülebilirlik ve ekonomik değer bakımından sunduğu olanaklar ile karşılaşılan sınırlılıklar da incelenmektedir.

2. BOTANİK ÇEŞİTLİLİK VE BAŞLICA YENİLEBİLİR ÇİÇEK TÜRLERİ

Yenilebilir süs bitkilerinde gıda amacıyla kullanılan organ, türün anatomik özelliklerine ve sekonder metabolitlerin bitki bünyesindeki dağılımına bağlı olarak değişmektedir (Fernandes ve ark., 2017; Pires ve ark., 2019). Hercai menekşe (Viola × wittrockiana), peygamber çiçeği (*Centaurea cyanus*), kadife çiçeği (*Tagetes erecta*, T. patula), gül (*Rosa* spp.), lale (*Tulipa* spp.) ve kasımpatı (*Chrysanthemum* spp.) çiçekleri ya da bu çiçeklerden ayrıştırılan taç yapraklar doğrudan tüketilebilmektedir (Mlcek ve Rop, 2011; Pires ve ark., 2017). Lale ve gülde yalnızca taç yapraklar kullanılırken koyungözü (*Bellis perennis*) ve latin çiçeğinin (*Tropaeolum majus*) tomurcukları da gıda olarak değerlendirilmektedir. Gül taç yapraklarının acı tada sahip beyaz taban kısmının tüketimden önce ayrılması önerilmektedir (Mlcek ve Rop, 2011). Kapari (*Capparis spinosa*) ile latin çiçeğinin (*Tropaeolum majus*) tomurcukları ise çoğunlukla salamura edilerek kullanılmaktadır (Fernandes ve ark., 2017).

Yenilebilir süs bitkilerinin yaprakları da mutfakta farklı amaçlarla değerlendirilmektedir. Latin çiçeği yaprakları, içerdikleri hardal yağı glikozitlerinin etkisiyle tere ve turpu andıran keskin bir tada sahiptir (Matyjaszczyk ve Śmiechowska, 2019). Salatalık

aromasına sahip hodan (*Borago officinalis*) yaprakları salata ve çorbalara eklenirken (Fernandes ve ark., 2020b), narenciye ve kekik aromalı arı kovanı çiçeği (*Monarda didyma*) yaprakları bergamot çayı hazırlamak için demlenmektedir (Stefaniak ve Grzeszczuk, 2019). Frenk soğanı (*Allium schoenoprasum*), peynir, patates ve yumurta yemeklerinde çeşni olarak kullanılmaktadır (Pires ve ark., 2019). Begonya (*Begonia* spp.) yaprakları yüksek organik asit içerikleri nedeniyle limonumsu ve ekşi bir tada sahipken (Rop ve ark., 2012; Benvenuti ve ark., 2016), sosyete sarımsağı (*Tulbaghia violacea*) yaprakları sarımsak ve tuz yerine değerlendirilebilmektedir (Marchioni ve ark., 2024).

Meyve ve tohumlar da bazı türlerde gıda olarak kullanılmaktadır. Latin çiçeğinin sertleşmemiş yeşil tohumları sirkeyle fermente edilerek kapariye benzer turşu ürünlerine dönüştürülürken Malakka zencefili (*Alpinia malaccensis*) tohumları yerel sos ve çeşnilerin hazırlanmasında kullanılmaktadır (Kantadoung ve ark., 2018a; Matyjaszczyk ve Śmiechowska, 2019). Yer altı organları bakımından ise yer elması (*Helianthus tuberosus*) yumruları, *Tulbaghia* cinsine ait türlerin soğanları ve *Alpinia malaccensis* rizomları gıda hammaddesi olarak anılmaktadır (Fernandes ve ark., 2017; Marchioni ve ark., 2024).

Yaşam döngüsü özelliklerine göre yenilebilir süs bitkileri tek yıllık, çok yıllık ve odunsu türler biçiminde gruplandırılmaktadır (Lu ve ark., 2016; Stefaniak ve Grzeszczuk, 2019). Tek yıllık türler arasında hodan, aynısefa, kadife çiçeği, Çin karanfili, maymun çiçeği ve peygamber çiçeği yer almaktadır (Benvenuti ve ark., 2016; Pires ve ark., 2017; Stefaniak ve Grzeszczuk, 2019). Rop ve ark. (2012) bu gruba mine çiçeğini begonya ve kasımpatı türlerini de dâhil etmiştir.

Çok yıllık türler, kış dönemini kök, soğan, rizom ya da yumru sistemleri aracılığıyla geçirmektedir. Aslanağzı, yumrulu begonya, gün zambağı, arı kovanı çiçeği, hüsnüyusuf ve sosyete sarımsağı bu

grupta sayılan türler arasındadır (Benvenuti ve ark., 2016; Marchioni ve ark., 2024). Buna karşılık, Rop ve ark. (2012), şebboy, fuksiya, gül, latin çiçeği çok yıllık türler arasında sınıflandırmıştır. Aslanağzının kaynaklarda farklı yaşam döngüsü gruplarında yer alması, bu türlerin yetiştirme koşullarına bağlı olarak farklı yaşam döngüsü özellikleri gösterebileceğine işaret etmektedir.

Odunsu yenilebilir süs bitkileri arasında Japon soforası, erguvan, gülibrişim, orkide, leylak, mürver, yalancı akasya, alev ağacı, moringa, ormangülü ve gül bulunmaktadır (Mlcek ve Rop, 2011; Lu ve ark., 2016; Fernandes ve ark., 2017; Kumari ve Bhargava, 2021).

Yenilebilir süs bitkilerinin çeşitliliği bölgesel mutfak gelenekleri ve etnobotanik uygulamalar çerçevesinde de belirginleşmektedir. Hint-Himalaya bölgesinde ormangülü taç yapraklarından şurup ve nane hazırlanmakta; orkide ağacı tomurcukları körilerde pişirilmekte, moringa çiçekleri ise geleneksel bir sebze olarak tüketilmektedir (Kumari ve Bhargava, 2021; Purohit ve ark., 2021). Assam'da gece açan yasemin (*Nyctanthes arbor-tristis*), moringa (*Moringa oleifera*), kabak (*Cucurbita* spp). ve acı çiçek (*Phlogacanthus thyrsiflorus*) çiçeklerinin tüketildiği bildirilmektedir (Chetia ve ark., 2024). Güneydoğu Asya'da Hint sarı salkımı (*Cassia fistula*), Agathi (*Sesbania grandiflora*) ve gece açan yasemin (*Nyctanthes arbor-tristis*) çiçekleri çorba ve köri yemeklerinde pişirilerek kullanılmaktadır (Lu ve ark., 2016; Kantadoung ve ark., 2018a). Tayland'ın kuzeyinde ise Malakka zencefili (*Alpinia malaccensis*), Gardenya (*Gardenia jasminoides*) ve demirhindi (*Tamarindus indica*) dâhil çok sayıda türün çiçekleri tüketilmektedir (Kantadoung ve ark., 2018b).

Brezilya'da Geleneksel Olmayan Yenilebilir Bitkiler kapsamında *Bougainvillea*, *Petrea volubilis*, *Talinum fruticosum* ve *Arachis pintoi* çiçekleri incelenmiştir (Takahashi ve ark., 2020; Santana ve ark., 2026). *Amaranthus hypochondriacus* ve *Spilanthes*

oleracea da yenilebilir çiçek türleri arasında gösterilmektedir (Barros ve ark., 2020). İtalya'da latin çiçeği ve hercai menekşe en çok tercih edilen türler arasında yer almaktadır (Benvenuti ve ark., 2016). Çin'de ise *Prunus* cinsinin çeşitli türleri ile Malus × micromalus gibi Rosaceae familyası üyelerinin çiçekleri çay olarak tüketilmektedir (Xiao ve ark., 2026).

Tablo 1. literatürde besinsel ve duyusal özellikleri en iyi tanımlanmış başlıca türler, tüketilen organları ve mutfak kullanımlarıyla özetlenmiştir.

Tür (Türkçe ad ve bilimsel ad)	Familya	Tüketilen kısım	Tat ve gastronomik kullanım	Kaynak
Hercai menekşe Viola × wittrockiana	Violaceae	Tüm çiçek, tomurcuk	Hafif taze, tatlı-parfümsü; salata, tatlı, içecek, kokteyl süsü	Mlcek ve Rop, 2011; Fernandes ve ark., 2019a
Kadife çiçeği Tagetes erecta, T. patula	Asteraceae	Petal, çiçek	Karanfilimsi, acımsı; salata, çorba, fırın ürünü, sarı-turuncu boya	Rop ve ark., 2012; Pires ve ark., 2018; Chitrakar ve ark., 2019
Latin çiçeği Tropaeolum majus	Tropaeolaceae	Çiçek, yaprak, olgunlaşmamış tohum	Hardalımsı, biberimsi; salata, sandviç, kapari ikamesi	Matyjaszczyk ve Śmiechowska, 2019; Mlcek ve Rop, 2011
Gül Rosa spp. (R. damascena, R. gallica, R. canina)	Rosaceae	Taç yaprak (beyaz taban hariç)	Tatlı, parfümsü; gül suyu, reçel, şurup, çay, yoğurt	Pires ve ark., 2017; Lu ve ark., 2016; Mlcek ve Rop, 2011
Aynısefa Calendula officinalis	Asteraceae	Taç yaprak	Hafif acımsı; salata, çorba, pirinç renklendirme, çay	Pires ve ark., 2017; Chitrakar ve ark., 2019

Tür (Türkçe ad ve bilimsel ad)	Familya	Tüketilen kısım	Tat ve gastronomik kullanım	Kaynak
Peygamber çiçeği Centaurea cyanus	Asteraceae	Taç yaprak	Hafif tatlıdan baharatımsıya; salata süsü, çay, mavi doğal boya	Fernandes ve ark., 2017; Pires ve ark., 2017
Kasımpatı Chrysanthemum spp. (C. morifolium)	Asteraceae	Taç yaprak	Hafiften çok acıya; çay, çorba, geleneksel yemekler	Mlcek ve Rop, 2011; Lu ve ark., 2016
Kerkede Hibiscus sabdariffa	Malvaceae	Çanak yaprak, çiçek	Meyvemsi ekşi; içecek, reçel, jöle, yoğurt marmelatı, boya	Pires ve ark., 2019; Janarny ve ark., 2021
Hodan Borago officinalis	Boraginaceae	Çiçek, yaprak	Salatalık lezzeti; salata, içecek, pasta dekoru	Mlcek ve Rop, 2011; Fernandes ve ark., 2020b
Aslanağzı Antirrhinum majus	Plantaginaceae	Tüm çiçek	Hafif acı; salata, soğuk tabak süslemesi	Rop ve ark., 2012; Benvenuti ve ark., 2016; Stefaniak ve Grzeszczuk, 2019
Çin karanfili, şebboy Dianthus chinensis, D. caryophyllus	Caryophyllaceae	Taç yaprak	Karanfil aromalı veya hafif acı; tatlı kreması, salata	Rop ve ark., 2012; Stefaniak ve Grzeszczuk, 2019
Begonya Begonia × tuberhybrida, B. boliviensis	Begoniaceae	Çiçek, yaprak, sap	Limonumsu ekşi; salata, meze garnitürü	Mlcek ve Rop, 2011; Benvenuti ve ark., 2016
Lavanta Lavandula spp.	Lamiaceae	Çiçek	Hoş kokulu; çay, tatlı	Nowicka ve Wojdyło, 2019
Yasemin Jasminum sambac	Oleaceae	Çiçek	Çay, gıda aroması	Lu ve ark., 2016

Tür (Türkçe ad ve bilimsel ad)	Familya	Tüketilen kısım	Tat ve gastronomik kullanım	Kaynak
Hanımeli Lonicera japonica	Caprifoliaceae	Çiçek	Çay, çorba	Lu ve ark., 2016
Mürver Sambucus nigra	Adoxaceae	Çiçek	İçecek; hamura batırılarak kızartma	Mlcek ve Rop, 2011; Fernandes ve ark., 2017
Fuksiya Fuchsia × hybrida	Onagraceae	Çiçek	Hafif ekşi; çay, tatlı	Rop ve ark., 2012
Koyungözü Bellis perennis	Asteraceae	Tomurcuk, çiçek	Salata, çorba	Mlcek ve Rop, 2011
Lale Tulipa spp.	Liliaceae	Yalnızca taç yapraklar	Tatlı, bezelye benzeri tat; salata, tatlı	Mlcek ve Rop, 2011
Karahindiba Taraxacum officinale	Asteraceae	Çiçek	Salata, içecek; şurup ve bal yerine geçen ürünler	Mlcek ve Rop, 2011; Fernandes ve ark., 2017
Menekşe Viola odorata	Violaceae	Çiçek	Salata, tatlı, içecek; şekerle kristalize petal	Mlcek ve Rop, 2011; Janarny ve ark., 2021
Yalancı akasya Robinia pseudoacacia	Fabaceae	Çiçek	Likör, reçel, pankek	Mlcek ve Rop, 2011
Mine çiçeği Impatiens walleriana	Balsaminaceae	Çiçek	Tatlımsı; salata	Rop ve ark., 2012
Ebegümeci Malva sylvestris	Malvaceae	Çiçek	Salata, çay	Loizzo ve ark., 2016
Şakayık Paeonia spp.	Paeoniaceae	Çiçek	Salata, tatlı, çay	Lu ve ark., 2016
Nilüfer Nelumbo nucifera	Nelumbonaceae	Çiçek	Çay, salata	Lu ve ark., 2016

Tür (Türkçe ad ve bilimsel ad)	Familya	Tüketilen kısım	Tat ve gastronomik kullanım	Kaynak
Moringa Moringa oleifera	Moringaceae	Çiçek	Geleneksel sebze; salata, çorba	Kumari ve Bhargava, 2021; Chetia ve ark., 2024
Orkide ağacı Bauhinia variegata	Fabaceae	Tomurcuk, çiçek	Sebze olarak körilerde pişirilir	Lu ve ark., 2016; Kumari ve Bhargava, 2021
Kelebek bezelyesi Clitoria ternatea	Fabaceae	Çiçek	İçecek, tatlı	Pires ve ark., 2021
Çin gülü Hibiscus rosa-sinensis	Malvaceae	Çiçek	Çay, gıda takviyesi	Lu ve ark., 2016
Yıldız çiçeği Dahlia spp.	Asteraceae	Çiçek	Salata, tatlı; Meksika'da çorba	Pires ve ark., 2017
Frenk soğanı Allium schoenoprasum	Amaryllidaceae	Yaprak	Peynir, patates ve yumurta yemeklerinde çeşni	Pires ve ark., 2019
Kasia Cassia fistula	Fabaceae	Çiçek	Sebze; çorba ve köri	Lu ve ark., 2016; Kantadoung ve ark., 2018a

3. BESİN BİLEŞİMİ, BİYOAKTİF BİLEŞENLER VE SAĞLIK ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Taze çiçeklerin başlıca bileşeni sudur. Nem oranı, türe ve hasat zamanına bağlı olarak yaklaşık %70–96 arasında değişmektedir (Fernandes ve ark., 2017; Pires ve ark., 2019). Yüksek su içeriği, çiçeklerin enerji değerinin genellikle düşük olmasını açıklamaktadır. 100 g taze çiçek için 13,81–80,64 kcal aralığında enerji değeri bildirilmiştir (Pires ve ark., 2019). Kuru madde temelinde en büyük payı karbonhidratlar oluşturur ve bu bileşenlerin

oranı %42,4 ile %90,2 arasında değişir. Gözkıvıştıran için %90,2, peygamber çiçeği için %88,39 ve yabani gül türleri için %86,12 düzeyinde karbonhidrat bildirilirken, en düşük değer *Erythrina caribaea* türünde (%42,0) saptanmıştır (Fernandes ve ark., 2017; Pires ve ark., 2017).

Çiçeklerin ham protein içeriği türler arasında geniş farklılık göstermektedir. Kuru madde temelinde %0,38–25,43 aralığında değerler bildirilmiştir (Pires ve ark., 2019). Sebze olarak tüketilen çiçek durumlarını da kapsayan derlemelerde ise *Begonia boliviensis* için %2,0'a ulaşan değerler verilmiştir (Fernandes ve ark., 2017). Bu farklılığın önemli ölçüde incelenen türlerin kapsamından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. *Dahlia pinnata* ve *Tulbaghia violacea* çiçeklerinde kuru ağırlık temelinde yüksek protein içeriği saptanmıştır. Muz çiçeğinde (*Musa* sp.) %12,50, *Monarda didyma* çiçeklerinde ise taze ağırlık temelinde %7,82 protein bildirilmiştir (Stefaniak ve Grzeszczuk, 2019; Takahashi ve ark., 2020; Marchioni ve ark., 2024). Ham yağ içeriği genel olarak düşüktür. Kuru madde temelinde %0,1–8,5 aralığında değerler rapor edilmiş (Fernandes ve ark., 2018a); başka çalışmalarda ise %0,16–5,51 aralığı bildirilmiştir (Pires ve ark., 2017). Lipit fraksiyonunda linoleik asit (yaklaşık %36,9) ve oleik asit gibi doymamış yağ asitleri ile α-tokoferol öne çıkmaktadır (Fernandes ve ark., 2018a). Diyet lifi kuru ağırlık temelinde %1,21–55,40, kül içeriği ise %2,6–15,9 arasında değişmektedir (Fernandes ve ark., 2017; Pires ve ark., 2019).

Mineral bileşimi bakımından en bol bulunan element potasyumdur; bunu fosfor, kalsiyum ve magnezyum izlemektedir (Rop ve ark., 2012; Fernandes ve ark., 2017). Rop ve ark. (2012), potasyum miktarını kuru maddede $1{,}30 \times 10^3$–$4{,}06 \times 10^3$ mg/100 g aralığında bildirmiştir. *Monarda* ve *Mimulus* türlerinde ise kuru madde başına 30 g/kg'a kadar ulaşan değerler saptanmıştır (Stefaniak ve Grzeszczuk, 2019). Çiçeklerde bildirilen yüksek K/Na oranı, hipertansiyonun önlenmesi ve kardiyovasküler sağlığın

korunması açısından beslenme yönünden olumlu bir özellik olarak değerlendirilmektedir (Rop ve ark., 2012; Fernandes ve ark., 2017). Mikro elementler arasında demir miktarı kuru maddede 154,9 mg/kg'a kadar çıkabilmekte, çinko da kayda değer düzeylerde bulunmaktadır (Stefaniak ve Grzeszczuk, 2019). *Dianthus caryophyllus* 9,85 mg/kg demir içeriğiyle; *Viola* × *wittrockiana* ise 486,44 mg/kg kalsiyum ve 3964,84 mg/kg potasyum içeriğiyle öne çıkmıştır (Rop ve ark., 2012). Bununla birlikte, bu değerler farklı çalışmalardan ve farklı ağırlık temellerinden elde edildiğinden doğrudan karşılaştırılmamalıdır.

Vitaminler ve pigmentler de çiçeklerin besinsel bileşimine katkıda bulunur. Latin çiçeği, gül ve hibiskus çiçeklerinin C vitamini bakımından zengin olduğu bildirilmiştir (Fernandes ve ark., 2017). Otuz dört türün karşılaştırıldığı bir çalışmada C vitamini miktarı, taze ağırlık temelinde 1,62–143,80 mg/100 g arasında değişmiş; en yüksek değer *Rosa* spp.'de ölçülmüştür (Pires ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2023). α-Tokoferol bakımından *Calendula officinalis*, kuru ağırlıkta 56,78 mg/100 g ile en yüksek değere sahip tür olarak belirlenmiştir. *Rosa micrantha* (26,72 mg/100 g) ve Taraxacum sect. Ruderalia (21,60 mg/100 g) da α-tokoferol açısından zengin kaynaklar arasında yer almaktadır (Fernandes ve ark., 2018a).

