BAHÇE BİTKİLERİNDE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR:

YETİŞTİRİCİLİK, BİTKİ KORUMA VE YENİLİKÇİ TEKNOLOJİLER

EDİTÖR
PROF. DR. AHMET TURHAN







BİDGE Yayınları

BİDGE Yayınları

Bahçe Bitkilerinde Güncel Yaklaşımlar: Yetiştiricilik, Bitki Koruma ve Yenilikçi Teknolojiler

Editör: PROF. DR. AHMET TURHAN

ISBN: 978-625-5057-79-2

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

CEVİZDE SOĞUKLAMA İSTEĞİ VE İLKBAHAR GEÇ DONLARININ ZARARI 1
YILMAZ SESLİ

SÜS BİTKİLERİNDE DENİZ YOSUNU EKSTRAKTLARININ KULLANIMI VE STRES FAKTÖRLERİNE KARŞI ETKİ MEKANİZMALARI 11
ÖMER ÖZTAŞ, ÖZLEM ÜZAL, FİKRET YAŞAR

TARIMDA NANOTEKNOLOJİK YAKLAŞIMLAR 32
MERT İLHAN

ALLELOKİMYASALLARIN FUNGUSİT OLARAK KULLANIMI 68
MİNE DEMİR, EMİNE SEMA ÇETİN

YENİLEBİLİR MANTARLARIN HASAT SONRASI MUHAFAZASINDA UÇUCU YAĞLARIN KULLANIMI: ETKİ MEKANİZMALARI VE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR ... 86
BEYHAN KİBAR

BÖLÜM 1

CEVİZDE SOĞUKLAMA İSTEĞİ VE İLKBAHAR GEÇ DONLARININ ZARARI

YILMAZ SESLİ[1]

Giriş

Ceviz (Juglans regia L.) yetiştiriciliğinde verim sürekliliği, çeşidin meyve kalitesi kadar yetiştirildiği çevrenin sıcaklık rejimine bağlıdır. Yaprağını döken bu tür, kış döneminde büyümenin sınırlandığı bir dinlenme sürecinden geçer. İlkbaharda gelişmenin başlaması için uygun fizyolojik ve çevresel koşulların birlikte oluşması gerekir. Bu nedenle kışın yeterli soğuklama sağlanması yararlı iken, gelişme başladıktan sonra düşük sıcaklıkla karşılaşılması zarar oluşturabilir. Aynı sıcaklık değişkeni, yılın farklı dönemlerinde farklı biyolojik sonuçlara yol açmaktadır.

Ilıman kış koşullarında soğuklama yetersizliği, soğuk bölgelerde ise ilkbahar geç donları ön plana çıkabilir. Bahçe planlamasında yalnızca kış minimum sıcaklığına veya çeşidin geç yapraklanmasına bakılması bu iki riski birlikte açıklamaz. Çeşidin dinlenme gereksinimi, ilkbahar gelişme zamanı ve bölgenin don rejimi bir bütün olarak incelenmelidir. Kuzey Patagonya'da

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

yürütülen ceviz araştırması, soğuklama ile sıcaklık gereksiniminin çeşitler arasında farklılaştığını ve değerlendirme yönteminin sonuçları etkilediğini göstermektedir (del Barrio vd., 2022).

Bu bölüm, 2020 ve sonrasında yayımlanmış bilimsel makalelere dayalı anlatısal bir derlemedir. Amaç, soğuklama ve don zararını aynı fizyolojik çerçevede açıklamak; araştırma sonuçlarını çeşit seçimi, bahçe tesisi ve koruma kararlarıyla ilişkilendirmektir. Cevize özgü araştırmalar temel alınmış; meyve bahçelerindeki genel koruma araştırmaları yalnızca yöntemlerin çalışma ilkelerini açıklamak için kullanılmıştır.