Karotenoid içeriği bakımından *Tagetes erecta*, kuru ağırlıkta 721,49 mg/100 g toplam karotenoid ile ilk sırada yer almakta; bu türü arnika (558,51 mg/100 g) ve alıç (472,60 mg/100 g) izlemektedir (Nowicka ve Wojdyło, 2019). Başlıca karotenoidlerden lutein, kadife çiçeği, aynısefa ve latin çiçeğinde yüksek düzeylerde bulunmaktadır (Fernandes ve ark., 2018a). T. *erecta*, taze ağırlık temelinde 1062 µg/g lutein içeriğiyle en zengin kaynak olarak bildirilmiştir (Takahashi ve ark., 2020). Latin çiçeğinde 450 µg/g lutein, aynısefada ise 637 µg/100 g β-karoten saptanmıştır (Fernandes ve ark., 2020b). Çiçeklerdeki β-karoten düzeylerinin havuç, ıspanak ve tatlı patateste bulunan miktarlara yakın veya bu

miktarlardan yüksek olabildiği belirtilmektedir (Fernandes ve ark., 2018a). Safranın öne çıkan biyoaktif bileşenleri arasında krosin, krosetin ve safranal bulunmaktadır (Fakhri ve ark., 2021).

Fenolik bileşikler, çiçeklerin antioksidan kapasitesine başlıca katkı sağlayan bileşenlerdir. Toplam fenolik içerik türler arasında önemli farklılık göstererek 0,14–118,12 mg /g aralığında bildirilmiştir (Chetia ve ark., 2024). Flavonoller arasında kuersetin, kemferol, mirisetin ve izoramnetin yaygın olarak saptanmaktadır. Kuersetin özellikle gül, kasımpatı ve mürver çiçeklerinde; kemferol ise hercai menekşe, aslanağzı ve gülde belirlenmiştir (Lu ve ark., 2016; Pires ve ark., 2018). *Rosa rugosa*'nın farklı dokularında flavonol derişimi kuru ağırlıkta 15.870 µg/g'a ulaşabilmektedir (Lu ve ark., 2016). *Crataegus*, *Primula* ve *Tilia* çiçeklerinde bulunan polimerik prosiyanidinler, toplam polifenollerin yarısından fazlasını oluşturabilmektedir (Nowicka ve Wojdyło, 2019).

Flavonlardan luteolin ve *apigenin* çiçeklerde sıklıkla görülür; luteolin özellikle kasımpatı ve hanımelinde yüksek düzeylerde bulunur (Lu ve ark., 2016; Nowicka ve Wojdyło, 2019). Gül ve kasımpatı saptanan kateşin ile epikateşin, antioksidan özellikleriyle bilinen bileşiklerdir (Lu ve ark., 2016; Pires ve ark., 2018). Çiçeklerde bulunan başlıca fenolik asitler klorojenik, kafeik, p-kumarik ve ferulik asittir (Pires ve ark., 2018, 2019). Hanımeli çiçeklerinde klorojenik asit miktarı kuru ağırlıkta 16.043 µg/g'a kadar ulaşmıştır (Pires ve ark., 2019).

Antosiyaninler, çiçeklere kırmızı, pembe, mor ve mavi tonlarını veren pigmentlerdir. Bu grupta siyanidin, delfinidin, pelargonidin, malvidin ve peonidin glikozitleri yer almakta; en yaygın bileşik olarak siyanidin-3-glukozit öne çıkmaktadır. Siyanidin-3-glukozit özellikle gül, hibiskus ve hercai menekşe çiçeklerinde saptanmıştır (Xiong ve ark., 2014; Pires ve ark., 2019). Koyu mor renkli *Dianthus chinensis*, *Viola* × *wittrockiana* ve *Pelargonium peltatum* çiçeklerinde yüksek antosiyanin içeriğinin,

yüksek antioksidan kapasiteyle ilişkili olduğu bildirilmiştir (Benvenuti ve ark., 2016; Zheng ve ark., 2018). Kasımpatı çeşitleri de flavonoidler ve fenolik asitler bakımından zengindir (Patil ve ark., 2024). Uçucu yağ içeriği yüksek olan lavanta, yasemin ve gül ise parfümeri ve kozmetik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Pires ve ark., 2021).

Çiçeklerin antioksidan aktivitesine ilişkin ölçümler, kullanılan yönteme ve incelenen türe bağlı olarak geniş bir aralıkta değişmektedir. DPPH radikal süpürme aktivitesi %12,51–94,24 arasında bildirilmiş; *Alpinia malaccensis* %87,85, *Hapaline benthamiana* ise %12,51 inhibisyon göstermiştir (Kantadoung ve ark., 2018b). ABTS değerleri 9,33–118,45 mg TEAC/g aralığında ölçülmüş ve en yüksek değer *Tamarindus indica* için rapor edilmiştir (Kantadoung ve ark., 2018b). FRAP değerleri 0,02–6,70 mmol Fe^{2+}/g arasında değişirken (Pires ve ark., 2018), *Dianthus chinensis* (14,22 mg TE/g) ve *Monarda didyma* (8,14 mg TE/g) en yüksek değerlerin kaydedildiği türler arasında yer almıştır (Stefaniak ve Grzeszczuk, 2019). Bu sonuçlar farklı yöntem ve birimlerle ifade edildiğinden, ölçümler doğrudan birbiriyle karşılaştırılmamalıdır

Moleküler düzeyde, söz konusu fitokimyasalların Nrf2 transkripsiyon faktörünün Keap1'den ayrılarak hücre çekirdeğine geçmesini ve ARE yolağını etkinleştirmesini sağladığı ileri sürülmektedir. Bunun sonucunda hücre içi SOD, CAT ve GPx enzimlerinin uyarılması; lipit peroksidasyonunun ve oksidatif hücre hasarının baskılanması beklenmektedir (Fakhri ve ark., 2021). Nitekim *Hibiscus sabdariffa* ekstraktlarının DPPH ve ABTS radikallerini süpürdüğü ve lipit peroksidasyonunu inhibe ettiği bildirilmiştir (Pires ve ark., 2018).

Antioksidan kapasitenin ötesindeki biyolojik etkiler, büyük ölçüde in vitro çalışmalar ve hayvan modelleri üzerinden incelenmiştir (Rivas-García ve ark., 2020; Fakhri ve ark., 2021). Anti-inflamatuar etkiler kapsamında, *Hibiscus sabdariffa*'dan izole

edilen delfinidin-3-sambubiyozidin LPS ile uyarılmış iNOS, NO, IL-6, MCP-1 ve TNF-α üretimini azalttığı bildirilmiştir (Sogo ve ark., 2015). Gül çiçeği ekstraktlarının ise UV kaynaklı inflamasyonu baskıladığı ve COX-2 ekspresyonunu düşürdüğü gösterilmiştir (Lee ve ark., 2018).

Antiproliferatif etkilere ilişkin bulgular arasında *Calendula officinalis* ekstraktlarının MCF-7 ve MDA-MB-231 meme kanseri hücre hatları üzerindeki sitotoksik etkisi (Cruceriu ve ark., 2020), hibiskus ekstraktlarının AGS mide kanseri hücrelerinde apoptozu indüklemesi (Lin ve ark., 2007) ve *Sambucus canadensis* çiçeklerinin glioma ve beyin endotel hücrelerinde antiproliferatif etki göstermesi (Lamy ve ark., 2018) yer almaktadır. Bu bulgular hücre modellerinden elde edildiği için, klinik etkiyi tek başına kanıtlamamaktadır.

Antidiyabetik potansiyel, α-amilaz ve α-glukozidaz enzimlerinin inhibisyonuyla ilişkilendirilmektedir (Nowicka ve Wojdyło, 2019). Ebegümeci ekstraktının α-glukozidazı 11,3 µg/mL IC50 değeriyle inhibe ettiği (Loizzo ve ark., 2016); Lonicera japonica polisakkaritlerinin ise diyabetik sıçanlarda kan şekeri düzeyini ve insülin direncini düşürdüğü bildirilmiştir (Wang ve ark., 2017). Nöroprotektif etkilere ilişkin olarak *Tagetes erecta* ekstraktlarının *Caenorhabditis elegans* modelinde oksidatif stresi azalttığı ve β-amiloid kaynaklı paralizinin ortaya çıkışını geciktirdiği (Moliner ve ark., 2018); *Viola* × *wittrockiana* ve V. *cornuta* ekstraktlarının ise asetilkolinesteraz ile MAO-A enzimlerini inhibe ettiği rapor edilmiştir (Moliner ve ark., 2019).

Meksika kökenli *Crataegus gracilior* çiçeklerinde vazorelaksan etki saptanmış (Torres-Ortiz ve ark., 2019); benzer şekilde Hibiscus ekstraktlarının da ACE inhibisyonu ve vazorelaksan etki aracılığıyla kan basıncını düşürebildiği rapor edilmiştir (Pires ve ark., 2018).

Karaciğer koruyucu etkiler kapsamında *Chrysanthemum morifolium* ekstraktlarının alkol, CCl_4 ve parasetamole bağlı hasar modellerinde oksidatif stresi baskıladığı (Tian ve ark., 2019); *Abelmoschus manihot* flavonoidlerinin ise CCl_4 kaynaklı hasara karşı antioksidan ve anti-inflamatuar etki gösterdiği rapor edilmiştir (Ai ve ark., 2013). Antimikrobiyal etkinlik açısından *Hibiscus rosa-sinensis* ekstraktları Gram-pozitif ve Gram-negatif bakterilere karşı (Mak ve ark., 2013), *Rosa rugosa* ekstraktları ise sekiz bakteri ve iki maya suşuna karşı aktivite göstermiştir (Nowak ve ark., 2014). Bununla birlikte, bulguların büyük bölümü hücre ve hayvan modellerine dayanmaktadır. Alıçla ilgili sınırlı sayıdaki klinik çalışma dışında, bu etkilerin insanlardaki biyoyararlanımı ve klinik karşılığı henüz yeterince doğrulanmış değildir (Fakhri ve ark., 2021).

Fitokimyasal bileşiklerin bitkide birikimi; genotip, ışık şiddeti, sıcaklık, sulama rejimi ve hasat olgunluğu gibi etmenlere bağlı olarak değişmektedir (Benvenuti ve ark., 2016; Fernandes ve ark., 2019a; Pires ve ark., 2021). Hercai menekşede, buharlaşan su miktarının %100'ünü karşılayacak düzeyde yapılan tam sulamanın toplam polifenol ve antosiyanin birikimini en yüksek seviyeye çıkardığı bildirilmiştir (Benvenuti ve ark., 2016). Şakayık ve süs kabağı çiçeklerinde ise en yüksek besinsel değer ve antioksidan kapasite, tomurcuk döneminde değil tam çiçeklenme evresinde hasat edilen örneklerde saptanmıştır (Fernandes ve ark., 2019a; Kumari ve Bhargava, 2021). *Calendula officinalis*'te karotenoid içeriği çiçeğin rengine göre değişmektedir (Fernandes ve ark., 2018a). Hasat sonrası uygulamalar (Chitrakar ve ark., 2019) ile ekstraksiyon yöntemi ve çözücü seçimi de elde edilen biyoaktif bileşik miktarını etkileyen diğer önemli etmenlerdir (Pires ve ark., 2019).

4. ÜRETİM, HASAT SONRASI İŞLEMLER VE GIDADA DEĞERLENDİRME

Yenilebilir süs bitkilerinin yetiştirme gereksinimleri, genel olarak süs amacıyla yetiştirilen yakın akrabalarının gereksinimleriyle benzerlik göstermektedir. Türlerin çoğu 15–25 °C arasındaki ılıman sıcaklıklarda iyi gelişirken, tropikal ve subtropikal iklimlere uyum sağlamış türler de bulunmaktadır (Fernandes ve ark., 2017; Pires ve ark., 2021). Taç yaprak kalitesi ve çiçeklenme yoğunluğu açısından organik maddece zengin, iyi drene olan ve pH'ı 6,0–7,0 arasında değişen kumlu-tınlı topraklar elverişli kabul edilmektedir (Benvenuti ve ark., 2016; Kumari ve Bhargava, 2021).

Antirrhinum majus, *Dianthus chinensis*, *Calendula officinalis* ve *Tagetes* spp. gibi tek yıllık türlerin tohumları, ilkbahar başında serada viyollere ekilir; don tehlikesi geçtikten sonra gelişen fideler üretim parsellerine şaşırtılır (Benvenuti ve ark., 2016; Stefaniak ve Grzeszczuk, 2019). *Monarda didyma*, *Hemerocallis fulva* ve *Begonia* spp. gibi çok yıllık türler ise kök bölme, çelik veya yumru kullanılarak vejetatif yolla çoğaltılabilmektedir (Stefaniak ve Grzeszczuk, 2019; Marchioni ve ark., 2024). Bununla birlikte, yenilebilir çiçeklerin üretimine yönelik standart yetiştiricilik protokolleri henüz sınırlıdır (Matyjaszczyk ve Śmiechowska, 2019).

Çok yıllık ve dayanıklı türler için açık alan yetiştiriciliği ekonomik bir üretim modeli sunar; ancak hava koşullarının kontrol edilememesi taç yapraklarda yıpranmaya yol açabilir (Fernandes ve ark., 2017). Isıtmasız ya da kontrollü seralar, çiçekleri yağmur, rüzgâr ve tozdan koruyarak pazar kalitesini artırabilir ve hasat döneminin uzamasına katkı sağlayabilir (Benvenuti ve ark., 2016). Saksıda ve dikey tarım sistemlerinde üretim ise kent tarımı ve restoran bahçeleri gibi alanlarda daha temiz ve kontrollü yetiştiricilik olanağı sunduğundan giderek yaygınlaşmaktadır (Kumari ve Bhargava, 2021).

Damla sulama, suyun taç yapraklarla doğrudan temasını önleyerek fungal enfeksiyon ve yaprak lekelenmesi riskini azaltmaya yardımcı olur. Gübrelemede dengeli organik

kompostlardan veya kontrollü besin çözeltilerinden yararlanılması önerilmektedir (Benvenuti ve ark., 2016; Fernandes ve ark., 2017). Gıda amacıyla yetiştirilen bitkilerde sentetik pestisit, fungisit ve büyüme düzenleyicilerin kullanılmaması, üretimin temel ilkelerinden biri olarak vurgulanmaktadır (Matyjaszczyk ve Śmiechowska, 2019; Pires ve ark., 2019). Bu bitkiler için ruhsatlı pestisit seçeneklerinin bulunmaması zararlı yönetimini güçleştirebildiğinden, organik üretim uygun bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Matyjaszczyk ve Śmiechowska, 2019; Pires ve ark., 2021). Zararlılarla mücadelede fiziksel tuzaklar, ekim nöbeti, karışık ekim ve biyolojik mücadele etmenlerinden yararlanılmaktadır (Matyjaszczyk ve Śmiechowska, 2019).

Hasadın, çiy kuruduktan sonra sabahın erken saatlerinde ve çiçekler tam açmışken elle yapılması önerilmektedir. Bu aşamada böcek ya da hastalık belirtisi taşımayan, taze ve sağlam çiçeklerin seçilmesi gerekir (Mlcek ve Rop, 2011; Fernandes ve ark., 2017, 2019b; Chen ve ark., 2020;). Ezilme ve fiziksel hasarı önlemek amacıyla çiçekler, havalandırma delikleri bulunan sert plastik kutulara tek sıra hâlinde yerleştirilir. Hasat edilen ürünlerin hızla 1–5 °C sıcaklığa ve %90–95 bağıl neme sahip soğuk depolara aktarılması önerilmektedir (Fernandes ve ark., 2019b; Chitrakar ve ark., 2019).

Taze çiçeklerin fizyolojik raf ömrü görece kısadır. Ortam koşullarında 2–5 günle sınırlı olan raf ömrü, 1–5 °C'de muhafaza edildiğinde 2–14 güne kadar çıkabilmektedir (Fernandes ve ark., 2017, 2019b; Chitrakar ve ark., 2019). Raf ömrünü uzatmak amacıyla modifiye atmosfer paketleme (MAP) ve 1-metilsiklopropen (1-MCP) uygulamalarından (Kou ve ark., 2012); kitosan ve aljinat temelli yenilebilir kaplamalardan, yüksek hidrostatik basınç uygulamasından, elektron demeti ve gama ışınlamasından yararlanılabilmektedir (Fernandes ve ark., 2019b).

Kurutma yönteminin seçimi de ürün kalitesi açısından önem taşır. Sıcak havayla kurutma düşük maliyetli olmakla birlikte, sıcaklığa duyarlı antosiyanin, C vitamini ve aroma bileşiklerinde kayıplara neden olabilir (Fernandes ve ark., 2018b; Chitrakar ve ark., 2019). Dondurarak kurutma ise renk ve üç boyutlu yapının yanı sıra aroma ile fenolik bileşikleri de daha iyi koruması nedeniyle öne çıkmaktadır (Fernandes ve ark., 2019b; Chitrakar ve ark., 2019).

Yenilebilir çiçeklerin gıdalardaki en doğrudan kullanım biçimi taze tüketimdir. Salata, çorba, başlangıç tabağı ve et ya da balık yemeklerine eklenen çiçekler, görsel çeşitlilik sağlamanın yanı sıra baharatımsı veya limonumsu tatlarıyla yemeklerin duyusal özelliklerini de zenginleştirebilir (Mlcek ve Rop, 2011; Benvenuti ve ark., 2016; Fernandes ve ark., 2017). Likör, sirke, bal, yağ, şurup, jöle, dondurma ve pastacılık ürünlerinde ise aroma ve renk verici olarak kullanılmaktadırlar (Mlcek ve Rop, 2011; Pires ve ark., 2019). *Hibiscus sabdariffa, Chrysanthemum morifolium, Rosa damascena* ve *Centaurea cyanus* çiçekleri infüzyon ve işlevsel çay ürünlerinde değerlendirilmekte buz kalıplarında dondurularak kokteyllerde de sunulmaktadır (Pires ve ark., 2017; Janarny ve ark., 2021). Menekşe ve leylak taç yaprakları şekerle kristalize edilirken Çin'de gül reçeli ve çiçekli kek gibi ürünler hazırlanmaktadır (Lu ve ark., 2016; Janarny ve ark., 2021). Şekerle kaplama, ayrıca çiçekleri sirke veya alkol içinde muhafaza etme, yaygın kullanılan diğer değerlendirme yöntemleri arasındadır (Mlcek ve Rop, 2011).

Yenilebilir çiçekler, işlevsel gıda bileşeni olarak da araştırılmaktadır. *Hibiscus sabdariffa* marmelatının yoğurda eklenmesiyle ürünün viskozitesinin ve antioksidan aktivitesinin belirgin biçimde arttığı bildirilmiştir (Janarny ve ark., 2021). Gül ve peygamber çiçeği ekstreleri, yoğurtta E163 sentetik boyasına alternatif doğal renklendirici ve koruyucu bileşenler olarak incelenmiştir (Pires ve ark., 2018). *Delonix regia* taç yapraklarından elde edilen ekstraktın ise lor ürünlerinin fenolik bileşik içeriğini ve

antimikrobiyal dayanıklılığını artırdığı rapor edilmiştir (Janarny ve ark., 2021).