1. Tomurcuk Dinlenmesi ve Soğuklama Gereksinimi

Endodormansi, tomurcuğun içsel fizyolojik nedenlerle uygun dış koşullarda bile gelişemediği dinlenme durumudur. Ekodormanside ise içsel engel büyük ölçüde ortadan kalkmış olmakla birlikte dış ortam koşulları büyümeyi sınırlar. Paradormansi, bitkinin başka organlarının tomurcuk üzerindeki baskılayıcı etkisini ifade eder. Bu ayrım, kesilmiş dal denemelerinin ve budama etkisinin yorumlanmasında önemlidir. Tomurcuğun açılmaması her zaman yalnızca soğuklama eksikliğine bağlanmamalıdır.

2. Soğuklamanın Ölçülmesi ve Sıcaklık Birikimi

Soğuklama, belirli sıcaklık koşullarının zaman içindeki biyolojik etkisini ifade eder. Hesaplamada kullanılan model değiştiğinde elde edilen birim ve toplam da değişir. Bu nedenle bir çeşide ait soğuklama isteği verilirken hesaplama modeli, kullanılan sıcaklık serisi, başlangıç tarihi ve dinlenmenin sonlanma ölçütü açıklanmalıdır. Soğuklama saati ile soğuklama porsiyonu birbirinin yerine kullanılamaz; aralarında bütün bölgelerde geçerli sabit bir dönüşüm bulunmaz.

Tablo 1 Soğuklama modellerinin yorumlanması

Model	*Birim*	*Temel yaklaşım*
Soğuklama saati	*Saat*	*Tanımlanan sıcaklık aralığındaki süreyi toplar.*
Utah modeli	*Soğuk birimi*	*Sıcaklık aralıklarına farklı ağırlık verir; sıcak dönemlerin toplamını azaltabilir.*
Pozitif Utah	*Soğuk birimi*	*Negatif katkıların değerlendirilmesini değiştiren bir yaklaşımdır.*
Dinamik model	*Soğuklama porsiyonu*	*Soğuklama birikimi, iki aşamalı bir süreç üzerinden hesaplanır.*

del Barrio vd. (2022) ve Charrier (2022) temelinde özetlenmiştir.

Charrier (2022), 'Franquette' çeşidinde dinlenmeden çıkış ve tomurcuk patlamasının modellenmesini incelemiş; soğuklama birikiminin başlangıcını tanımlayan farklı kuralların tahminler üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Bu tür çalışmalar, modelin yalnızca sıcaklık toplamından ibaret olmadığını göstermektedir. Tahmin başarısı, biyolojik olayın nasıl tanımlandığına ve modelin yerel koşullarda sınanmasına da bağlıdır.

Soğuklama gereksinimi karşılandıktan sonra gelişmenin ilerlemesinde sıcaklık birikimi belirleyicidir. Ancak soğuklama ile sıcaklık birikiminin her koşulda birbirini tamamen dışlayan iki dönem olduğu kabul edilmemelidir. del Barrio vd. (2022), cevizde bu süreçlerin örtüşebileceğini ve birikmiş soğuklama ile sonraki sıcaklık gereksinimi arasında ilişki bulunduğunu bildirmiştir. Bu nedenle geç yapraklanmayı yalnızca yüksek soğuklama isteğiyle açıklamak yetersizdir. Aynı çalışmada yapay soğuklama sonuçlarının saha tahminlerinden daha yüksek olabilmesi,

laboratuvar değerlerinin doğrudan üretim koşullarına aktarılmasını sınırlandırmaktadır.

Soğuklama isteğinin deneysel olarak belirlenmesinde farklı tarihlerde alınan yaşlı dallar kontrollü gelişme koşullarına taşınabilir. Tomurcuk açılma oranı ve açılmaya kadar geçen süre izlenerek dinlenmenin ilerlemesi değerlendirilebilir. Bununla birlikte, örneklenen ağaç sayısı, dalın konumu, uç tomurcuğun varlığı ve değerlendirme süresi standartlaştırılmalıdır. Üretim açısından önerilen yaklaşım, bu deneyleri aynı bahçedeki gerçek yapraklanma ve çiçeklenme kayıtlarıyla birlikte yorumlamaktır.

Yetersiz soğuklama koşullarında düzensiz tomurcuk açılması ve gelişme eşzamanlılığının bozulması görülebilir. Ancak bahçedeki her düzensiz gelişme olayı soğuklama yetersizliğine bağlanmamalıdır. Su durumu, ağaç sağlığı ve önceki sezon koşulları da incelenmelidir. Tanı için tek yıllık gözlem yerine çok yıllık sıcaklık ve fenoloji kayıtlarının birlikte kullanılması daha güçlü bir değerlendirme sağlar.

3. İlkbahar Geç Donlarında Zararın Oluşumu

Kış dinlenmesindeki odunsu dokular ile ilkbaharda açılan tomurcuk, genç yaprak, sürgün ve çiçeklerin düşük sıcaklığa tepkileri farklıdır. İlkbaharda gelişme ilerledikçe kışın kazanılmış dayanıklılığı azalabilir. Bu nedenle kışın zarar oluşturmayan bir sıcaklık gelişme dönemindeki organlar için tehlikeli olabilir. Zarar; ulaşılan minimum sıcaklığa ek olarak soğukta kalma süresi, organın gelişme evresi ve olay öncesindeki sıcaklık geçmişine bağlıdır.

Szügyi-Bartha vd. (2022), ceviz çeşitlerinde kontrollü dondurma testleriyle don toleransını değerlendirmiştir. Çalışma, çeşide ve örnekleme dönemine bağlı farklılıkların dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. LT50, tanımlanmış deney koşullarında değerlendirilen dokuların yarısında ölüm veya zarar oluşturan sıcaklığı ifade eder. Bu değer, bütün ağaç organları ve bütün gelişme

dönemleri için geçerli tek bir zarar eşiği değildir. Deneysel LT50 değerleri süre, soğutma hızı ve değerlendirme yönteminden bağımsız yorumlanmamalıdır.

İlkbahar donlarında yaprak ve sürgünlerde kararma, pörsüme ve nekroz; çiçeklerde ise doku kahverengileşmesi ve canlılık kaybı görülebilir. Ancak dış görünüm tek başına nihai verim kaybını göstermez. Erkek ve dişi çiçeklerin ayrı değerlendirilmesi gerekir; birinde zarar bulunması ile her ikisinin birlikte kaybedilmesinin tozlanma ve meyve tutumuna etkileri farklıdır. Zarar incelemesi, fenolojik evre bilgisi ve temsil edici örneklemeyle desteklenmelidir.

Bartha vd. (2023), farklı don toleransına sahip ceviz genotiplerinin biyokimyasal özelliklerini incelemiştir. Bu yaklaşım, düşük sıcaklık tepkisinin yalnızca takvim tarihinden veya dış görünüşten ibaret olmadığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, biyokimyasal göstergeler tek başına ticari dayanıklılık sınıfı oluşturmak için yeterli değildir; kontrollü testler ve saha gözlemleriyle birlikte değerlendirilmelidir.

3.1. Zararın Bahçede Değerlendirilmesi

Bu bölüm kapsamında önerilen örnekleme yaklaşımı, bahçeyi çeşit, yükselti ve soğuk hava birikimi bakımından alt bölümlere ayırmaktır. Her alt bölümde farklı ağaçlardan tomurcuk, sürgün ve çiçek örnekleri alınmalı; incelenen ve zarar gören organ sayıları ayrı kaydedilmelidir. Zarar oranı, zarar gören organ sayısının toplam incelenen organ sayısına bölünüp 100 ile çarpılmasıyla hesaplanabilir. Farklı organların sonuçları tek yüzde içerisinde birleştirilmemelidir.

Don sonrası ilk inceleme, izleyen günlerdeki gelişme gözlemleri ve sezon sonu verim kaydıyla tamamlanmalıdır. Aynı gün ölçülen organ zararının doğrudan yıllık verim kaybı olarak sunulması uygun değildir. Ayrıca meteoroloji istasyonundaki minimum sıcaklık, bahçedeki bütün ağaçların aynı sıcaklığa maruz

kaldığını göstermez. Sensör yüksekliği ve konumu, ölçülen sıcaklığın yorumunda açıkça belirtilmelidir.