Yüksek antosiyanin ve karotenoid içerikleri nedeniyle peygamber çiçeği mavi, kadife çiçeği ise sarı-turuncu doğal gıda boyası kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Benvenuti ve ark., 2016; Pires ve ark., 2019). Duyusal değerlendirmelerde renk, tat, aroma, doku ve görünüm birlikte ele alınmaktadır. Bu değerlendirmelerde sarı, turuncu, mor ve mavi çiçekler görsel açıdan daha çekici bulunmuş; latin çiçeği, *Ageratum houstonianum* ve hercai menekşe panelistler tarafından en beğenilen türler arasında gösterilmiştir (Benvenuti ve ark., 2016). Genel olarak renk ve tat özelliklerinin tüketici kabulünü doğrudan etkilediği belirtilmektedir (Chen ve Wei, 2017; Rodrigues ve ark., 2017).

5. GIDA GÜVENLİĞİ, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK, EKONOMİK BOYUT VE GELECEK PERSPEKTİFİ

Yenilebilir çiçek tüketimindeki en önemli tehlikelerden biri, görünüş bakımından benzer zehirli türlerin yenilebilir sanılmasıdır (Matyjaszczyk ve Śmiechowska, 2019; Takahashi ve ark., 2020). Zakkum (*Nerium oleander*) ve tatula (*Datura stramonium*) gibi kardiyotoksik ya da nörotoksik bileşikler içeren bitkiler, tür teşhisinin doğru yapılmaması durumunda ciddi, hatta yaşamı tehdit edici sonuçlara yol açabilir (Purohit ve ark., 2021). Yenilebilir ve yenilemeyen çiçekler arasındaki ayrım, alkaloidler gibi kimyasal bileşiklerin varlığıyla da ilişkili olabilir (Lu ve ark., 2016). Bu nedenle gerek doğadan toplanan gerekse kültüre alınmış bitkisel materyalin botanik kimliği doğrulanmalıdır (Mlcek ve Rop, 2011). Bir diğer önemli risk grubu, üretim ve çevreden kaynaklanan kirleticilerdir. Geleneksel çiçekçilikte süs bitkileri gıda amacıyla değil, görsel nitelikleri için yetiştirildiğinden yoğun pestisit, fungisit ve büyüme düzenleyici uygulamalarına maruz kalabilmektedir. Bu nedenle çiçekçi ve fidanlıklardan temin edilen çiçekler, gıda olarak

tüketilmeye uygun kabul edilmemelidir (Fernandes ve ark., 2017; Matyjaszczyk ve Śmiechowska, 2019). Avrupa Birliği Gıda ve Yem Hızlı Alarm Sistemi (RASFF) kayıtlarında yenilebilir çiçeklerde yasaklı dimetoat, DEET ve sülfit kalıntılarının yanı sıra Salmonella spp. gibi patojenlerin de bildirildiği aktarılmaktadır (Fernandes ve ark., 2017; Matyjaszczyk ve Śmiechowska, 2019). Karayolu kenarlarından toplanan çiçeklerde kurşun ve kadmiyum gibi ağır metaller birikebilir (Matyjaszczyk ve Śmiechowska, 2019; Fakhri ve ark., 2021). Çiçeklerin çoğunlukla çiğ tüketilmesi mikrobiyolojik riskleri artırabileceğinden hasat, işleme ve depolama aşamalarında hijyen kurallarına titizlikle uyulmalıdır (Fernandes ve ark., 2017; Matyjaszczyk ve Śmiechowska, 2019).

Çiçeğin bütün organları her zaman tüketime uygun değildir. Polenler, astımı veya alerjik yatkınlığı bulunan kişilerde şiddetli reaksiyonlara neden olabileceğinden, tüketim öncesinde erkek organların (stamenlerin) ayıklanması önerilmektedir (Matyjaszczyk ve Śmiechowska, 2019). Gül ve kasımpatı taç yapraklarının acı tada sahip beyaz taban kısımlarının da kesilmesi tavsiye edilmektedir (Lu ve ark., 2016; Chen ve ark., 2020). Endojen toksinler bakımından, latin çiçeğinde bulunan erusik asit temelinde yapılan bir hesaplamada 39,5 g'dan fazla taze çiçek tüketiminin EFSA'nın tolere edilebilir günlük alım (TDI) eşiğini aşabileceği ve kardiyotoksisite riski oluşturabileceği belirtilmiştir (Egebjerg ve ark., 2018; Pires ve ark., 2019; Chen ve ark., 2020). Benzer biçimde, aynı kaynaklarda civanperçemi (*Achillea millefolium*) için tujon temelinde 18 g, *Galium odoratum* için ise kumarin temelinde 7 g düzeylerinin aşılmaması gerektiği aktarılmaktadır (Egebjerg ve ark., 2018; Pires ve ark., 2019). Bu miktarlar kaynaklarda yer alan toksikolojik hesaplamalar olarak ele alınmalı; tür, ürün bileşimi ve tüketici özelliklerine göre değişebileceğinden genel bir güvenli porsiyon önerisi şeklinde yorumlanmamalıdır. Tripsin inhibitörleri ve oksalik asit gibi antinütrisyonel bileşenlerin ise uygun ısıl

işlemlerle etkisiz hâle getirilmesi gerekmektedir (Kumari ve Bhargava, 2021).

Yenilebilir peyzaj yaklaşımı, yalnızca dekoratif amaçla yapılan bitkilendirmenin ötesine geçerek estetik nitelik taşıyan ve aynı zamanda gıda sağlayan çiçek, yaprak ve meyvelerin kentsel çevreye dâhil edilmesini ifade etmektedir (Kumari ve Bhargava, 2021; Santana ve ark., 2026). Bu yaklaşım, kent ve kırsal alanlarda sürdürülebilir gıda üretimine katkı sunabilir (Mlcek ve Rop, 2011; Pires Jr. ve ark., 2021). Okul ve topluluk bahçelerinde yenilebilir süs bitkilerinin yetiştirilmesi, bireylerin doğayla ilişkisini ve beslenme konusundaki farkındalığını güçlendirme potansiyeli taşımaktadır.

Renkli ve aromatik çiçekler bal arıları, kelebekler ve diğer yararlı böcekler için nektar ve polen kaynağı oluşturur (Mlcek ve Rop, 2011; Fernandes ve ark., 2017). Bu nedenle yenilebilir çiçeklerin üretimi, agroekosistemlerdeki çeşitliliğin desteklenmesine katkıda bulunabilir (Benvenuti ve ark., 2016; Pires ve ark., 2021). Organik ve agroekolojik üretim yöntemleri sentetik girdilerin azaltılmasını sağlarken damla sulama su kullanımında tasarrufa yardımcı olabilir (Benvenuti ve ark., 2016; Pires ve ark., 2021).

Kesme çiçek sektöründe görsel standartları karşılamadığı için elden çıkarılan çiçeklerin doğal gıda renklendiricisi veya antioksidan ekstrakt üretiminde değerlendirilmesi, tarımsal atıkların döngüsel ekonomiye kazandırılmasına örnek oluşturmaktadır (Pires ve ark., 2018; Takahashi ve ark., 2020). Ayrıca Himalayalar, Latin Amerika ve Güneydoğu Asya'da yerel topluluklar tarafından tüketilen yabani yenilebilir çiçeklerin bilimsel olarak kayıt altına alınması, kentleşme ve tek tip beslenmenin baskısı altında kaybolma riski taşıyan geleneksel bilginin ve genetik çeşitliliğin korunmasına katkı sağlayabilir (Lu ve ark., 2016; Takahashi ve ark., 2020; Kumari ve Bhargava, 2021).

Tüketimi teşvik eden etmenler arasında ürünlerin estetik çekiciliği, tüketici merakı ve sağlıkla ilişkilendirilen algılar yer almaktadır (Rodrigues ve ark., 2017; Chen ve Wei, 2017). Buna karşılık yeni gıdalara yönelik çekingenlik (gıda neofobisi) ve pestisit kalıntılarına ilişkin kaygılar, tüketici kabulünü sınırlayan başlıca etmenlerdir (Rodrigues ve ark., 2017; Matyjaszczyk ve Śmiechowska, 2019). Şeffaf sertifikasyon uygulamaları ve bilgilendirici tanıtım çalışmaları, ürünlere duyulan güvenin artırılmasına yardımcı olabilir. Yenilebilir çiçek üretimi, yerel restoranlar ve butik üreticiler arasında tarladan sofraya uzanan kısa tedarik zincirlerinin kurulmasına olanak tanımaktadır. Çiçek festivalleri ve gastronomi atölyeleri kırsal turizmi destekleyebilir; ayrıca kadın çiftçiler ve aile işletmeleri için yeni gelir kaynakları oluşturabilir (Fernandes ve ark., 2020a; Takahashi ve ark., 2020; Kumari ve Bhargava, 2021). Çiçeklerle zenginleştirilmiş sorgum kaşıkları üzerine yapılan çalışma da turizm ve gıda sektörlerinde sürdürülebilir ürün geliştirme arayışına örnek gösterilmektedir (Manivel ve Paramasivam, 2024).

Yenilebilir çiçek alanının bilimsel temelde gelişebilmesi için çözüm bekleyen çeşitli araştırma konuları bulunmaktadır (Fernandes ve ark., 2017; Matyjaszczyk ve Śmiechowska, 2019 Fakhri ve ark., 2021). Mevcut bulguların çoğu in vitro deneylerden ve hayvan modellerinden elde edildiğinden, fitokimyasalların insanlarda biyoerişilebilirliği, biyoyararlanımı, bağırsak mikrobiyotası tarafından metabolize edilme biçimi ve plazma derişimleri randomize kontrollü klinik çalışmalarla araştırılmalıdır. Yıl boyunca verim sağlayan, zararlılara dayanıklı, taşımaya elverişli ve yüksek biyoaktif bileşik içeriğine sahip çeşitlerin geliştirilmesi için ıslah programlarına; üretim, hasat ve işleme aşamalarında uygulanabilecek standart protokollere de ihtiyaç vardır. Her tür için tolere edilebilir günlük alım sınırlarının ve antinütrisyonel bileşenlerin belirlenmesi; resmî pozitif listelerin oluşturulması

yoluyla mevzuattaki belirsizliklerin giderilmesi önem taşımaktadır. Liyofilizasyon, yüksek hidrostatik basınç ve yenilebilir kaplama gibi ileri muhafaza yöntemlerinin maliyetlerinin düşürülmesi, bu teknolojilerin endüstriyel ölçekte yaygınlaştırılmasına katkı sağlayabilir. Bunlara ek olarak, tüketici kabulünü artırmaya yönelik araştırmaların ve üretimin çevresel ve sosyoekonomik sürdürülebilirliğini değerlendiren çalışmaların sürdürülmesi gerekmektedir (Chen ve Wei, 2017; Pires ve ark., 2021).

6. SONUÇ

Yenilebilir süs bitkileri, estetik ve gastronomik değerlerinin yanı sıra besin ve biyoaktif bileşen potansiyelleriyle de öne çıkmaktadır. Çiçeklerin yanında bazı türlerin yaprak, tomurcuk, meyve ve tohumları da gıdalarda kullanılmakta; salata ve içeceklerden doğal renklendiricilere kadar farklı ürünlere çeşitlilik kazandırmaktadır. Besin bileşimleri türe ve yetiştirme koşullarına göre değişmekle birlikte, fenolik bileşikler, flavonoidler, antosiyaninler ve karotenoidler dikkat çekmektedir. Bu bileşenlere ilişkin deneysel bulgular umut verici olsa da sağlık etkilerinin insanlarda doğrulanması için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Bu bitkilerin gıdaya güvenli biçimde kazandırılması; doğru tür teşhisi, gıda amacına uygun üretim, hijyenik hasat ve muhafaza ile tüketiciyi bilgilendiren etiketlemeyi gerektirir. Yenilebilir peyzaj ve üretim artığının değerlendirilmesi, biyolojik çeşitliliği destekleme ve kaynakları daha verimli kullanma fırsatı sunabilir. Yerel üretim, gastronomi ve kırsal turizm de ekonomik katkı sağlayabilecek alanlardır.

Sonuç olarak yenilebilir çiçeklerin potansiyelinden sürdürülebilir biçimde yararlanmak için güvenlik standartlarının ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesi, tüketici farkındalığının artırılması ve sağlık etkilerinin bilimsel olarak doğrulanması önem taşımaktadır.

Kaynakça

Ai, G., Liu, Q., Hua, W., Huang, Z., & Wang, D. (2013). Hepatoprotective evaluation of the total flavonoids extracted from flowers of Abelmoschus manihot (L.) Medic: In vitro and in vivo studies. Journal of Ethnopharmacology, 146(3), 794–802.

Barros, R. G. C., Andrade, J. K. S., Pereira, U. C., de Oliveira, C. S., Rezende, Y. R. R. S., Silva, T. O. M., Nogueira, J. P., Gualberto, N. C., Araujo, H. C. S., & Narain, N. (2020). Phytochemicals screening, antioxidant capacity and chemometric characterization of four edible flowers from Brazil. Food Research International, 130, 108899.

Benvenuti, S., Bortolotti, E., & Maggini, R. (2016). Antioxidant power, anthocyanin content and organoleptic performance of edible flowers. Scientia Horticulturae, 199, 170–177.

Chen, G. L., Chen, S. G., Xiao, Y., & Fu, N. L. (2020). Antioxidant capacities and total polyphenolic contents of edible flowers from China. Food Science and Human Wellness, 9(2), 125–134.

Chen, N. H., & Wei, S. (2017). Factors influencing consumers' attitudes towards the consumption of edible flowers. Food Quality and Preference, 56, 93–100.

Chetia, I., Das, A. J., & Badwaik, L. S. (2024). Assessment of nutritional and bioactive properties of selected edible flowers: Characterisation of phenolic compounds by reversed-phase high performance liquid chromatography. Journal of Chromatography Open, 5, 100123.

Chitrakar, B., Zhang, M., & Bhandari, B. (2019). Edible flowers with the common name "marigold": Their therapeutic values and processing. Trends in Food Science & Technology, 89, 76–87.

Cruceriu, D., Diaconeasa, Z., Socaci, S., Socaciu, C., Rakosy-Tican, E., & Balacescu, O. (2020). Biochemical profile, selective cytotoxicity and molecular effects of Calendula officinalis extracts on breast cancer cell lines. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 48(1), 24–39.

Egebjerg, M. M., Olesen, P. T., Eriksen, F. D., Ravn-Haren, G., Bredsdorff, L., & Pilegaard, K. (2018). Are wild and cultivated flowers served in restaurants or sold by local producers in Denmark safe for the consumer? Food and Chemical Toxicology, 120, 129–142.

Fakhri, S., Tomas, M., Capanoglu, E., Hussain, Y., Abbaszadeh, F., Lu, B., Hu, X., Wu, J., Zou, L., Smeriglio, A., Simal-Gandara, J., Cao, H., Xiao, J., & Khan, H. (2021). Antioxidant and anticancer potentials of edible flowers: Where do we stand? Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 61(21), 3565–3593.

Fernandes, L., Casal, S., Pereira, J. A., Saraiva, J. A., & Ramalhosa, E. (2017). Edible flowers: A review of the nutritional, antioxidant, antimicrobial properties and effects on human health. Journal of Food Composition and Analysis, 60, 38–50.

Fernandes, L., Casal, S., Pereira, J. A., Saraiva, J. A., & Ramalhosa, E. (2018b). Effects of different drying methods on the bioactive compounds and antioxidant properties of edible Centaurea (Centaurea cyanus) petals. Brazilian Journal of Food Technology, 21, e2017117.

Fernandes, L., Casal, S., Pereira, J. A., Saraiva, J. A., & Ramalhosa, E. (2020a). An overview on the market of edible flowers. Food Reviews International, 36(3), 258–275.

Fernandes, L., Ramalhosa, E., Baptista, P., Pereira, J. A., Saraiva, J. A., & Casal, S. I. P. (2019a). Nutritional and nutraceutical

composition of pansies (Viola × wittrockiana) during flowering. Journal of Food Science, 84(3), 490–498.

Fernandes, L., Ramalhosa, E., Pereira, J. A., Saraiva, J. A., & Casal, S. (2018a). The unexplored potential of edible flowers lipids. Agriculture, 8(10), 146.

Fernandes, L., Ramalhosa, E., Pereira, J. A., Saraiva, J. A., & Casal, S. (2020b). Borage, camellia, centaurea and pansies: Nutritional, fatty acids, free sugars, vitamin E, carotenoids and organic acids characterization. Food Research International, 132, 109070.

Fernandes, L., Saraiva, J. A., Pereira, J. A., Casal, S., & Ramalhosa, E. (2019b). Post-harvest technologies applied to edible flowers: A review. Food Reviews International, 35(2), 132–154.

Janarny, G., Gunathilake, K. D. P. P., & Ranaweera, K. K. D. S. (2021). Nutraceutical potential of dietary phytochemicals in edible flowers: A review. Journal of Food Biochemistry, 45(4), e13642.

Kantadoung, K., Rach-keeree, A., Puangpradab, R., Sommano, S., & Suksathan, P. (2018a). Nutritional and mineral composition of eleven edible flowers from northern Thailand. Journal of Food Composition and Analysis, 72, 105–112.

Kantadoung, K., Rachkeeree, A., Puangpradab, R., Sommano, S., & Suksathan, R. (2018b). Nutritive values of some edible flowers found in northern Thailand during the rainy season. Acta Horticulturae, 1210, 263–271.

Kou, L., Turner, E. R., & Luo, Y. (2012). Extending the shelf life of edible flowers with controlled release of 1-methylcyclopropene and modified atmosphere packaging. Journal of Food Science, 77(5), S188–S193.

Kumari, P., & Bhargava, B. (2021). Phytochemicals from edible flowers: Opening a new arena for healthy lifestyle. Journal of Functional Foods, 78, 104375.

Lamy, S., Muhire, E., & Annabi, B. (2018). Antiproliferative efficacy of elderberries and elderflowers (Sambucus canadensis) on glioma and brain endothelial cells under normoxic and hypoxic conditions. Journal of Functional Foods, 40, 164–179.

Lee, M. H., Nam, T. G., Lee, I., Shin, E. J., Han, A. R., Lee, P., Lee, S. Y., & Lim, T. G. (2018). Skin anti-inflammatory activity of rose petal extract (Rosa gallica) through reduction of MAPK signaling pathway. Food Science & Nutrition, 6(8), 2560–2567.

Lin, H. H., Chen, J. H., Kuo, W. H., & Wang, C. J. (2007). Chemopreventive properties of Hibiscus sabdariffa L. on human gastric carcinoma cells through apoptosis induction and JNK/p38 MAPK signaling activation. Chemico-Biological Interactions, 165(1), 59–75.

Loizzo, M. R., Pugliese, A., Bonesi, M., Tenuta, M. C., Menichini, F., Xiao, J., & Tundis, R. (2016). Edible flowers: A rich source of phytochemicals with antioxidant and hypoglycemic properties. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 64(12), 2467–2474.

Lu, B., Li, M., & Yin, R. (2016). Phytochemical content, health benefits, and toxicology of common edible flowers: A review (2000–2015). Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 56(S1), S130–S148.