4. Don Riskinin Azaltılması

4.1. Bahçe Yeri ve Çeşit Seçimi

Risk azaltmanın ilk aşaması, bahçe tesisinden önce iklim ve topoğrafyanın değerlendirilmesidir. Soğuk havanın birikebildiği çukur alanlar ile hava akışını engelleyen çevresel unsurlar incelenmelidir. Bölge ortalamalarının yanında bahçeye yakın uzun yıllık minimum sıcaklık kayıtları kullanılmalıdır. Bu bölüm için önerilen analiz, son don tarihinin yıllar arasındaki dağılımıyla çeşidin tomurcuk patlama ve çiçeklenme dönemlerinin birlikte karşılaştırılmasıdır.

Geç yapraklanma, duyarlı organların donla karşılaşmasını azaltan bir kaçınma özelliğidir; aynı gelişme evresindeki dokunun don toleransıyla eşanlamlı değildir. Fallah vd. (2022), geç yapraklanan ve uygun meyve özellikleri taşıyan ceviz genotiplerini belirleyerek bu özelliğin ıslah değerini göstermiştir. Einollahi ve Khadivi (2024) ise 141 genotip içerisinde 46 geç yapraklanan genotip bildirmiştir. Bu bulgular seçim olanağını destekler; ancak her adayın farklı bölgelerde aynı uyumu göstereceğini kanıtlamaz.

4.2. Aktif Koruma Sistemleri

Radyasyon donu, açık ve sakin gecelerde yüzeylerden enerji kaybıyla gelişebilir; adveksiyon donu ise soğuk hava kütlesinin taşınmasıyla ilişkilidir. Koruma sistemi bu ayrım dikkate alınarak seçilmelidir. Drepper vd. (2022), meyve bahçelerinde koruma yöntemlerinin etkinliğinin çevresel koşullara bağlı olduğunu ve çalışmaların karşılaştırılabilirliğinin sınırlı kaldığını göstermiştir. Genel bahçe sonuçları, yüksek taçlı ceviz ağaçları için doğrudan etkinlik garantisi olarak kullanılmamalıdır.

Rüzgâr makineleri, uygun sıcaklık terselmesi bulunan koşullarda daha sıcak üst hava tabakasıyla alt tabakanın karışmasını amaçlar. Yağmurlama ise suyun donması sırasında açığa çıkan ısıdan yararlanır. Her iki yöntemde sistem kapasitesi ve olayın özellikleri belirleyicidir. Don koruması için yağmurlama, sıradan bir sulama uygulaması gibi planlanmamalı; su ve enerji sürekliliği, uygulama şiddeti ve başlatma-sonlandırma koşulları teknik olarak belirlenmelidir. Yetersiz tasarlanmış bir sistemin bütün koşullarda koruma sağlayacağı varsayılmamalıdır (Drepper vd., 2022).

4.3. Don Sonrası Bakım

Donun hemen ardından yalnızca kararmış görünüşe dayanarak geniş kapsamlı budama yapılması yerine, canlı dokuların ve yeniden gelişmenin değerlendirilmesi önerilir. Sulama ve besleme, kalan yaprak alanı ve sürgün gelişimi dikkate alınarak düzenlenmelidir. Aşırı gübrelemenin kaybolmuş çiçekleri geri getireceği düşünülmemelidir. Bu öneriler, hasarın şiddetine göre uzman değerlendirmesiyle uyarlanmalı; don sonrası ürün toparlanması ile gelecek sezonun ağaç sağlığı ayrı izlenmelidir.

5. İklim Değişikliği ve Islah Açısından Değerlendirme

Kış sıcaklıklarının yükselmesi soğuklama birikimini azaltabilirken, ilkbahardaki sıcak dönemler gelişmeyi hızlandırabilir. Bu iki etki birlikte ele alınmalıdır. Daha sıcak bir iklim, don riskinin her yerde aynı yönde değişeceği anlamına gelmez. Risk, düşük sıcaklığın meydana geldiği tarih ile duyarlı fenolojik dönemin çakışmasına bağlıdır. Yerel çeşit ve iklim verisi olmadan yalnızca yıllık ortalama sıcaklık artışından üretim kaybı tahmini çıkarılması yeterli değildir.