Mak, Y. W., Chuah, L. O., Ahmad, R., & Bhat, R. (2013). Antioxidant and antibacterial activities of hibiscus (Hibiscus rosa-sinensis L.) and Cassia (Senna bicapsularis L.) flower

extracts. Journal of King Saud University – Science, 25(4), 275–282.

Manivel, D., & Paramasivam, R. (2024). Sorghum spoons enriched with selected edible flowers: A sustainable alternative to conventional cutlery in the food and tourism sectors. Biomass Conversion and Biorefinery, 14(14), 16425–16434.

Marchioni, I., Rodolfi, M., Najar, B., Ruffoni, B., Machado, J., & Pistelli, L. (2024). Phytonutritional compounds and antioxidant activity of eight new edible flowers. Natural Product Research, 38(21), 3728–3734.

Matyjaszczyk, E., & Śmiechowska, M. (2019). Edible flowers. Benefits and risks pertaining to their consumption. Trends in Food Science & Technology, 91, 670–674.

Mlcek, J., & Rop, O. (2011). Fresh edible flowers of ornamental plants: A new source of nutraceutical foods. Trends in Food Science & Technology, 22(10), 561–569.

Moliner, C., Barros, L., Dias, M. I., López, V., Langa, E., Ferreira, I. C. F. R., & Gómez-Rincón, C. (2018). Edible flowers of Tagetes erecta L. as functional ingredients: Phenolic composition, antioxidant and protective effects on Caenorhabditis elegans. Nutrients, 10(12), 2002.

Moliner, C., Barros, L., Dias, M. I., Reigada, I., Ferreira, I. C. F. R., López, V., Langa, E., & Gómez-Rincón, C. (2019). Viola cornuta and Viola × wittrockiana: Phenolic compounds, antioxidant and neuroprotective activities on Caenorhabditis elegans. Journal of Food and Drug Analysis, 27(4), 849–859.

Nowak, R., Olech, M., Pecio, L., Oleszek, W., Los, R., Malm, A., & Rzymowska, J. (2014). Cytotoxic, antioxidant, antimicrobial properties and chemical composition of rose petals. Journal of the Science of Food and Agriculture, 94(3), 560–567.

Nowicka, P., & Wojdyło, A. (2019). Anti-hyperglycemic and anticholinergic effects of natural antioxidant contents in edible flowers. Antioxidants, 8(8), 308.

Patil, S. A., Kulkarni, A. J., Jadhav, P. R., Yadav, R. S., Pagariya, M. C., Saha, T. N., Shaheer, T. P. A., Sarode, D. K., Sharma, A. K., Prasad, K. V., & Kawar, P. G. (2024). Potential assessment of Chrysanthemum flowers from various cultivars as sources of natural antioxidants and bioactive compounds. Genetic Resources and Crop Evolution, 72, 1599–1617.

Pires, E. O., Jr., Di Gioia, F., Rouphael, Y., Ferreira, I. C. F. R., Caleja, C., & Barros, L. (2021). The compositional aspects of edible flowers as an emerging horticultural product. Molecules, 26(22), 6940.

Pires, T. C. S. P., Barros, L., Santos-Buelga, C., & Ferreira, I. C. F. R. (2019). Edible flowers: Emerging components in the diet. Trends in Food Science & Technology, 93, 244–258.

Pires, T. C. S. P., Dias, M. I., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2017). Nutritional and chemical characterization of edible petals and corresponding infusions: Valorization as new food ingredients. Food Chemistry, 220, 337–343.

Pires, T. C. S. P., Dias, M. I., Barros, L., Calhelha, R. C., Alves, M. J., Oliveira, M. B. P. P., Santos-Buelga, C., & Ferreira, I. C. F. R. (2018). Edible flowers as sources of phenolic compounds with bioactive potential. Food Research International, 105, 580–588.

Purohit, V. K., Rana, C. S., Idrishi, M. S., Sharma, P., & Ghosh, M. (2021). Wild edible flowers of Indian Himalayan region: Their traditional uses and potential health benefits. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 17(1), 1–18.

Rivas-García, L., Navarro-Hortal, M. D., Romero-Márquez, J. M., Forbes-Hernández, T. Y., Varela-López, A., Llopis, J., Sánchez-González, C., & Quiles, J. L. (2020). Edible flowers as a health promoter: An evidence-based review. Trends in Food Science & Technology, 117, 46–59.

Rodrigues, H., Cielo, D. P., Goméz-Corona, C., Silveira, A. A. S., Marchesan, T. A., Galmarini, M. V., & Richards, N. S. P. S. (2017). Eating flowers? Exploring attitudes and consumers' representation of edible flowers. Food Research International, 100, 227–234.

Rop, O., Mlcek, J., Jurikova, T., Neugebauerova, J., & Vabkova, J. (2012). Edible flowers: A new promising source of mineral elements in human nutrition. Molecules, 17(6), 6672–6683.

Santana, D. C., Gomes, A. C. B., Pereira, A. C. H., Carvalho, A. R., Verdan, L. F. F., Lopes, L. O., Sousa, K. R., Romão, W., & Endringer, D. C. (2026). Nutritional and bioactive compound profiling of 13 ornamental and edible flowers supports their potential as functional ingredients in sustainable food systems. Sustainable Food Technology, 4, 2795.

Sogo, T., Terahara, N., Hisanaga, A., Kumamoto, T., Yamashiro, T., Wu, S., Sakao, K., & Hou, D. X. (2015). Anti-inflammatory activity and molecular mechanism of delphinidin 3-sambubioside, a Hibiscus anthocyanin. BioFactors, 41(1), 58–65.

Stefaniak, A., & Grzeszczuk, M. (2019). Nutritional and biological value of five edible flower species. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 47(1), 128–134.

Takahashi, J. A., Rezende, F. A. G. G., Moura, M. A. F., Dominguete, L. C. B., & Sande, D. (2020). Edible flowers: Bioactive profile

and its potential to be used in food development. Food Research International, 129, 108868.

Tian, Z., Jia, H., Jin, Y., Wang, M., Kou, J., Wang, C., Rong, X., Xie, X., Han, G., & Pang, X. (2019). Chrysanthemum extract attenuates hepatotoxicity via inhibiting oxidative stress in vivo and in vitro. Food & Nutrition Research, 63, 1667.

Torres-Ortiz, D. A., Eloy, R. D. L., & Dulce Maria, R. P. (2019). Vasorelaxing effect and possible chemical markers of the flowers of the Mexican Crataegus gracilior. Natural Product Research, 34(24), 3522–3525.

Wang, D., Zhao, X., & Liu, Y. (2017). Hypoglycemic and hypolipidemic effects of a polysaccharide from flower buds of Lonicera japonica in streptozotocin-induced diabetic rats. International Journal of Biological Macromolecules, 102, 396–404.

Xiao, Y., Qian, W., Fan, S., Han, X., Wang, F., Hu, Y., Chen, S., Hu, H., & Gao, S. (2026). Comparative study on the differences of non-volatile and volatile compounds in ten edible flower teas: An integrated multi-omics, molecular-docking and machine-learning approach. LWT, 242, 119121.

Xiong, L., Yang, J., Jiang, Y., Lu, B., Hu, Y., Zhou, F., Mao, S., & Shen, C. (2014). Phenolic compounds and antioxidant capacities of 10 common edible flowers from China. Journal of Food Science, 79(4), C517–C525.

Zhang, X. K., Cao, G. H., Bi, Y., Liu, X. H., Yin, H. M., Zuo, J. F., Xu, W., Li, H. D., He, S., & Zhou, X. H. (2023). Comprehensive analysis of 34 edible flowers by the determination of nutritional composition and antioxidant capacity planted in Yunnan Province China. Molecules, 28(13), 5260.

Zheng, J., Yu, X., Maninder, M., & Xu, B. (2018). Anthocyanin profile and chromatic characteristics of edible flowers: Relationship with radical scavenging activity. Food Chemistry, 245, 987–995.

BÖLÜM 3

BİTKİ-BÖCEK ETKİLEŞİMİNDE ALLELOKİMYASALLARIN ROLÜ

MİNE DEMİR[1] EMİNE SEMA ÇETİN[2]

[1] Yozgat Bozok Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri Bölümü,
Orcid: 0009-0006-1022-6216
[2] Prof. Dr. Yozgat Bozok Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri Bölümü,
Orcid: 0000-0001-7601-8491

BİTKİ–BÖCEK ETKİLEŞİMİNDE ALLELOKİMYASALLARIN ROLÜ

MİNE DEMİR[1] **EMİNE SEMA ÇETİN**[2]

Giriş

Bitkiler ile böcekler arasındaki etkileşimler, kara ekosistemlerinin evrimsel tarihinde uzun süredir devam eden ve oldukça karmaşık yapıda olan biyolojik ilişkilerdendir. Herbivor böcekler, bitkilerin yaprak, gövde, kök, çiçek ve tohum gibi farklı dokularını tüketerek bitkilerde ciddi biyotik stres yaratmaktadır. Bu karşılıklı etkileşim, milyonlarca yıl boyunca süregelen bir koevrimsel yarışın temelini oluşturur. Bitkiler zamanla çeşitli savunma stratejileri geliştirirken, böcekler de bu savunmaları aşabilmek için farklı adaptasyonlar kazanmıştır (Ehrlich ve Raven, 1964; Schoonhoven vd., 2005).

Bitkilerin savunma mekanizmaları temel olarak fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki ana başlıkta toplanır. Diken, kalın

[1] Yozgat Bozok Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri Bölümü, Orcid: 0009-0006-1022-6216
[2] Prof. Dr. Yozgat Bozok Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri Bölümü, Orcid: 0000-0001-7601-8491

kutikula, tüy yapısı ve lignifiye dokular, bitkilerin fiziksel savunma unsurlarını oluştururken sekonder metabolitlerin üretimi ise birer kimyasal savunma olayıdır. Bu tür biyokimyasal bileşikler genel olarak "allelokimyasallar" olarak adlandırılmaktadır. Fraenkel (1959)'in bu alandaki öncü çalışmasından bu yana, sekonder metabolitlerin artık sadece bir metabolik artık olmadığı, aynı zamanda ekolojik işlevlere sahip aktif bileşikler olduğu genel kabul görmüştür.

Allelokimyasallar, bir organizma tarafından sentezlenen ve diğer organizmaların fizyolojisi, davranışı, büyümesi veya gelişimi üzerinde doğrudan etkili olabilen biyolojik olarak aktif bileşiklerdir. Bitki-böcek etkileşimlerinde, bu bileşiklerin herbivor böceklerin beslenme tercihleri, konukçu seçimi, yumurtlama davranışları ve gelişim süreçleri gibi pek çok aşamada etkili olduğu bilinmektedir. Son yıllarda yapılan kimyasal ekoloji araştırmaları, allelokimyasalların böceklerle kurulan ilişkinin her aşamasını şekillendirdiğini, böceği beslenmeden caydırmadan doğal düşmanların çekilmesine, sinyal iletiminden koevrimsel dinamiklere kadar çok boyutlu bir rol oynadığını göstermektedir (Kessler ve Baldwin, 2001; Heil ve Karban, 2010).

Bitkilerin salgıladığı HIPV (Herbivore-Induced Plant Volatiles) adı verilen uçucu bileşikler, parazitoid ve predatör böcekleri kendilerine çekerek bitkinin dolaylı savunma kapasitesini artırırlar. Böylece allelokimyasallar, yalnızca bitki ile herbivor arasındaki ilişkileri değil, aynı zamanda tritrofik etkileşimleri de yönlendirmektedir (Turlings vd., 1990; Dicke ve Sabelis, 1988). Son yıllarda bu bileşikler, sürdürülebilir tarımda giderek daha fazla önem kazanmakta ve bitkisel kaynaklı biyopestisitlerin geliştirilmesinde kilit rol oynamaktadır (Isman, 2006).

Şekil 1: Allelokimyasalların bitki–böcek etkileşimlerindeki genel işlev şeması



Kaynak: Görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

Allelokimyasalların Tanımı ve Tarihçesi

Allelokimyasallar, bir organizma tarafından sentezlenen ve diğer organizmalar üzerinde biyolojik etki oluşturan bileşiklerdir. Organizmalar arası kimyasal iletişimin temel bileşenlerinden olup ekosistemlerde türler arası ilişkilerin düzenlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Whittaker ve Feeny (1971), bu bileşikleri sınıflandırmış ve ekolojik işlevleri ön plana alan bir çerçeve geliştirmiştir. Allelokimyasalların en önemli özelliklerinden biri, çok düşük konsantrasyonlarda bile yüksek biyolojik aktivite gösterebilmeleridir. Rice (1984), allelopatik etkilerini toksisite, beslenme baskılanması, davranış değişimi, gelişim inhibisyonu ve dolaylı savunma aracılığıyla doğal düşman çekimi olmak üzere beş temel kategoride değerlendirmiştir.

Allelopatik etkiler ilk olarak antik çağlarda gözlemlenmiştir. Theophrastus (yaklaşık M.Ö. 300), bazı bitkilerin komşu bitkilerin

büyümesini engellediğini belirtmiş; Romalı bilimciler ise ceviz ağacının, çevresindeki bitkiler üzerindeki baskısını göstermiştir. De Candolle (1832), kök salgılarının bitki gelişimini etkileyebileceğini öne sürerek modern allelopati araştırmalarının öncülüğünü yapmıştır. 20. Yy'ın ikinci yarısında kimyasal ekolojinin bilimsel bir disiplin olarak ortaya çıkmasıyla, allelokimyasalların bitki-böcek etkileşimlerindeki rolü daha sistematik biçimde incelenmeye başlanmıştır. Fraenkel (1959)'in sekonder metabolitlerin evrimsel işlevine dair yayımladığı makalesi yeni bir bakış açısı kazandırmıştır. Ehrlich ve Raven (1964) ise bitkiler ile kelebekler arasındaki ilişkiye dayalı eş-evrimsel silahlanma yarışı modelini geliştirmiştir.

Şekil 2: Allelokimyasalların sınıflandırılması ve bitki–böcek etkileşimlerindeki genel işlev şeması



Kaynak: Rice, 1984; Whittaker ve Feeny, 1971'den uyarlanmıştır. Kullanılan görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

Rice (1984)'ın kapsamlı derlemesiyle, bu alan sistematik ve bağımsız bir bilim dalı kimliği kazanmıştır. Günümüzde kimyasal

ekoloji; böcek davranışları, konukçu seçimi, tritrofik ilişkiler, savunma sinyalleri ve türler arası kimyasal iletişim gibi pek çok başlığı kapsayacak şekilde genişlemiştir.

Allelokimyasalların Sınıflandırılması ve Kimyasal Özellikleri

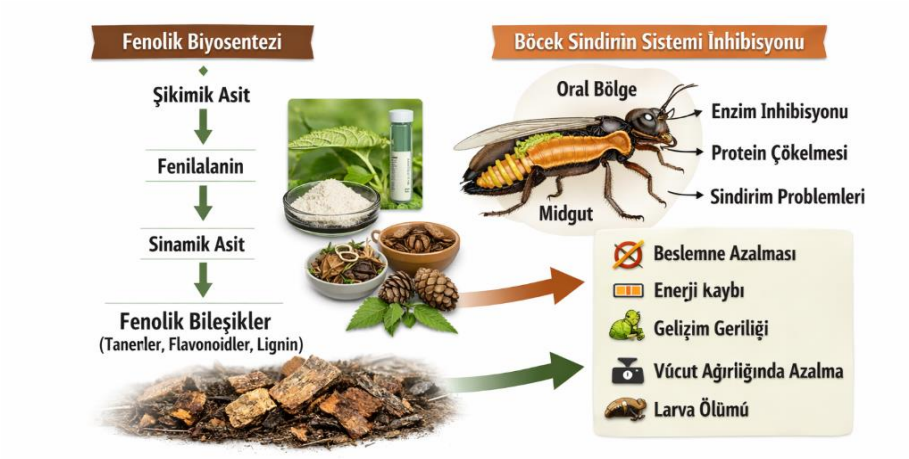
Allelokimyasallar, bitkiler tarafından sentezlenen ve canlılar arasındaki etkileşimlerde önemli rol oynayan sekonder metabolitlerdir. Primer metabolitlerin aksine, doğrudan büyüme ve enerji metabolizmasında görev üstlenmezler; bunun yerine, bitkilerin savunması, çevreye uyum sağlaması ve diğer organizmalarla iletişimi gibi süreçlerde işlev görürler. Farklı kimyasal yapılara sahip olan bu bileşikler, bazı bitkilerde toplam kuru ağırlığın %20-30'una kadar ulaşabilmektedir (Hartmann, 2007).

Başlıca Allelokimyasallar

Fenolik Bileşikler

Fenolik bileşikler, bitkilerde en yaygın şekilde bulunan sekonder metabolit gruplarından biridir ve savunma mekanizmalarının önemli bir parçasını oluşturur. Özellikle kondanse taninler, böceklerin sindirim sistemindeki proteolitik enzimleri inhibe ederek, proteinlerin biyoyararlanımını belirgin şekilde azaltır. Ryan'ın (1990) çalışmaları, bitkisel tripsin inhibitörlerinin, bir herbivor saldırısının ardından 30-90 dakika gibi kısa bir sürede yaprak dokularında hızla biriktiğini ortaya koymuştur. Bunun yanında, DIMBOA adlı bileşik ise buğday ve mısır bitkilerinde sürgün bitine (*Rhopalosiphum padi*) karşı güçlü bir inhibitör etki göstermektedir (Niemeyer, 2009).

Şekil 3: Fenolik bileşiklerin biyosentezi ve inhibisyon mekanizması



Kaynak: Ryan, 1990'dan uyarlanmıştır. Kullanılan görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

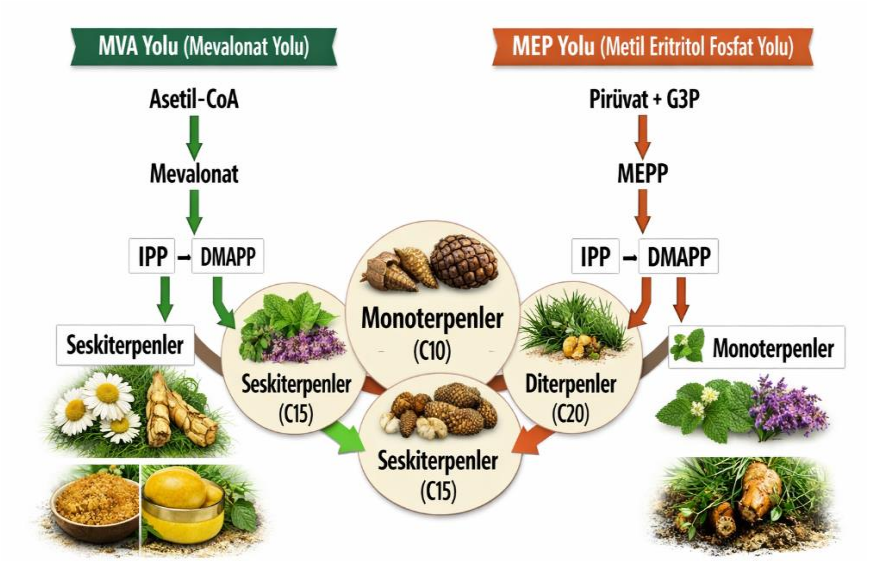
Tablo 1. Başlıca fenolik bileşikler, kaynakları ve böcek üzerindeki etkileri

Fenolik Bileşik	**Kimyasal Özellik / Kaynak**	**Böcek Üzerindeki Etkisi**
Ferulik asit	Hücre duvarı öncüsü; Triticum, mısır	Larva gelişimini yavaşlatır; beslenmeyi azaltır (Bennett ve Wallsgrove, 1994)
Tanenler	Odunsu bitkiler, Quercus spp.	Proteazları inhibe eder; besin biyoyararlılığını azaltır (Karban ve Baldwin, 1997)
Klorojenik asit	Patates, kahve, elma	Larval gelişimi geciktirir; polifenol oksidaz aktivasyonunu tetikler (Bhonwong vd., 2009)
DIMBOA	Mısır, Triticum	Sürgün bitine karşı güçlü inhibitör etki gösterir (Niemeyer, 2009)

Terpenoidler

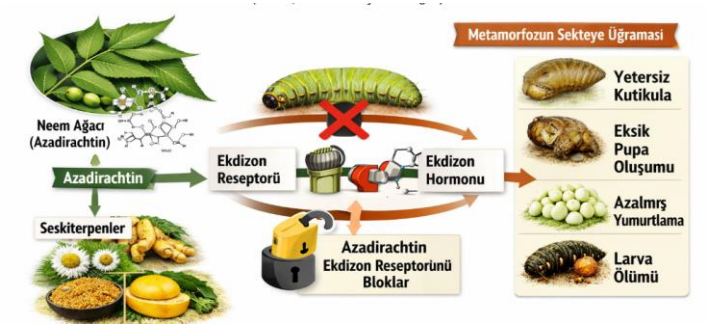
Bitkiler aleminin en geniş sekonder metabolitleridir. Azadirachtin, böcek ekdizon biyosentezini inhibe ederek larva-pupa dönüşümü engeller. 100'den fazla zararlıya karşı etkisi kanıtlanmış önemli botanik insektisitlerden biridir (Isman, 2006).

Şekil 4: Terpenoid biyosentez yolakları



Kaynak: Wink, 2010'dan uyarlanmıştır. Kullanılan görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

Şekil 5: Azadirachtin'in böcek endokrin sistemi üzerindeki etkisi.



Kaynak: Isman, 2006'dan uyarlanmıştır. Kullanılan görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

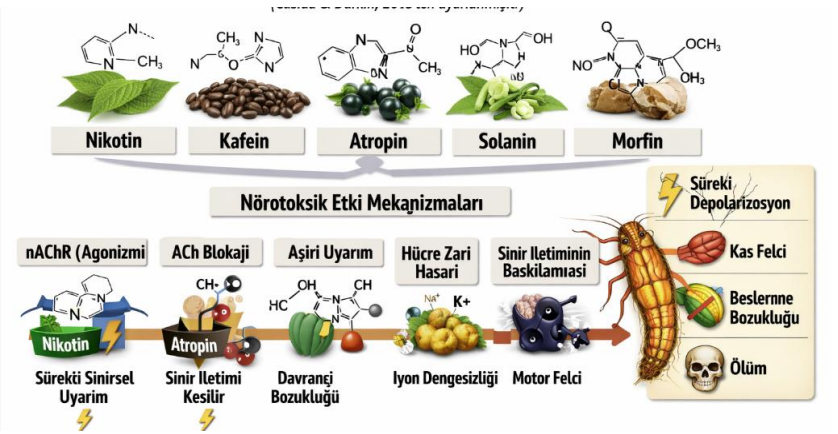
Tablo 2. Başlıca terpenoidler, kaynak bitkileri ve böcek üzerindeki etkileri

Terpenoid	**Kaynak**	**Etki Mekanizması**
Azadirachtin	Neem (*Azadirachta indica*)	Ekdizon antagonizmi; IGR etkisi; pupa oluşumu %80 inhibisyon (Isman, 2006)
Mentol	Nane	Olfaktör kaçınma; repellent etki
Limonen	Narenciye türleri	AChE inhibisyonu; fumigant nörotoksisite
(E)-β-Farnesen	Buğday, elma	Afid alarm feromonu taklidi; *Myzus persicae* kaçınması (Pickett vd., 1992)

Alkaloidler

Alkaloidler, azot içeren heterosiklik bileşiklerdir. Çoğu güçlü fizyolojik aktiviteye sahiptir. Nikotin (*Nicotiana tabacum*), nikotinik asetilkolin reseptörlerini (nAChR) agonist olarak bağlayarak nöronal depolarizasyona yol açmakta; tremor, paraliz ve ölümle sonuçlanmaktadır (Casida ve Durkin, 2013).

Şekil 6: Başlıca alkaloidlerin yapısı ve böcek sinir sistem üzerindeki nörotoksik etki mekanizmaları

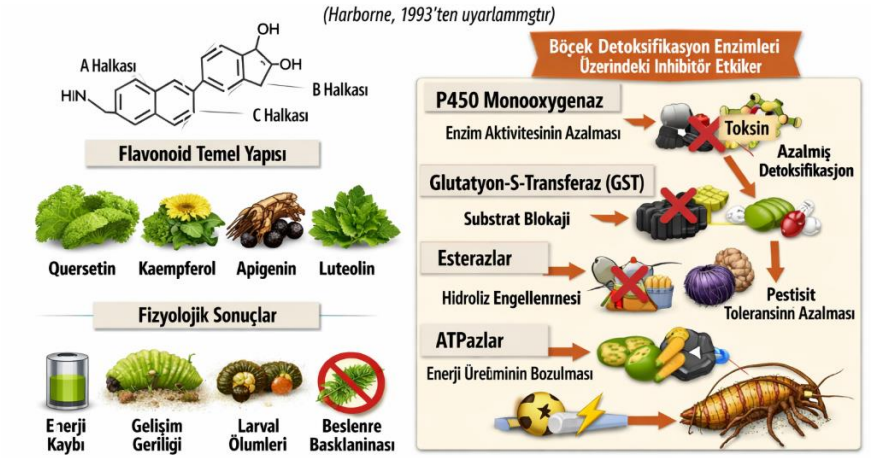


Kaynak: Casida ve Durkin, 2013'ten uyarlanmıştır. Kullanılan görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

Flavonoidler

Flavonoidler, bitkilerde renk oluşumu, UV koruması ve savunma mekanizmalarında görev alan polifenolik maddelerdir. Quercetin ve rutin, birçok Lepidoptera türünde larval büyüme inhibisyonuna yol açmaktadır. Bazı flavonoidlerin böcek sitokrom P450 enzimlerini inhibe ederek detoksifikasyon kapasitesini azalttığı bildirilmiştir (Harborne, 1993).

Şekil 7: Flavonoidlerin temel yapısı ve böcek detoksifikasyon enzimleri üzerindeki inhibitör etkileri

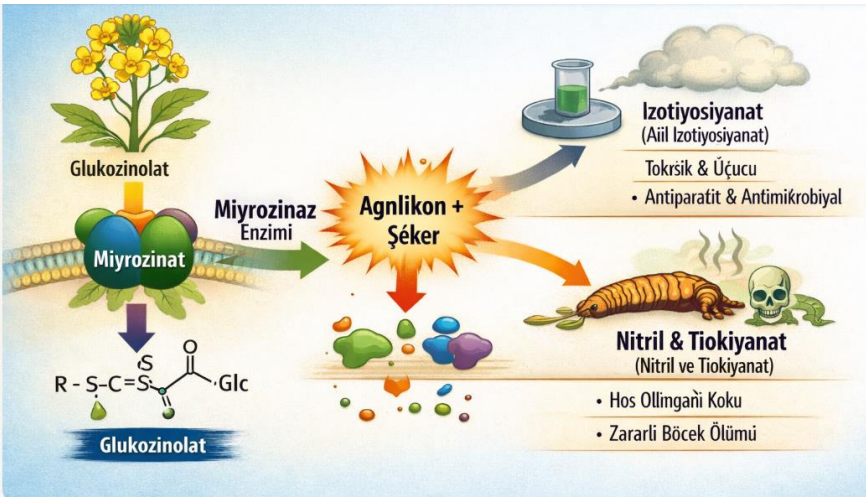


Kaynak: Harborne, 1993'ten uyarlanmıştır. Kullanılan görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

Glukozinolatlar

Glukozinolatlar, kükürt içeren glikozitler olup özellikle Brassicaceae familyasında yoğun biçimde bulunmaktadır. Doku hasarı oluştuğunda miyrozinaz enzimi aracılığıyla izotiyosiyanatlara dönüşerek toksik etki gösterirler. Paradoks olarak uzmanlaşmış herbivorlar (Pieris spp.) glukozinolatları konak tanıma sinyali olarak kullanmaktadır (Gatehouse, 2002).

Şekil 8: Glukozinolatların miyrozinaz aracılığıyla aktif savunma bileşiklerine dönüşümü



Kaynak: Gatehouse, 2002'den uyarlanmıştır. Kullanılan görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

Allelopatik Maddelerin Salınım Yolları

Bitkiler allelokimyasalları çevreye dört temel yol aracılığıyla aktarır.

Kök Salgıları

Bitkiler köklerden düşük moleküler ağırlıklı organik asitler, fenolik bileşikler ve aminoasitleri toprak çözeltisine salgılar. Bu salgılar rizosfer mikrobiyomunu şekillendirerek dolaylı yoldan toprak kaynaklı böcek zararlılarını da etkileyebilmektedir (Inderjit ve Duke, 2003).

Yaprak Yıkanması

Yağmur damlacıkları ve çiğ, yaprak yüzeyinde birikmiş uçucu ve yarı-uçucu bileşikleri süzerek toprak yüzeyine taşır.

Uçucu Organik Bileşikler (VOC/HIPV)

Atmosfere yayılan HIPV'ler, parazitoid ve predatör böcekleri çekerek tritrofik savunma ağlarını aktive ederler (Turlings vd., 1990). HIPV emisyonu saldırıdan hemen sonra başlayabilir ve komşu bitkiler bu sinyaller ile kendi savunma genlerini önceden aktive edebilirler (Heil ve Karban, 2010).

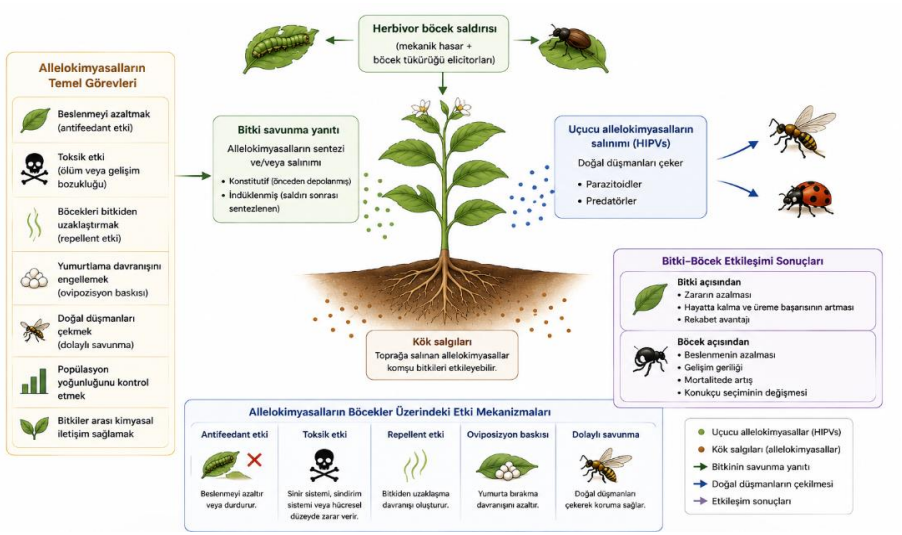
Bitki Artıklarının Ayrışması

Ölen bitki dokularının mikrobiyolojik ayrışması sırasında serbest kalan fenolik asitler ve terpenik bileşikler toprak kaynaklı herbivorlara karşı baskı oluşturabilmektedir (Rice, 1984).

Bitki–Böcek Etkileşimlerinde Allelokimyasalların Rolü

Bitkilerin herbivor saldırılarına karşı kimyasal savunma sistemleri ile karşı koyarlar. Allelokimyasallar doğrudan/dolaylı etkileri ile bu savunmanın merkezinde yer alır (Karban ve Baldwin, 1997; War vd., 2012).

Şekil 9: Bitki–böcek kimyasal etkileşimlerinin genel şeması



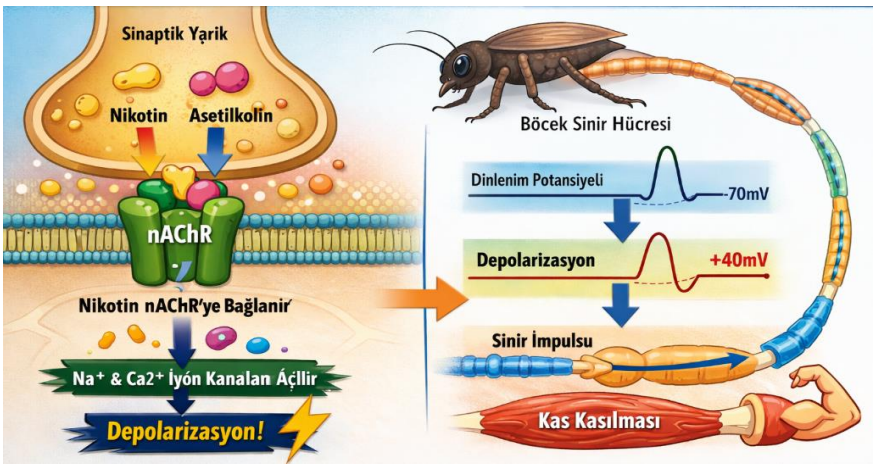
Kaynak: Araştırma sürecinde kullanılan görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

Konstitütif ve İndüklenmiş Savunma

Konstitütif Savunma

Konstitütif savunma, herbivor saldırısından bağımsız olarak bitki dokularında sürekli bulunan kimyasal bileşikleri kapsar. Bu savunma sistemi bitkinin hızlı yanıt vermesini sağlamakla birlikte enerji maliyeti yüksektir. Tütün bitkisinde sürekli sentezlenen nikotin, buğdaydaki DIMBOA ve meşe ağaçlarındaki yoğun tanin içeriği bu savunmanın başlıca örneklerindendir (Schoonhoven vd., 2005).

Şekil 10: Nikotin'in nAChR üzerindeki etki mekanizması ve böcek sinir sistemindeki depolarizasyon süreci

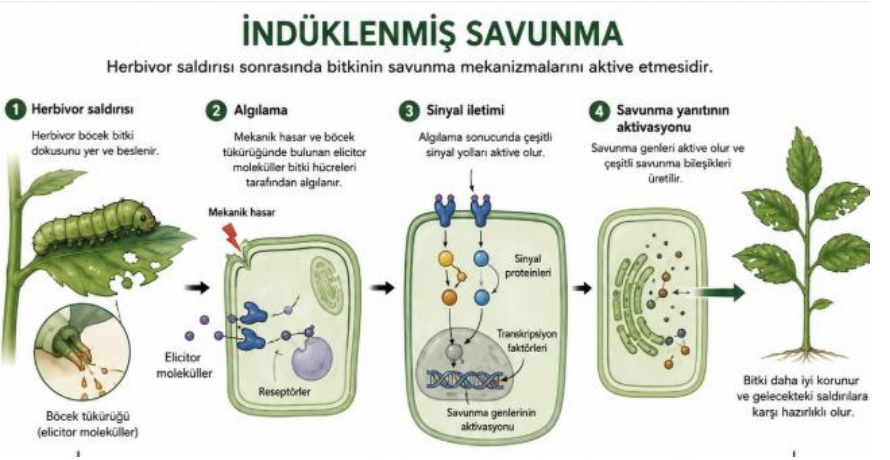


Kaynak: Casida ve Durkin, 2013'ten uyarlanmıştır. Kullanılan görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

İndüklenmiş Savunma

İndüklenmiş savunma, bitkilerin böcek saldırısı sonrasında hızla devreye aldığı dinamik savunma tepkileridir. Böceğin tükürüğünde bulunan elisitör moleküller, bitkide jasmonat sinyal yolunu tetiklemekte, bu sinyal ağı ile proteinaz inhibitörleri, taninler, terpenoidler ve uçucu bileşikler kısa sürede sentezlenmektedir (Howe ve Jander, 2008; Erb ve Reymond, 2019).

Şekil 11: İndüklenmiş savunma mekanizmasının aktivasyon süreci

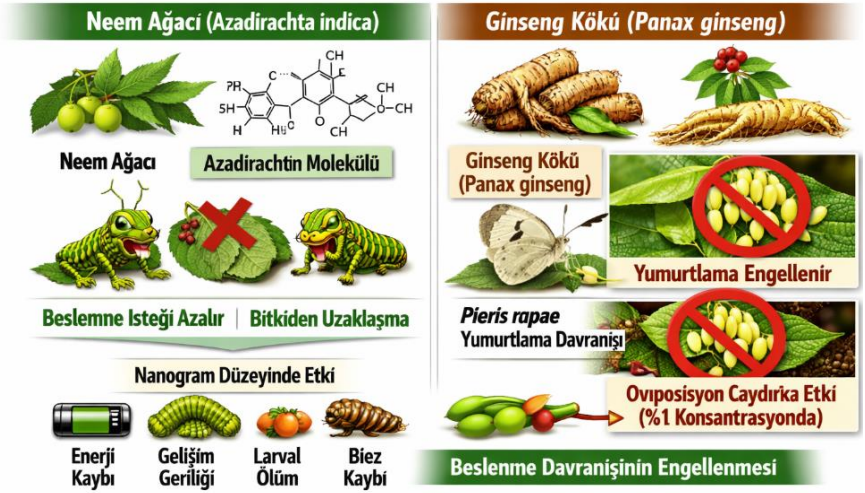


Kaynak: Howe ve Jander, 2008'den uyarlanmıştır. Kullanılan görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

Antifeedant Etki

Antifeedant etki, herbivor böceklerin bitkileri tüketmesini azaltan ya da tamamen engelleyen kimyasal savunma mekanizmalarını ifade eder. Azadirachtin maddesi, çekirgeler, tırtıllar ve pek çok zararlı böcek türünde, nanogram seviyesinde bile son derece güçlü bir antifeedant etki gösterebilmektedir. Zhang vd. (2017) çalışmalarında toplam ginsenozidlerin %1,0'lik konsantrasyonda *Pieris rapae* türü üzerinde belirgin bir ovipozisyon caydırıcı aktiviteye sahip olduğu raporlanmıştır.

Şekil 12: Antifeedant Etki Mekanizması



Kaynak: Kullanılan görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

Repellent Etki ve Ovipozisyon Baskılanması

Repellent etki, böceklerin belirli bitkilerden uzaklaşmasına yol açan kimyasal savunma mekanizmalarını ifade eder. Bitkilerin salgıladığı uçucu organik bileşikler, böceklerin antenlerindeki koku reseptörlerini etkileyerek, zararlının o bitkiyi tercih etmemesine neden olabilir. Bruce vd. (2005), şeftali yaprak bitinin (*Myzus persicae*) mentol ve limonen gibi monoterpenlere karşı güçlü bir koku tepkisi gösterdiğini ortaya koymuştur.

Savunma metabolitleri yönünden zengin bitkiler genellikle dişi böcekler tarafından yumurta bırakmak için uygun bulunmaz ve reddedilir. Ancak burada ilginç bir durum da söz konusudur: Glukozinolatlar, genelci (generalist) herbivorlar için caydırıcı etkiye sahipken, *Pieris brassicae* gibi bu bileşiklere uyum sağlamış uzman türler için güçlü bir yumurtlama uyarıcısı olarak işlev görebilmektedir (Gatehouse, 2002).