Soveili ve Khadivi (2023), geç yapraklanan ceviz genotiplerinin morfolojik ve pomolojik özelliklerini birlikte değerlendirmiştir. Bu yaklaşım, iklim riskinin azaltılmasıyla meyve kalitesinin birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir. Seçimde

yalnızca geç gelişme değil; uygun hasat zamanı, iç rengi, randıman ve verim de dikkate alınmalıdır. Vegetasyonun çok geç tamamlanması başka uyum sorunları oluşturabileceğinden, bir özelliğin en uç değerini seçmek her zaman en uygun yetiştiricilik sonucunu sağlamaz.

Bükücü vd. (2020), yaprak tomurcuğu patlaması ve çiçeklenmeyle ilişkili özellikleri kontrol eden önemli kantitatif özellik lokuslarını belirlemiştir. Bu bulgu, fenolojik özelliklerin genetik temelinin ıslah çalışmalarında kullanılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte moleküler belirteçlerin varlığı, çevre etkisini ortadan kaldırmaz. Aday materyallerin farklı yıllarda ve yetiştirme bölgelerinde sınanması, erken aşamadaki genetik seçimin üretim bakımından doğrulanmasını sağlar.

Türkiye için önerilen araştırma yaklaşımı, aynı çeşitlerin farklı rakım ve iklimlerde ortak protokolle izlenmesidir. Her lokasyonda saatlik sıcaklık, soğuklama modeli, tomurcuk gelişimi, erkek ve dişi çiçeklenme, don süresi ve organ bazında zarar birlikte kaydedilmelidir. Aynı bahçedeki çok sayıda tomurcuk, bağımsız bahçe tekerrürü yerine geçmez. Çok yıllı ve çok lokasyonlu çalışmalar, çeşit ile çevre etkileşiminin ayrılmasına yardımcı olur.

6. Sonuç

Cevizde soğuklama gereksinimi ve ilkbahar geç donları birbirinden bağımsız sorunlar değildir. Dinlenmeden çıkış, sıcaklık birikimi ve gelişme zamanı, duyarlı organların donla karşılaşmasını belirler. Bu nedenle ceviz için tek bir soğuklama saati veya bütün organlar için tek bir kritik zarar sıcaklığı vermek bilimsel olarak yeterli değildir. Kullanılan model, çeşit, gelişme evresi ve gözlem koşulları açıklanmalıdır.

Üretimde öncelik, yetiştirme yerine uygun çeşit ve tozlayıcıların seçilmesi, yerel iklim kayıtlarının değerlendirilmesi ve fenolojinin düzenli izlenmesidir. Geç yapraklanan materyaller risk

azaltmada önemli olmakla birlikte mutlak don dayanıklılığı sağlamaz. Aktif koruma sistemleri ise uygun meteorolojik koşullarda, yeterli teknik kapasiteyle çalıştırıldığında anlam taşır. Uzun vadede soğuklama, sıcaklık gereksinimi, organ dayanıklılığı ve meyve kalitesini birlikte ele alan ıslah ve yetiştiricilik programları daha dengeli bir uyum yaklaşımı sunmaktadır.

Kaynakça

Bartha, K. S., Bujdosó, G., & Stefanovits-Bányai, É. (2023). Biochemical Methods for the Characterisation of Walnut Genotypes with Different Levels of Frost Tolerance. Erwerbs-Obstbau, 65(2), 293-298. https://doi.org/10.1007/s10341-022-00823-2

Bükücü, Ş. B., Sütyemez, M., Kefayati, S., Paizila, A., Jighly, A., & Kafkas, S. (2020). Major QTL with pleiotropic effects controlling time of leaf budburst and flowering-related traits in walnut (Juglans regia L.). Scientific Reports, 10(1), 15207. https://doi.org/10.1038/s41598-020-71809-x

Charrier, G. (2022). Is winter coming? Minor effect of the onset of chilling accumulation on the prediction of endodormancy release and budbreak. Physiologia Plantarum, 174(3), e13699. https://doi.org/10.1111/ppl.13699

del Barrio, R. A., Orioli, G. A., Brendel, A. S., Lindström, L. I., Pellegrini, C. N., & Campoy, J. A. (2022). Persian walnut (Juglans regia L.) bud dormancy dynamics in Northern Patagonia, Argentina. Frontiers in Plant Science, 12, 803878. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.803878

Drepper, B., Bamps, B., Gobin, A., & Van Orshoven, J. (2022). Strategies for managing spring frost risks in orchards: effectiveness and conditionality—a systematic review.