Şekil 13: Repellent Etki ve Ovipozisyon Baskılanması



Kaynak: Kullanılan görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

Dolaylı Savunma ve Tritrofik Etkileşimler

Dicke ve Sabelis (1988) ve Turlings vd. (1990) tarafından ortaya konan tritrofik etkileşim modelinde herbivor saldırısına maruz kalan bitki, özgün bir HIPV karışımı salgılayarak parazitoid yaban arılarını ve predatör böcekleri cezp etmektedir. Parazitoid arı *Cotesia marginiventris*, herbivor saldırısına maruz kalan mısır bitkisinin HIPV'lerine hasarsız kontrole kıyasla 3-5 kat daha güçlü oryantasyon tepkisi vermiştir. Komşu bitkiler HIPV'leri alarak kendi savunma genlerini önceden aktive etmektedir (Heil ve Karban, 2010).

Şekil 14: Dolaylı savunma ve Tritrofik etkileşim



Kaynak: Araştırma sürecinde kullanılan görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

Bitki Savunma Sinyalizasyonu ve Moleküler Mekanizmalar

Jasmonat Yolağı

Jasmonat sinyal yolu, bitkilerin herbivor saldırılarına karşı en hızlı savunma yanıtlarını koordine eden başlıca mekanizmalardan biridir. Böceklerin beslenmesiyle oluşan doku hasarı sonucu, α-linolenik asit oksilipid yolu üzerinden jasmonik asite (JA) dönüşür. Ardından JA-Ile, JAZ adlı baskılayıcı proteinleri COI1 aracılığıyla parçalayarak MYC2 transkripsiyon faktörünün aktif hale gelmesini sağlar. Bu zincirleme süreç, proteinaz inhibitörü genleri, terpen sentaz genleri ve antifeedant bileşiklerin sentezinden sorumlu genlerin ekspresyonunu hızla tetikler (Erb ve Reymond, 2019; Wasternack ve Song, 2017).

Şekil 15: Jasmonat sinyalizasyonu yolağının şematik gösterimi.



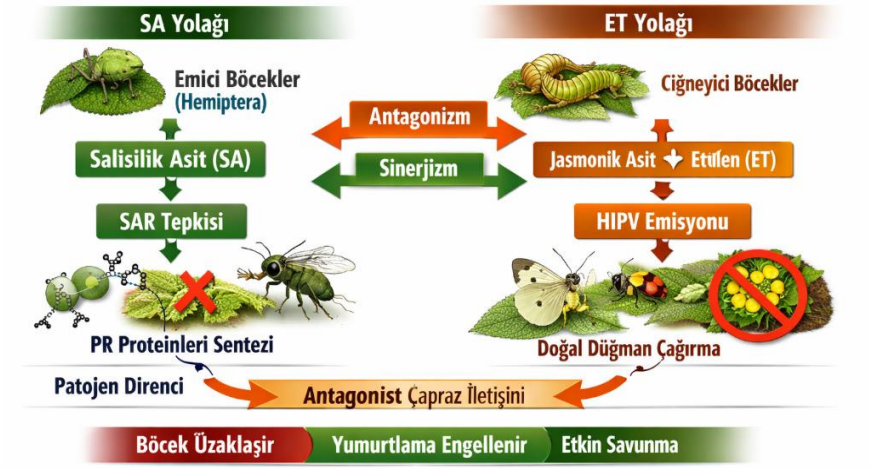
Kaynak: Erb ve Reymond, 2019'dan uyarlanmıştır. Kullanılan görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

Salisilik Asit ve Etilen Yolakları

Salisilik asit (SA) sinyal yolu, özellikle emici ağız yapısına sahip böcekler (Hemiptera) tarafından uyarılır ve bu yol üzerinden başlatılan sistemik edinilmiş direnç (SAR), PR proteinlerinin sentezlenmesini tetikler. JA ve SA sinyal yolları arasındaki karşılıklı (antagonist) etkileşim sayesinde, bitki saldırının tipine göre savunma kaynaklarını en uygun yanıt mekanizmasına yönlendirebilir (Howe ve Jander, 2008). Öte yandan, etilen (ET) ise

JA ile birlikte çalışarak HIPV (Herbivore-Induced Plant Volatiles) salınımını artırır.

Şekil 16: Salisilik Asit ve Etilen Yolakları

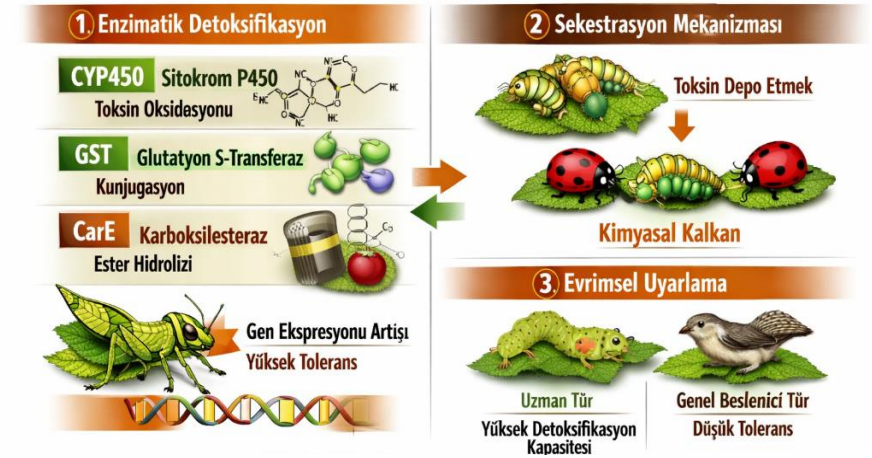


Kaynak: Kullanılan görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

Böcekte Detoksifikasyon Mekanizmaları

Böcekler, allelokimyasallara uzun süreli maruz kalmanın evrimsel bir sonucu olarak, sitokrom P450 monooksigenazlar (CYP), glutatyon S-transferazlar (GST) ve karboksilesterazlar gibi çeşitli enzim sistemleri geliştirmiştir. Li vd. (2004)'ne göre uzmanlaşmış herbivor türlerde CYP6 geninin ekspresyonu, genelci beslenicilere göre belirgin şekilde daha yüksektir. Ayrıca, bazı böcek türleri ise aldıkları allelokimyasalları vücutlarında depolayarak kendi savunma sistemlerinde bu bileşikleri kullanabilmektedir (Opitz ve Müller, 2009).

Şekil 17: Böcekte Detoksifikasyon Mekanizmaları



Kaynak: Kullanılan görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

Tarımsal Önemi ve Uygulamaları

Biyopestisit Geliştirme

Sentetik pestisitlerin çevreye yönelik riskleri ve böceklerde hızla gelişen direnç, doğal kaynaklı biyopestisitlere olan ilgiyi her geçen gün artırmaktadır. Özellikle azadirachtin içeren preparatlar, bugün 100'den fazla ülkede tescillenmiş olup organik tarım uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, Rotenon (Lonchocarpus spp.), piretrin (*Chrysanthemum cinerariaefolium*) ve quassin (*Quassia amara*) gibi bitkisel kökenli insektisitler de önemli alternatifler arasında yer almaktadır (Isman, 2006).

Entegre Zararlı Yönetimi (IPM)

Allelopatik özelliği yüksek refakatçi bitkiler zararlı popülasyonlarını azaltırken faydalı böcek biyoçeşitliliğini artırabilmektedir. Tuzak bitkiler allelokimyasal çekim sinyali yayarak zararlıları kültür bitkisinden uzaklaştırmaktadır. Biyoteknolojik yaklaşımlar -CRISPR-Cas9, RNAi- ise bitkisel

savunma metabolitlerinin güçlendirilmesi için yeni olanaklar sunmaktadır (Erb ve Reymond, 2019).

Tablo 3. Tarımsal IPM uygulamalarında kullanılan başlıca allelokimyasal temelli stratejiler

Strateji	**Mekanizma**	**Örnek Uygulama**
Tuzak bitki	Allelokimyasal çekici sinyal	Napier çimi–börülce push-pull (Schoonhoven vd., 2005)
Botanik insektisit	Direkt toksisite + IGR etkisi	Azadirachtin; piretrin; rotenon (Isman, 2006)
Allelopatik çeşit ıslahı	Arttırılmış konstitütif savunma	IRRI yüksek fenol içerikli çeltik (Inderjit ve Duke 2003)
Transgenik / RNAi	Hedef böcekte gen susturma	Bt bitkisi; CYP gen susturma (Erb ve Reymond 2019)

Ekolojik Sonuçlar ve Evrimsel Bağlam

Ehrlich ve Raven (1964), bitki-böcek etkileşimini bir eş-evrimsel silahlanma yarışı olarak tanımlamıştır. Buna göre, bitkiler yeni kimyasal savunmalar geliştirdikçe, bazı böcek türleri de bu savunmaları aşacak adaptasyonlar kazanmakta ve bu süreç, türlerin çeşitlenmesine (adaptif radyasyona) yol açmaktadır. Böcekler, sitokrom P450 ve GST gibi detoksifikasyon enzimleri sayesinde allelokimyasalları etkisiz hale getirebilirken, bazı türler ise bu bileşikleri vücutlarında depolayıp kendi savunmalarında kullanabilmektedir (Li vd., 2004; Opitz ve Müller, 2009). Ayrıca, allelokimyasalların herbivor populasyon dinamiklerini şekillendirerek ekosistemde biyoçeşitlilik dengesinin korunmasına katkı sağladığı da bilinmektedir (Stamp, 2003).

Sonuç

Allelokimyasallar, milyonlarca yıllık eş-evrimsel baskı altında şekillenmiş ve böcekler üzerinde son derece çok katmanlı etkiler oluşturan sekonder metabolitlerdir. Bu bileşikler; böceklerin

sinir, sindirim, endokrin ve üreme sistemlerini doğrudan hedef alarak, HIPV sinyalleri aracılığıyla doğal düşmanları çekerek ve komşu bitkileri önceden uyararak ekolojik düzeyde belirleyici rol oynamaktadır.

Allelopatik mekanizmaların moleküler çerçevesinin aydınlatılması; yeni nesil biyopestisitlerin tasarımını, IPM programlarının güçlendirilmesini ve sürdürülebilir tarım sistemlerinin inşasını doğrudan destekleyecektir. Omik teknolojiler, CRISPR-Cas9 ve yapay zekâ destekli metabolit analizinin bu alana entegrasyonu, önümüzdeki yılların en kritik araştırma gündemlerinden birini oluşturmaya devam edecektir (Erb ve Reymond, 2019; Agrawal, 2011).

Kaynakça

Agrawal, A. A. (2011). Current trends in the evolutionary ecology of plant defence. *Functional Ecology*, 25(3), 420–432. https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2010.01796.x

Bennett, R. N., & Wallsgrove, R. M. (1994). Secondary metabolites in plant defence mechanisms. *New Phytologist*, 127(4), 617–633. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1994.tb02968.x

Bhonwong, A., Stout, M. J., Attajarusit, J., & Tantasawat, P. (2009). Defensive role of tomato polyphenol oxidases against cotton bollworm and beet armyworm. *Journal of Chemical Ecology*, 35(1), 28–38. https://doi.org/10.1007/s10886-008-9571-7

Bruce, T. J. A., Wadhams, L. J., & Woodcock, C. M. (2005). Insect host location: A volatile situation. *Trends in Plant Science*, 10(6), 269–274. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2005.04.003

Casida, J. E., & Durkin, K. A. (2013). Neuroactive insecticides: Targets, selectivity, resistance, and secondary effects. *Annual Review of Entomology*, 58, 99–117. https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120811-153645

De Candolle, A. P. (1832). Physiologie végétale (Cilt 3). Béchet Jeune.

Dicke, M., & Sabelis, M. W. (1988). How plants obtain predatory mites as bodyguards. *Netherlands Journal of Zoology*, 38, 148-165. https://doi.org/10.1163/156854288x00111

Ehrlich, P. R., & Raven, P. H. (1964). Butterflies and plants: A study in coevolution. *Evolution,* 18(4), 586–608. https://doi.org/10.2307/2406212

Erb, M., & Reymond, P. (2019). Molecular interactions between plants and insect herbivores. *Annual Review of Plant Biology,* 70, 527–557. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-095910

Fraenkel, G. S. (1959). The raison d'être of secondary plant substances. *Science,* 129(3361), 1466–1470. https://doi.org/10.1126/science.129.3361.1466

Gatehouse, J. A. (2002). Plant resistance towards insect herbivores: A dynamic interaction. *New Phytologist*, 156(2), 145–169. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00519.x

Harborne, J. B. (1993). Introduction to ecological biochemistry (4. baskı). Academic Press.

Hartmann, T. (2007). From waste products to ecochemicals: Fifty years research of plant secondary metabolism. *Phytochemistry,* 68(22–24), 2831–2846. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2007.09.017

Heil, M., & Karban, R. (2010). Explaining evolution of plant communication by airborne signals. *Trends in Ecology & Evolution,* 25(3), 137–144. https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.09.010

Howe, G. A., & Jander, G. (2008). Plant immunity to insect herbivores. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 41–66. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092825

Inderjit, & Duke, S. O. (2003). Ecophysiological aspects of allelopathy. *Planta,* 217(4), 529–539. https://doi.org/10.1007/s00425-003-1054-z

Isman, M. B. (2006). Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture. *Annual Review of Entomology,* 51, 45–66. https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151146

Karban, R., & Baldwin, I. T. (1997). Induced responses to herbivory. University of Chicago Press. https://doi.org/10.7208/chicago/9780226424972.001.0001

Kessler, A., & Baldwin, I. T. (2001). Defensive function of herbivore-induced plant volatile emissions in nature. *Science,* 291(5511), 2141–2144. https://doi.org/10.1126/science.291.5511.2141

Li, X., Schuler, M. A., & Berenbaum, M. R. (2004). Molecular mechanisms of metabolic resistance to synthetic and natural xenobiotics. *Annual Review of Entomology,* 52, 231–253. https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151104

Niemeyer, H. M. (2009). Hydroxamic acids derived from 2(3)-hydroxyl-2H-1,4-benzoxazin-3(4H)-ones: Key defense chemicals of cereals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 57(5), 1677–1696. https://doi.org/10.1021/jf8034034

Opitz, S. E., & Müller, C. (2009). Plant chemistry and insect sequestration. *Chemoecology,* 19(3), 117–154. https://doi.org/10.1007/s00049-009-0018-6

Pickett, J. A., Wadhams, L. J., & Woodcock, C. M. (1992). The chemical ecology of aphids. *Annual Review of Entomology,* 37, 67–90. https://doi.org/10.1146/annurev.en.37.010192.000435

Rice, E. L. (1984). Allelopathy (2. baskı). Academic Press.

Ryan, C. A. (1990). Protease inhibitors in plants: Genes for improving defenses against insects and pathogens. *Annual Review of Phytopathology,* 28(1), 425–449. https://doi.org/10.1146/annurev.py.28.090190.002233

Schoonhoven, L. M., van Loon, J. J. A., & Dicke, M. (2005). Insect-plant biology (2. baskı). Oxford University Press.

Stamp, N. (2003). Out of the quagmire of plant defense hypotheses. *Quarterly Review of Biology,* 78(1), 23–55. https://doi.org/10.1086/367580

Turlings, T. C. J., Tumlinson, J. H., & Lewis, W. J. (1990). Exploitation of herbivore-induced plant odors by host-seeking parasitic wasps. *Science,* 250(4985), 1251–1253. https://doi.org/10.1126/science.250.4985.1251

War, A. R., Paulraj, M. G., Ahmad, T., Buhroo, A. A., Hussain, B., Ignacimuthu, S., & Sharma, H. C. (2012). Mechanisms of plant defense against insect herbivores. *Plant Signaling & Behavior,* 7(10), 1306–1320. https://doi.org/10.4161/psb.21663

Wasternack, C., & Song, S. (2017). Jasmonates: Biosynthesis, metabolism, and signaling. *Journal of Experimental Botany*, 68(6), 1303–1321. https://doi.org/10.1093/jxb/erw443

Whittaker, R. H., & Feeny, P. P. (1971). Allelochemics: Chemical interactions between species. *Science,* 171(3973), 757–770. https://doi.org/10.1126/science.171.3973.757

Wink, M. (Ed.). (2010). Biochemistry of plant secondary metabolism (2. baskı). Wiley-Blackwell. https://doi.org/10.1002/9781444320503

Zhang, A., Liu, Z., Lei, F., Fu, J., Zhang, X., Ma, W., & Zhang, L. (2017). Antifeeding and oviposition deterrent activity of total ginsenosides against Pieris rapae. *Saudi Journal of Biological Sciences,* 24(8), 1751–1753. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.11.005

BÖLÜM 4

HASAT SONRASI MEYVE VE SEBZE MUHAFAZASINDA GAZ KLOR DİOKSİT UYGULAMALARI

ERDİNÇ BAL

(Prof. Dr.), Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi,

Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü,

Tekirdağ, Türkiye

ebal@nku.edu.tr

ORCID: 0000-0001-9817-5842

HASAT SONRASI MEYVE VE SEBZE MUHAFAZASINDA GAZ KLOR DİOKSİT UYGULAMALARI

ERDİNÇ BAL[1]

Giriş

Meyve ve sebzeler, yüksek su içerikleri, metabolik aktiviteleri ve zengin besin yapıları nedeniyle hasat sonrasında hızlı kalite kaybına maruz kalan tarımsal ürünlerdir. Hasattan sonra solunum ve terleme devam etmekte; bunun sonucunda ağırlık kaybı, yumuşama, renk değişimleri, besin maddelerinin azalması ve duyusal özelliklerde bozulmalar meydana gelmektedir. Buna ek olarak, ürün yüzeyinde bulunan veya hasat, taşıma, paketleme ve depolama sırasında bulaşan mikroorganizmalar çürümeyi hızlandırabilmektedir. Patojen mikroorganizmaların varlığı ise ürün kalitesinin ötesinde doğrudan gıda güvenliği açısından önem taşımaktadır. Taze ürünler genellikle çiğ olarak tüketildiğinden, hasat sonrası işleme sırasında mikroorganizma seviyelerini azaltan uygulamalar (örneğin

[1] Prof. Dr., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, Orcid: 0000-0001-9817-5842

antimikrobiyal yıkama), raf ömrünü uzatmak ve gıda kaynaklı hastalıkları azaltmak için hayati önem taşır (Goodburn ve Wallace, 2013). Bu nedenle, meyve ve sebzelerin biyogüvenliğinin artırılması ve kalitesinin korunması, gıda endüstrisi açısından güncelliğini koruyan kritik bir hedef olmayı sürdürmektedir.

Yaş meyve sebzelerde mikrobiyal büyümeyi en aza indirmek ve ürünlerinin tazeliğini korumak için gıda dostu antimikrobiyal bileşiklere ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle depolama sırasında, tarımsal ürünler üzerindeki maya, küf ve bozulmaya neden olan mikroorganizmaların popülasyonlarının azaltılması önemlidir. Tarımsal ürünler genellikle yüksek düzeyde maya ve küf popülasyonu barındırdığından ve mikrobiyal kontaminasyon noktalarına dönüşebilecek zayıflamış veya mekanik zarar görmüş bölgeler içerebildiğinden, bu mikroorganizmaların kontrol altına alınması en doğrusudur (Gómez-López ve ark. 2009).