Environmental Evidence, 11(1), 29. https://doi.org/10.1186/s13750-022-00281-z

Einollahi, F., & Khadivi, A. (2024). Morphological and pomological assessments of seedling-originated walnut (Juglans regia L.) trees to select the promising late-leafing genotypes. BMC Plant Biology, 24(1), 253. https://doi.org/10.1186/s12870-024-04941-9

Fallah, M., Rasouli, M., Hassani, D., Lawson, S. S., Sarikhani, S., & Vahdati, K. (2022). Tracing Superior Late-Leafing Genotypes of Persian Walnut for Managing Late-Spring Frost in Walnut Orchards. Horticulturae, 8(11), 1003. https://doi.org/10.3390/horticulturae8111003

Soveili, S., & Khadivi, A. (2023). Selecting the superior late-leafing genotypes of Persian walnut (Juglans regia L.) using morphological and pomological evaluations. BMC Plant Biology, 23(1), 379. https://doi.org/10.1186/s12870-023-04386-6

Szügyi-Bartha, K., Bujdosó, G., Froemel-Hajnal, V., Szügyi, S., Stefanovits-Bányai, É., & Szalay, L. (2022). Evaluation of the frost tolerance of Hungarian-bred walnut cultivars. Acta Biologica Szegediensis, 65(2), 163–170. https://doi.org/10.14232/abs.2021.2.163-170

BÖLÜM 2

SÜS BİTKİLERİNDE DENİZ YOSUNU EKSTRAKTLARININ KULLANIMI VE STRES FAKTÖRLERİNE KARŞI ETKİ MEKANİZMALARI

Ömer ÖZTAŞ[1]
Özlem ÜZAL[2]
Fikret YAŞAR[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. Özlem ÜZAL
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Sebze Yetiştiriciliği ve Islahı Anabilim Dalı, Orcid ID: 0000-0002-1538-820X
[3] Prof. Dr. Fikret YAŞAR
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Sebze Yetiştiriciliği ve Islahı Anabilim Dalı, Orcid ID: 0000-0001-6598-8580

GİRİŞ

Süs bitkileri yetiştiriciliği, dünya genelinde tarımsal üretimin en dinamik ve yüksek katma değerli kollarından birini oluşturmaktadır. Kesme çiçekler, saksılı bitkiler, iç ve dış mekan süs bitkileri ile çiçek soğanlarını kapsayan bu sektör, sadece estetik değerleri ile değil, aynı zamanda sağladıkları yoğun istihdam ve yüksek ihracat potansiyeli ile de stratejik bir öneme sahiptir (Rahmawati ve Efandari, 2025; Zamani ve ark.2025). Küresel süs bitkileri pazarı, son on yılda istikrarlı bir büyüme kaydederek günümüzde 100 milyar ABD dolarının üzerinde bir ticaret hacmine ulaşmıştır (Özbayram, 2026). Bu büyüyen pazarda Türkiye, uygun iklimsel koşulları, jeopolitik konumu ve hızla artan üretim alanları ile önemli bir oyuncu olma yolunda ilerlemektedir. Nitekim Özbayram (2026), Türkiye'de süs bitkisi üretim alanının 1990'lardan günümüze yaklaşık 500 hektardan 5.687 hektara yükseldiğini, ihracatın 135 milyon dolara ulaştığını ve sektörün 600 bin kişiye (100 bin doğrudan, 500 bin dolaylı) istihdam sağladığını belirterek bu gelişimi rakamsal olarak ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, İzmir ilinde dış mekân süs bitkisi fidanlıkları üzerine yapılan bir araştırma, sektörün bölgesel düzeydeki ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğine dikkat çekerek, Türkiye'nin bu alandaki potansiyelini vurgulamaktadır (Gür ve ark., 2026). Ancak, süs bitkileri üretimi, iklim değişikliğinin getirdiği olumsuz çevre koşullarına ve çeşitli hastalık-zararlı baskılarına karşı son derece duyarlıdır. Nitekim bitkilerde abiyotik ve biyotik stres faktörleri, büyüme ve gelişmeyi olumsuz etkileyerek ürün kalitesinde önemli kayıplara yol açmaktadır (Kumar ve ark., 2024). Süs bitkilerinde ise "kalite" kavramı, sadece verimle değil, aynı zamanda görsel kusursuzluk, çiçek rengi, yaprak formu ve vazo ömrü gibi parametrelerle tanımlanır (Özbayram, 2026). Bu nedenle, süs bitkilerinde en küçük bir stres belirtisi (yaprak sararması, çiçek