Hasat sonrası sanitasyonda geleneksel olarak klor bazlı dezenfektanlar, ozon, organik asitler ve çeşitli fiziksel yöntemlerden yararlanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerin her biri; etkinlik, yan ürün oluşumu, s tüketimi ve ürün kalitesi gibi parametreler bakımından farklı avantaj ve sınırlılıklara sahiptir. Etkin bir dezenfeksiyon yöntemi için başlıca gereksinimler, patojenlere karşı etkili olması, insan sağlığına zararlı yan ürün ve kalıntıların bulunmaması ve çevreye hiçbir etkisinin olmamasıdır. Öte yandan, ürünlerin raf ömrü ve besin kalitesi de etkilenmemelidir (Praeger 2018).

Dünya genelinde taze meyve ve sebzelerin dezenfeksiyonunda yaygın olarak kullanılan klor (Cl_2), kalsiyum hipoklorit [$Ca(OCl)_2$] veya sodyum hipoklorit (NaOCl) formunda yıkama uygulanmaktadır. Bu uygulamalarda büyük hacimli suyun, bir seferde işlenen büyük miktardaki bitki dokusuyla birleşimi özellikle yıkama suyu çevresel ve ekonomik nedenlerle geri dönüştürüldüğünde kontaminasyon riskini ortaya çıkarmaktadır. Ek

olarak, işlem sonrası ürün yüzeyinde kalan nem, uygun bir kurutma adımı uygulanmadığı takdirde küf oluşumunu da teşvik edebilmektedir (Gómez-López ve ark. 2009). Yıkamaya göre daha avantajlı olan gazla müdahale; gazın eşit dağılımını sağlayan ve insan temasını engelleyen, yüksek kontrollü ve güvenli bir ortamda sunulur. Bu nedenle gaz uygulamaları depolar veya nakliye araçları için en ideal çözümü sunabilmektedir.

Son yıllarda taze ürünler için potansiyel olarak tehlikesiz bir sanitasyon maddesi olarak dikkat çeken klor alternatiflerinden biri de Klor dioksittir (ClO_2). Su arıtma, gıda işleme ve tıbbi dezenfeksiyonda yaygın olarak kullanılmaktadır. ClO_2, oda sıcaklığında sarı-yeşil, keskin kokulu, ışığa duyarlı bir gazdır; erime noktası -59°C, kaynama noktası ise 11°C'dir. Gaz halindeki ClO_2 suda son derece çözünür ve hidrolizasyona uğramadan sulu çözeltide çoğunlukla moleküler formda bulunur (Zhang ve ark. 2023). ClO_2 güçlü oksidatif özellikleri ve geniş bir mikroorganizma spektrumuna karşı yüksek etkinliği sayesinde alternatif bir sanitasyon teknolojisi olarak öne çıkmaktadır. Özellikle gaz halindeki ClO_2 uygulamalarının su tüketimi gerektirmeden gerçekleştirilebilmesi ve gazın ürün yüzeyindeki yüksek yayılım kabiliyeti, bu teknolojinin hasat sonrası muhafaza süreçlerindeki cazibesini artırmıştır (Chai ve ark. 2020; Singh ve ark. 2020).

Gaz ClO_2 uygulamalarında temel amaç, kapalı bir ortamda ürünlerin belirli bir süre kontrollü ClO_2 atmosferine maruz bırakılmasıdır. Uygulamalar ticari ölçekte depolama odalarında, işlem odalarında, paketleme sistemlerinde veya ambalaj içerisinde kontrollü salım sağlayan materyaller kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. ClO_2 patlayıcı özellik göstermesi nedeniyle sıkıştırılarak basınç altında depolanamayan bir bileşiktir. Bu nedenle, gaz hâlindeki ClO_2'nin taşınması mümkün olmadığından, ihtiyaç duyulan miktarın kullanım alanında üretilmesi gerekmektedir. ClO_2 üretiminde hem sulu fazda hem de gaz fazında uygulanabilen çeşitli yöntemler bulunmaktadır.

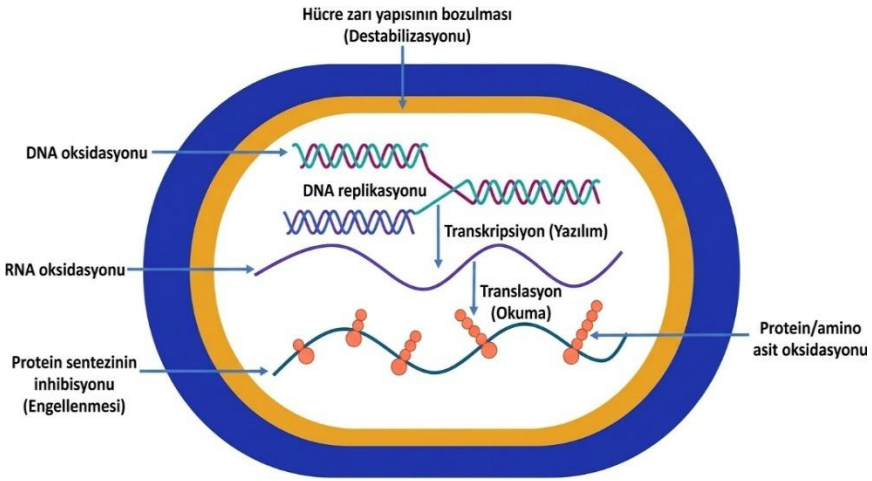
Uygun üretim yönteminin belirlenmesinde uygulamanın amacı, işlem görecek yüzeylerin veya malzemelerin boyutu ve türü, hedeflenen ClO_2 konsantrasyonu ve çevresel koşullar gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Bu değişkenlerin her biri, uygulamanın etkinliği üzerinde belirleyici olduğundan, ClO_2 uygulaması için uygun işlem koşullarını belirlemesi önem taşımaktadır. Geleneksel üretim yöntemleri, genellikle asitle reaksiyon gerçekleştirilmesini veya jeneratör gibi yerinde üretime yönelik ekipmanların kullanılmasını gerektirmektedir. Bununla birlikte, günümüzde yerinde ClO_2 üretimini kolaylaştıran ticari sistemler de mevcuttur. Bu sistemler çoğunlukla, iki bileşenin bir araya getirilmesiyle ClO_2 oluşumunu sağlayan öncü maddeleri ayrı ayrı içeren iki poşetten oluşmaktadır (Lee ve ark., 2004; Wu ve Rioux, 2010).

Antimikrobiyal Etki Mekanizması

ClO_2 hasat sonrası muhafazada özellikle bakteri, maya ve küflerin gelişimini sınırlandırmak amacıyla araştırılan güçlü bir oksitleyici ajandır. Gaz hâlinde uygulanabilmesi, meyve ve sebzelerin yüzeyindeki girintili-çıkıntılı bölgelere ve ambalaj içerisindeki ulaşılması zor noktalara temas edebilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu özellik, gaz ClO_2 uygulamalarını sulu dezenfektan uygulamalarından ayıran önemli avantajlardan biri olarak değerlendirilmektedir (Sun ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2023).

ClO_2'nin mikroorganizmalar üzerindeki antimikrobiyal etkisinin temelinde seçici oksidasyon reaksiyonları bulunmaktadır. Hücre zarının, ClO_2'nin birincil hedefi olduğu bildirilmiştir (Wu ve Kim 2007). ClO_2, mikroorganizmanın hücre yüzeyiyle temas ettikten sonra hücre zarında bulunan protein, lipid ve diğer oksidasyona duyarlı bileşenlerle reaksiyona girmektedir (Şekil 1). Bu reaksiyonlar hücre zarının yapısal bütünlüğünü bozarak membran geçirgenliğinin artmasına ve hücre içeriğinin dış ortama sızmasına neden olabilmektedir. Bunun sonucunda hücrenin iyon dengesi ve

metabolik faaliyetleri bozulmakta ve ileri düzeyde hücresel hasar meydana gelmektedir (Gómez-López ve ark., 2009; Liu ve ark., 2019).



Şekil 1. ClO_2'nin mikroorganizmalara karşı etki mekanizmaları (Sun ve ark. 2019)

ClO_2'nin antimikrobiyal etkisinde özellikle proteinlerde bulunan sülfhidril grupları ve oksidasyona duyarlı amino asit kalıntıları önemli hedefler arasında değerlendirilmektedir. Proteinlerin oksidatif olarak modifiye edilmesi, enzimlerin ve metabolik süreçlerde görev alan proteinlerin fonksiyonlarını kaybetmesine yol açabilmektedir. Böylece mikroorganizmanın enerji üretimi, hücresel metabolizması ve protein sentezi gibi yaşamsal süreçleri sekteye uğramaktadır. ClO_2'nin hücre zarı ve hücre içi proteinler üzerindeki bu çoklu etkisi, mikroorganizmaların canlılığının kaybolmasında önemli bir mekanizma olarak bildirilmektedir (Sun ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2023).

ClO_2 gazının etkisi yalnızca hücre zarıyla sınırlı kalmayıp, genetik materyale de zarar verebilmektedir. DNA ve RNA gibi nükleik

asitlerin yanı sıra proteinler ve metabolik sistemlerin etkilenmesi, mikroorganizmanın çoğalma ve onarım kapasitesinin azalmasına katkıda bulunmaktadır. Uygulama sırasında ClO_2, hücre içindeki amino asitler ve RNA ile reaksiyona girerek protein üretimini engeller; zar proteinlerini ve yağlarını değiştirerek hücre zarını etkiler ve madde alışverişini durdurmaktadır (Lenntech 2007). ClO_2'nin etkisi, transmembran iyonik gradyanın yıkımına yol açan dış zar üzerindeki spesifik olmayan oksidatif hasarla ilişkilendirilmiştir. Young ve Setlow (2003), ClO_2'nin spor çimlenmesinin ilk aşamaları yoluyla *Bacillus subtilis* sporlarının ölümüne katkıda bulunduğunu bildirmiştir. Bununla birlikte, ClO_2'nin mikroorganizmaları inaktive etme mekanizmasının tek bir hedef üzerinden açıklanamayacağı; hücre zarı, proteinler, enzimler ve nükleik asitler gibi birden fazla hücresel bileşenin eş zamanlı olarak etkilenmesinin toplam antimikrobiyal etkinin oluşmasında rol oynadığı bildirilmektedir (Zhang ve ark., 2023; Zhu ve ark., 2024).

Hasat sonrası muhafazada gaz ClO_2 uygulamalarının etkinliği yalnızca mikroorganizmanın özelliklerine değil, aynı zamanda uygulama konsantrasyonu, maruz kalma süresi, sıcaklık, bağıl nem, ürün yüzeyinin yapısı ve gazın ortam içerisindeki dağılımı gibi faktörlere de bağlıdır. ClO_2'nin antimikrobiyal etkisinin gaz ve sulu formlarda farklılık gösterebildiği ve özellikle gaz uygulamalarında konsantrasyon ile temas süresinin etkinliğin belirlenmesinde kritik olduğu bildirilmektedir (Sun ve ark., 2019).

Sy ve ark. (2005) tarafından yürütülen bir çalışmada; gıda kaynaklı hastalıklarla ilişkilendirilen yaban mersini, çilek ve ahududu üzerindeki Salmonella, maya ve küflerin yok edilmesinde bir sanitasyon ajanı olarak etkinliğini belirlemek amacıyla gaz fazında ClO_2 üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar, 8,0 mg/L'lik uygulamanın (120 dakika süreyle) yaban mersini (2,4–3,7 log CFU/g azalma), çilek (3,8–4,4 log CFU/g azalma) ve ahududu (1,5 log CFU/g azalma) üzerindeki Salmonella popülasyonunu önemli ölçüde

azalttığını göstermiştir. Yaban mersini, çilek ve ahududu üzerindeki maya ve küflere yönelik 4,1 ila 8,0 mg/L konsantrasyon ve 30 ila 120 dakika uygulama süresi aralığındaki sonuçlar ise sırasıyla 1,4–2,5, 1,4–4,2 ve 2,6–3,0 log CFU/g düzeyinde azalmalar olduğunu ortaya koymuştur.

Yaban mersininde 10 °C'de gerçekleştirilen gaz halindeki ClO_2 uygulamasının ise 10 günlük depolama süresi sonunda *C. acutatum* popülasyonlarını 1,3–2,0 log CFU/g, *E. coli* popülasyonlarını ise 2,2–3,3 log CFU/g oranında azalttığı belirlenmiştir (Sun ve ark., 2014). Yaban mersininin 12 saat boyunca 18 mg/L gaz halindeki ClO_2 ile işlenmesi sonucunda küf, *E. coli*, koliformlar, mayalar ve mezofilik aerobik bakterilerin popülasyonlarında sırasıyla 0,48, 0,52, 1,47, 1,63 ve 2,33 log düzeyinde azalma sağlandığı rapor edilmiştir (Popa ve ark., 2007). Gaz halindeki ClO_2'nin patojen mikroorganizmalar üzerindeki etkinliği de çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Nitekim, 22 °C'de 10 dakika süreyle 5 mg/L konsantrasyonda uygulanan gaz halindeki ClO_2 işlemi, *L. monocytogenes*, *E. coli* O157:H7 ve *Salmonella* popülasyonlarında sırasıyla 4,7, 4,6 ve 4,3 log azalma sağlamıştır (Sy ve ark., 2005). Bunun yanı sıra, gaz halindeki ClO_2'nin viral kontaminasyonun azaltılmasında da etkili olduğu ve 0,6 mg/L konsantrasyonda 20 dakikalık uygulama sonucunda Tulane virüsünde 2,2 log düzeyinde azalma meydana getirdiği bildirilmiştir (Kingsley ve ark., 2018). Bu bulgular, gaz halindeki ClO_2 uygulamasının küçük meyvelerde hem bozulmaya neden olan mikroorganizmaların hem de gıda kaynaklı patojenlerin kontrolünde etkili bir dezenfeksiyon yöntemi olabileceğini göstermektedir.

Elma, havuç, yeşil biber ve patates üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar, bu uygulamanın çeşitli mikroorganizmaların kontrolünde başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Örneğin, 21 °C sıcaklık ve %90–95 bağıl nem koşullarında elmalara uygulanan 12,0 mg/L ClO_2'nin 10 dakika, 7,2 mg/L'nin 20 dakika ve 4,8 mg/L'nin 30

dakika süreyle uygulanması, elma kabuğuna başlangıçta 8 log CFU/alan düzeyine kadar inoküle edilen *E. coli* O157:H7'nin tamamen inaktive edilmesini sağlamıştır (Du ve ark., 2003).

Havuçlarda 1,33 mg/L konsantrasyonda gaz halindeki ClO_2'nin 6 dakika süreyle uygulanması sonucunda toplam mezofilik aerobik bakteri, psikrotrofik bakteri, laktik asit bakterisi ve maya popülasyonlarında sırasıyla 1,88, 1,71, 2,60 ve 0,66 log düzeyinde azalma meydana geldiği bildirilmiştir (Gomez-Lopez ve ark., 2007). Benzer şekilde, yaralanmış yeşil biberlerin yüzeyinde bulunan *E. coli* O157:H7 popülasyonları, 22 °C ve %90–95 bağıl nem koşullarında 30 dakika süreyle uygulanan 0,62 ve 1,24 mg/L ClO_2 konsantrasyonları sonrasında sırasıyla 3,03 ve 6,45 log düzeyinde azalmıştır (Han ve ark., 2000). Patateslerde ise 40 mg/L gaz halindeki ClO_2 ile 5 saatlik uygulama sonucunda, doğal olarak bulunan mikrobiyal popülasyonda 5 log CFU/patates'in üzerinde bir azalma sağlanmıştır (Wu ve Rioux, 2010).

Gaz halindeki ClO_2 uygulamasının yapraklı sebzelerde de mikrobiyal güvenliği artırmada etkili olduğu belirlenmiştir. Marul yapraklarında *E. coli* ve *S. enterica* popülasyonlarında 5 log CFU düzeyinde azalma sağlamak için 5,0 mg/L gaz halindeki ClO_2'nin sırasıyla 14,5 ve 19,0 dakika süreyle uygulanmasının yeterli olduğu bildirilmiştir (Mahmoud ve Linton, 2008). Ispanak yapraklarının 20 dakika boyunca 10 ppm gaz halindeki ClO_2'ye maruz bırakılması sonucunda ise *Salmonella*, *E. coli* O157:H7 ve *L. monocytogenes* popülasyonlarında sırasıyla 3,3, 3,4 ve 3,4 log düzeyinde azalma elde edilmiştir. Bununla birlikte, 50 ppm gaz halindeki ClO_2'nin 20 dakika süreyle uygulanması, %50 bağıl nem koşullarında ıspanak yapraklarındaki *E. coli* O157:H7, *Salmonella* ve *L. monocytogenes* popülasyonlarında 1,25–1,78 log, %70 bağıl nem koşullarında ise 2,02–2,54 log düzeyinde azalma sağlamıştır (Park ve Kang, 2015).

Bu bulguların yanı sıra, gaz halindeki ClO_2'nin şeftali, lahana ve soğan (Sy, McWatters ve ark., 2005), kavun (Mahmoud ve ark., 2008), greyfurt (Sun ve ark., 2017) ve portakal (Bhagat ve ark., 2010) gibi çeşitli meyve ve sebzelerde de mikrobiyal güvenliğin artırılması amacıyla kullanılabileceği bildirilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, gaz halindeki ClO_2 uygulaması farklı ürünlerde yüzey kaynaklı mikroorganizmaların azaltılmasında etkili bir yöntem olup, uygulama konsantrasyonu, işlem süresi, sıcaklık ve bağıl nem gibi faktörlerin antimikrobiyal etkinlik üzerinde belirleyici olduğu görülmektedir.

Ürün Kalitesi ve Raf Ömrü Üzerine Etkileri

ClO_2, mikroorganizma yükünü azaltmasının yanı sıra depolama süresince meyve ve sebzelerin kalite özelliklerinin korunmasına ve raf ömrünün uzatılmasına katkı sağlayabilmektedir. Literatürde, ClO_2 uygulamalarının mikrobiyal gelişimi baskılayarak çürüme ve bozulmayı geciktirdiği bildirilmektedir (Sun ve ark., 2022; Zhang ve ark., 2023). Bununla birlikte, Zhu ve ark. (2024), ClO_2'nin patojen mikroorganizmaların doğrudan inaktivasyonuna ek olarak bitkisel dokulardaki doğal bağışıklık ve savunma yanıtlarının düzenlenmesinde de rol oynayabileceğini belirtmiştir. Bu bulgular, ClO_2'nin hasat sonrası muhafazadaki etkilerinin yalnızca mikroorganizmalar üzerindeki doğrudan oksidatif etkisiyle sınırlı olmadığını, aynı zamanda ürünlerin fizyolojik savunma mekanizmalarıyla da ilişkili olabileceğini göstermektedir. Ancak uygulamanın etkinliği ve kalite üzerindeki etkileri ürün çeşidine, konsantrasyona ve uygulama süresine bağlı olarak değişebildiğinden, yüksek konsantrasyonların veya uzun süreli uygulamaların neden olabileceği istenmeyen oksidatif etkilerin önlenmesi amacıyla uygulama koşullarının ürüne özgü olarak optimize edilmesi gerekmektedir.

ClO_2 meyve ve sebzelerde renk değişimlerini kontrol ederek kalite özelliklerinin korunmasına katkı sağlayabilmektedir. Chen ve ark. (2010), ClO_2 uygulamasının polifenol oksidaz (PPO) ve peroksidaz (POD) aktivitelerini baskılayarak enzimatik kahverengileşmeyi yavaşlattığını ve marulda renk değişimlerinin geciktirilmesine yardımcı olduğunu bildirmiştir. Longan meyvelerinde ise enerji metabolizmasıyla ilişkili enzim aktivitelerinin artırılması yoluyla hücresel enerji dengesinin korunabildiği ve perikarp dokusunda kahverengileşmenin azaltılabildiği belirtilmiştir (Vichaiya ve ark., 2020). Benzer şekilde, Saengnil ve ark. (2014), 10 mg/L konsantrasyonunda uygulanan ClO_2'nin longan meyvelerinde duyusal özellikler üzerinde olumsuz bir etki oluşturmaksızın kahverengileşmenin kontrolünde etkili olduğunu ortaya koymuştur. Bunun yanı sıra, ClO_2 uygulamasının klorofil yıkımı ve karotenoid senteziyle ilişkili genlerin ekspresyonunu baskılayarak yeşil biberlerde kırmızı renk oluşumunu geciktirebildiği bildirilmiştir (Wei ve ark., 2019).

Çileklerde gerçekleştirilen bir çalışmada, 10°C ve altındaki depolama sıcaklıklarında gaz hâlindeki ClO_2 uygulamasının ağırlık kaybını kontrol grubuna kıyasla %81-208 oranında azaltabildiği bildirilmiştir. Bu etkinin, ClO_2'nin meyve yüzeyindeki stomaların kapanmasını teşvik ederek su kaybını sınırlandırmasıyla ilişkili olabileceği ve buna bağlı olarak meyvelerde yumuşamanın da azalabileceği ileri sürülmüştür (Wang ve ark., 2014). Bununla birlikte, ClO_2 uygulamasının ağırlık kaybı üzerindeki etkisi uygulama koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir. Aday ve Caner (2011), yüksek konsantrasyonda gaz hâlindeki ClO_2 uygulamasının hücre duvarı bileşenlerinde oksidatif değişimlere neden olarak ağırlık kaybını artırabileceğini bildirmiştir. Nitekim, 21 günlük depolama sonunda ClO_2 uygulanan çileklerde ağırlık kaybı %0.51 olarak belirlenirken kontrol grubunda bu değer %0,18 olarak kaydedilmiştir. Bu bulgular, ClO_2'nin meyvelerde su kaybının

kontrolü ve ağırlığın korunması üzerindeki etkisinin uygulama konsantrasyonu ve depolama sıcaklığı gibi faktörlere bağlı olduğunu ortaya koymakta; dolayısıyla kalite kayıplarını en aza indirmek için uygulama koşullarının ürüne özgü olarak optimize edilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Islam ve ark. (2017), modifiye atmosfer ambalajında depolanan domateslerde 5 ppm ClO_2 gazı ile 12 saatlik uygulamanın mantar gelişimini baskıladığını ve raf ömrünü uzattığını belirlemiştir. Uygulama ayrıca ağırlık kaybını azaltmış, meyve sertliği, titre edilebilir asitlik ve C vitamini içeriğinin korunmasına katkı sağlamıştır. Bu sonuçlar, ClO_2 gazının domateslerin hasat sonrası kalitesinin korunmasında etkili bir yöntem olabileceğini göstermektedir.

Jiang ve ark. (2023), gaz halindeki ClO_2 uygulamasının yaban mersini, kiraz domates ve üzümlerde *Salmonella* spp. ve *Listeria monocytogenes* miktarını önemli ölçüde azalttığını belirlemiştir. Uygulamanın meyvelerin renk özellikleri üzerinde sınırlı etkisi olduğu, ağırlık kaybı ve sertlik değişimlerinin ise depolama koşullarından etkilendiği bildirilmiştir. Bu bulgular, gaz halindeki ClO_2'nin hasat sonrası meyvelerde mikrobiyal güvenliğin artırılması ve kalite özelliklerinin korunması açısından potansiyelini ortaya koymaktadır.

ClO_2'nin koruyucu etkisinin, hasat sonrası solunum faaliyetlerini ve etilen sentezini baskılamasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Guo ve ark. (2014), kapalı bir ortamda 12 saat boyunca ClO_2'ye maruz bırakılan olgun yeşil domates meyvelerinde toplam solunumun, sitokrom yolu üzerinden gerçekleşen solunumun ve etilen biyosentezinde rol alan genlerin ekspresyon düzeylerinin önemli ölçüde azaldığını bildirmiştir. Benzer şekilde, longan meyvelerine 10 dakika süreyle 10 mg/L konsantrasyonunda ClO_2 fümigasyonu uygulanması, enzimatik süreçlerde rol oynayan reaktif azot

türlerinin aktivitelerini azaltmış ve ilgili metabolik yolakların substratlarının 5–6 gün boyunca korunmasını sağlayarak kabuk kahverengileşmesini sınırlandırmıştır (Intarasit ve ark., 2022). Saengnil ve ark. (2014) ise taze longan meyvelerinin 10 veya 25 mg/L konsantrasyonlarında, 10 dakika süreyle gaz hâlindeki ClO_2'ye maruz bırakılması sonucunda ATP içeriğinin, enerji yükünün ve NAD/NADH oranının hızla arttığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, ClO_2 uygulamasının hücresel enerji metabolizmasını ve redoks dengesini destekleyerek meyvelerde yaşlanma sürecini yavaşlatabileceğini ve raf ömrünün korunmasına katkıda bulunabileceğini göstermektedir.

Meyve sertliği, dokunun su içeriği ve hücre duvarının yapısal bütünlüğüyle yakından ilişkili olup hasat sonrası kaliteyi belirleyen önemli parametrelerden biridir. Mangolarda gerçekleştirilen bir çalışmada, gaz hâlindeki ClO_2 uygulamasının pektin metabolizmasını ve nişasta hidrolizini baskılayarak hücre duvarı yapısının korunmasına katkıda bulunduğu ve böylece meyve sertliğinin muhafaza edilmesine yardımcı olduğu bildirilmiştir (Zhang ve ark., 2019). Domateslerde yapılan bir çalışmada, gaz hâlindeki ClO_2 uygulamasının, etilen biyosenteziyle ilişkili genlerin ekspresyonunu baskılayarak olgunlaşma sürecini geciktirdiği ve bu sayede meyve sertliğinin korunmasına katkıda bulunduğu bildirilmiştir (Guo ve ark., 2014).

Gaz hâlindeki ClO_2 uygulamasının vitamin ve pigment içeriği üzerindeki etkileri, uygulama koşullarına ve ürünün kimyasal bileşimine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Vandekinderen ve ark. (2009), taze kesilmiş pırasanın 1,59 mg/L konsantrasyonunda ClO_2 ile işlenmesi sonucunda, C vitamininin yıkama suyuna geçişine bağlı olarak vitamin içeriğinde %22,9 oranında azalma meydana geldiğini bildirmiştir. Benzer şekilde, 1,07 ve 1,36 mg/L konsantrasyonlarında gaz hâlindeki ClO_2 uygulamasının havuçların karotenoid içeriğinde %9, lahananın

karoten içeriğinde ise %8 oranında azalmaya neden olduğu belirtilmiştir (Wang ve ark., 2019). Buna karşılık, domateslerin ClO_2 uygulamasına karşı görece toleranslı olduğu ve 1,3–4,4 mg/L konsantrasyonlarında, beş saate kadar uygulanan işlemlerin C vitamini içeriğinde önemli bir değişime yol açmadığı bildirilmiştir (Wang ve ark., 2019). Bu bulgular, ClO_2 uygulamasının besin bileşenleri üzerindeki etkilerinin ürün türüne ve uygulama parametrelerine göre farklılaşabildiğini göstermektedir.

Sonuç

Taze meyve ve sebzelerde hasat sonrasında solunum ve olgunlaşma faaliyetleri, su kaybı ve fizyolojik değişimler ürünlerin raf ömrünü ve ekonomik değerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca mikroorganizmaların yol açtığı patojenik hastalıklar ve çürüme kayıpları, ürünlerin pazarlama süreçlerinde temel birer risk unsurudur. ClO_2 hasat sonrası meyve ve sebzelerde mikrobiyal bozulmayı sınırlandırma ve kalite özelliklerini koruma potansiyeline sahip etkili bir uygulama olarak değerlendirilmektedir. ClO_2'nin solunum ve etilen biyosentezini baskılaması, enzimatik kahverengileşmeyi yavaşlatması ve hücresel enerji metabolizmasını desteklemesi; olgunlaşmanın geciktirilmesine, renk ve sertliğin korunmasına ve raf ömrünün uzatılmasına katkıda bulunabilir. Bununla birlikte, ağırlık kaybı, toplam çözünür kuru madde, titre edilebilir asitlik, vitamin içeriği ve duyusal kalite üzerindeki etkileri ürün türüne, uygulama konsantrasyonuna, uygulama süresine ve depolama koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Özellikle yüksek konsantrasyonlarda uygulanan ClO_2'nin yüzeyde renk bozulmalarına, fitotoksik etkilere ve bazı besin bileşenlerinde kayıplara neden olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Sonuç olarak, ClO_2'nin hasat sonrası muhafazada başarılı bir şekilde kullanılabilmesi için her ürünün fizyolojik özelliklerine uygun uygulama koşullarının belirlenmesi ve mikrobiyal etkinlik ile kalite korunumu arasındaki dengenin sağlanması gerekmektedir. Ayrıca,

uygulamanın uzun dönemli etkilerinin, tüketici kabul edilebilirliğinin ve gıda güvenliği açısından uygunluğunun daha kapsamlı araştırmalarla desteklenmesi önem taşımaktadır.

Kaynakça

Aday, M. S., & Caner, C. (2011). The applications of 'active packaging and chlorine dioxide' for extended shelf life of fresh strawberries. *Packaging Technology and Science, 24*(3), 123–136.

Bhagat, A., Mahmoud, B. S. M., & Linton, R. H. (2010). Effect of chlorine dioxide gas on *Salmonella enterica* inoculated on navel orange surfaces and its impact on the quality attributes of treated oranges. *Foodborne Pathogens and Disease, 8*(1), 77–85.

Chai, H.-E., Hwang, C.-A., Huang, L., Wu, V. C. H., & Sheen, L.-Y. (2020). Feasibility and efficacy of using gaseous chlorine dioxide generated by sodium chlorite-acid reaction for decontamination of foodborne pathogens on produce. *Food Control, 108*, Article 106839.

Chen, Z., Zhu, C., Zhang, Y., Niu, D., & Du, J. (2010). Effects of aqueous chlorine dioxide treatment on enzymatic browning and shelf-life of fresh-cut asparagus lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Postharvest Biology and Technology, 58*(3), 232–238.

Du, J., Han, Y., & Linton, R. H. (2003). Efficacy of chlorine dioxide gas in reducing *Escherichia coli* O157:H7 on apple surfaces. *Food Microbiology, 20*(5), 583–591.

Gomez-Lopez, V. M., Devlieghere, F., Ragaert, P., & Debevere, J. (2007). Shelf-life extension of minimally processed carrots by gaseous chlorine dioxide. *International Journal of Food Microbiology, 116*(2), 221–227.

Gomez-Lopez, V. M., Rajkovic, A., Ragaert, P., Smigic, N., & Devlieghere, F. (2009). Chlorine dioxide for minimally processed

produce preservation: A review. *Trends in Food Science & Technology, 20*(1), 17–26.

Goodburn, C., & Wallace, C. A. (2013). The microbiological efficacy of decontamination methodologies for fresh produce: A review. *Food Control, 32*, 418–427.

Guo, Q., Wu, B., Peng, X. Y., Wang, J. D., Li, Q. P., Jin, J., et al. (2014). Effects of chlorine dioxide treatment on respiration rate and ethylene synthesis of postharvest tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology, 93*, 9–14.

Han, Y., Sherman, D. M., Linton, R. H., Nielsen, S. S., & Nelson, P. E. (2000). The effects of washing and chlorine dioxide gas on survival and attachment of *Escherichia coli* O157:H7 to green pepper surfaces. *Food Microbiology, 17*(5), 521–533.

Intarasit, S., Faiyue, B., Uthaibutra, J., & Saengnil, K. (2022). Amelioration of nitrosative stress to reduce pericarp browning of harvested longan by chlorine dioxide. *Scientia Horticulturae, 293*, Article 110678.

Islam, M. Z., Mele, M. A., Park, J. M., Kim, I. S., & Kang, H. M. (2017). Chlorine dioxide gas retain postharvest quality and shelf life of tomato during modified atmosphere packaging storage. *AGRIVITA Journal of Agricultural Science, 39*(3), 233–238.

Jiang, T., Guo, F., Fang, T., Hwang, C. A., & Huang, L. (2023). Efficacy of gaseous chlorine dioxide generated by sodium chlorite-carbon dioxide reaction on safety and quality of blueberries, cherry tomatoes, and grapes. *Food Control, 143*, Article 109288.

Kingsley, D. H., Perez-Perez, R. E., Niemira, B. A., & Fan, X. (2018). Evaluation of gaseous chlorine dioxide for the inactivation of Tulane virus on blueberries. *International Journal of Food Microbiology, 273*, 28–32.

Lee, S.-Y., Costello, M., & Kang, D.-H. (2004). Efficacy of chlorine dioxide gas as a sanitizer of lettuce leaves. *Journal of Food Protection, 67*, 1371–1376.

Lenntech. (2007). *Disinfection: Chlorine dioxide*. http://www.lenntech.com/water-disinfection/disinfectants-chlorine-dioxide.htm#Ontdekking%20chloordioxide

Mahmoud, B. S., & Linton, R. H. (2008). Inactivation kinetics of inoculated *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enterica* on lettuce by chlorine dioxide gas. *Food Microbiology, 25*(2), 244–252.

Mahmoud, B. S. M., Vaidya, N. A., Corvalan, C. M., & Linton, R. H. (2008). Inactivation kinetics of inoculated *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes* and *Salmonella Poona* on whole cantaloupe by chlorine dioxide gas. *Food Microbiology, 25*(7), 857–865.

Park, S. H., & Kang, D. H. (2018). Effect of temperature on chlorine dioxide inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella Typhimurium*, and *Listeria monocytogenes* on spinach, tomatoes, stainless steel, and glass surfaces. *International Journal of Food Microbiology, 275*, 39–45.

Popa, I., Hanson, E. J., Todd, E. C. D., Schilder, A. C., & Ryser, E. T. (2007). Efficacy of chlorine dioxide gas sachets for enhancing the microbiological quality and safety of blueberries. *Journal of Food Protection, 70*(9), 2084–2088.

Praeger, U., Herppich, W. B., & Hassenberg, K. (2016). Aqueous chlorine dioxide treatment of horticultural produce: Effects on microbial safety and produce quality—A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–16.

Saengnil, K., Chumyam, A., Faiyue, B., & Uthaibutra, J. (2014). Use of chlorine dioxide fumigation to alleviate enzymatic browning of harvested 'Daw' longan pericarp during storage under ambient conditions. *Postharvest Biology and Technology, 91*, 49–56.

Singh, S., Maji, P. K., Lee, Y. S., & Gaikwad, K. K. (2020). Applications of gaseous chlorine dioxide for antimicrobial food packaging: A review. *Environmental Chemistry Letters, 19*(1), 253–270.

Sun, C., Zhu, P., Ji, J., Sun, J., Tang, L., Pi, F., & Sun, X. (2017). Role of aqueous chlorine dioxide in controlling the growth of *Fusarium graminearum* and its application on contaminated wheat. *LWT, 84*, 555–561. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.03.032

Sun, X., Bai, J., Ference, C., Wang, Z., Zhang, Y., Narciso, J., Zhou, K. (2014). Antimicrobial activity of controlled-release chlorine dioxide gas on fresh blueberries. *Journal of Food Protection, 77*(7), 1127–1132.

Sun, X., Baldwin, E., & Bai, J. (2019). Applications of gaseous chlorine dioxide on postharvest handling and storage of fruits and vegetables-A review. *Food Control, 95*, 18–26.

Sy, K. V., Murray, M. B., Harrison, M. D., & Beuchat, L. R. (2005). Evaluation of gaseous chlorine dioxide as a sanitizer for killing *Salmonella*, *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, and yeasts and molds on fresh and fresh-cut produce. *Journal of Food Protection, 68*(6), 1176–1187.

Vandekinderen, I., Devlieghere, F., Van Camp, J., Kerkaert, B., Cucu, T., Ragaert, P., De Bruyne, J., & De Meulenaer, B. (2009). Effects of food composition on the inactivation of foodborne microorganisms by chlorine dioxide. *International Journal of Food Microbiology, 131*(2–3), 138–144.

Vichaiya, T., Uthaibutra, J., & Saengnil, K. (2020). Gaseous chlorine dioxide increases energy status and energy metabolism-related enzyme activities leading to reduction in pericarp browning of longan fruit during storage. *Scientia Horticulturae, 263*, Article 109118.

Wang, L., Sokorai, K., Wu, V. C. H., & Fan, X. (2019). Gaseous chlorine dioxide maintained the sensory and nutritional quality of grape tomatoes and reduced populations of *Salmonella enterica* serovar Typhimurium. *Food Control, 96*, 299–309.

Wang, Z., Narciso, J., Biotteau, A., Plotto, A., Baldwin, E., & Bai, J. (2014). Improving storability of fresh strawberries with controlled release chlorine dioxide in perforated clamshell packaging. *Food and Bioprocess Technology, 7*(12), 3516–3524.

Wei, F., Fu, M., Li, J., Yang, X., Chen, Q., & Tian, S. (2019). Chlorine dioxide delays the reddening of postharvest green peppers by affecting the chlorophyll degradation and carotenoid synthesis pathways. *Postharvest Biology and Technology, 156*, Article 110939.

Wu, V. C., & Kim, B. (2007). Effect of a simple chlorine dioxide method for controlling five foodborne pathogens, yeasts and molds on blueberries. *Food Microbiology, 24*, 794–800.

Wu, V. C. H., & Rioux, A. (2010). A simple instrument-free gaseous chlorine dioxide method for microbial decontamination of potatoes during storage. *Food Microbiology, 27*(1), 179–184.

Young, S., & Setlow, P. (2003). Mechanisms of killing of *Bacillus subtilis* spores by hypochlorite and chlorine dioxide. *Journal of Applied Microbiology, 95*, 54–67.

Zhang, X., Fu, M., & Chen, Q. (2019). Effect of chlorine dioxide (ClO_2) on patulin produced by *Penicillium expansum* and

involved mechanism. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 99*(4), 1961–1968.

Zhang, Y., Qiu, J., Yang, K., Lu, Y., Xu, Z., Yang, H., Xu, Y., Wang, L., Lin, Y., Tong, X., He, J., Xiao, Y., Sun, X., Huang, R., Yu, X., Zhong, T. (2023). Generation, mechanisms, kinetics, and effects of gaseous chlorine dioxide in food preservation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 22*(4), 3105–3129.

Zhu, X., Hui, S., Huang, H., Liu, R., Wang, S., & Huang, C. (2024). Antimicrobial mechanism of chlorine dioxide and its impacts on postharvest management in horticultural produce: A review. *Postharvest Biology and Technology, 213*: 112921.


BİDGE