dökülmesi vb.), ürünün ticari değerini tamamen yitirmesine neden olabilir.

Geleneksel tarım yöntemlerinde, bitki büyümesini hızlandırmak ve zararlılarla mücadele etmek için yoğun kimyasal gübre ve sentetik pestisit kullanımı yaygındır. Ancak, bu kimyasalların toprak mikrobiyotasını bozması, yeraltı sularını kirletmesi, ekosistem dengesine zarar vermesi ve insan sağlığı üzerindeki riskleri, küresel düzeyde sürdürülebilirlik politikalarının doğmasına yol açmıştır (Nghia ve ark.,2025; Muska ve ark.,2025; Gangadaran ve ark.,2026). Bu bağlamda, bitki besleme ve koruma stratejilerinde "biyostimülantlar" devrim niteliğinde bir araç olarak kabul edilmektedir. Biyostimülantlar, bitkinin besin kullanım etkinliğini artıran, abiyotik strese karşı tolerans sağlayan, ürün kalitesini iyileştiren ve toprakta besin maddelerinin yarayışlılığını artıran madde veya mikroorganizmalar olarak tanımlanmaktadır (Bayram ve Murmu, 2025; Okorie ve ark., 2026). Deniz yosunu ekstraktları (DYE) , tarımsal üretimde bitki gelişimini desteklemek ve stres koşullarına karşı toleransı artırmak amacıyla kullanılan doğal kökenli biyostimülantlar arasında yer almaktadır (El-Beltagi ve ark.,2026). Bu derleme, süs bitkilerinde deniz yosunu kullanımının güncel durumunu ortaya koymak, DYE'lerin bitki fizyolojisi üzerindeki etkilerini analiz etmek ve özellikle stres koşulları altındaki koruyucu rollerini ulusal ve uluslararası hakemli dergilerdeki son bulgularla sentezlemeyi amaçlamaktadır.

2. DENİZ YOSUNU EKSTRAKTLARININ TARİHSEL GELİŞİMİ VE TANIMI

Deniz yosunlarının, özellikle kahverengi alglerin (*Phaeophyceae)*, kıyı toplulukları tarafından geleneksel olarak gıda ve toprak iyileştirici olarak değerlendirildiği bilinmektedir. Yirminci yüzyılın ikinci yarısından itibaren bu alglerden elde edilen sıvı ekstraktlar ticari ürünler halini almış ve tarımsal uygulamalarda yaygınlaşmıştır

(Nasiri ve ark., 2025; Staykov ve ark.,2025). Güncel teknolojik gelişmelerle birlikte, alkali hidroliz ve ultrason destekli ekstraksiyon gibi modern yöntemler kullanılarak deniz yosunlarından biyoaktif bileşiklerin, özellikle kompleks polisakkaritler, proteinler, mineraller, fenolikler ve esansiyel yağ asitlerinin, yüksek verimlilikle elde edilmesi mümkün hale gelmiştir. Tahar ve ark., (2025) bu bileşiklerin nutrasötik, farmasötik ve kozmesötik sektörlerdeki geniş uygulama potansiyeli olduğuna değinmiştir.

3. DENİZ YOSUNU EKSTRAKTLARININ KİMYASAL BİLEŞİMİ

Deniz yosunlarının biyostimülant olarak başarısı, içerdikleri biyoaktif bileşiklerin çeşitliliğine ve bu bileşiklerin birbirleriyle olan sinerjik etkilerine dayanmaktadır. Ticari olarak en yaygın kullanılan tür, Kuzey Atlantik kıyılarında yetişen *Ascophyllum nodosum* olmakla birlikte, *Ecklonia maxima*, *Durvillaea potatorum*, *Sargassum* ve *Laminaria* türleri de önemli kaynaklardır (Circuncisão ve ark.,2026).

3.1. Bitki Büyüme Düzenleyicileri (Hormonlar)

DYE'lerin en dikkat çekici özelliği, bitki bünyesinde doğal olarak bulunan hormonları içermesi veya bitkinin kendi hormon sentezini tetiklemesidir.

3.1.1. Oksinler

DYE'ler, başta İndol-3-Asetik Asit (IAA) olmak üzere çeşitli oksin benzeri bileşikler içerir. Oksinler, hücre bölünmesi, hücre uzaması ve özellikle adventif kök oluşumunda kritik rol oynar. Süs bitkilerinde DYE kullanımı, köklenme yüzdesini ve kök kalitesini önemli ölçüde artırır (Özcan ve ark.,2026; Manhas ve ark.,2026).

3.1.2. Sitokininler

Sitokininler, hücre bölünmesini teşvik eder ve yaprak yaşlanmasını geciktirir. DYE'ler içindeki zeatin, kinetin ve izopentenil adenin gibi sitokininler, klorofil parçalanmasını önleyerek yaprakların daha uzun süre yeşil kalmasını sağlar (Pandya ve ark.,2023). Bu durum, süs bitkilerinin raf ömrü ve vazo ömrü açısından hayati önem taşır.

3.1.3. Gibberellinler (GA)

Gibberellinler, tohum çimlenmesini başlatan ve gövde uzamasını kontrol eden temel hormonlardır. DYE uygulamalarının, bitkilerde gibberellin biyosentezini teşvik ederek veya yapısındaki gibberellin benzeri maddeler sayesinde bu süreçleri olumlu yönde etkilediği bilinmektedir (Kumari ve ark., 2023).

3.1.4. Absisik Asit (ABA)

Deniz yosunu ekstraktları, bitkilerin kuraklık stresine karşı savunma mekanizmalarını harekete geçirir. Bu ekstraktlarla ön uyarım yapılan bitkiler, stres koşullarıyla karşılaştıklarında sinyal moleküllerini daha etkin kullanırlar. Örneğin, ABA (Absisik asit), bitkinin stres sinyal mekanizmasında anahtar rol oynar ve kuraklık anında stomaların kapanmasını yönetir. Süs bitkileri üzerine yapılan bir çalışmada, DYE uygulanan *Iris tingitana* bitkilerinin kuraklık stresi altında ABA seviyelerini önemli ölçüde artırdığı ve böylece strese karşı daha hazırlıklı hale geldiği gözlemlenmiştir (Atwa ve ark., 2023).

4. ALJİNAT, LAMİNARİN VE FUKOİDAN: KAHVERENGİ ALGLERİN BİYOAKTİF BİLEŞENLERİ

Kahverengi alglerden elde edilen aljinat, laminarin ve fukoidan gibi polisakkaritler, yapısal ve kimyasal çeşitlilikleri sayesinde geniş bir biyolojik aktivite yelpazesi sergilemektedir (Khammassi ve ark., 2026).

4.1. Aljinatlar: Kahverengi alglerin hücre duvarında ve hücreler arası matrisinde bulunan aljinat, β-D-mannuronik asit (M) ve α-L-

guluronik asit (G) birimlerinden oluşan lineer bir polisakkarittir. Yapısındaki M/G oranı ve blok dağılımı, jelleşme ve viskozite gibi fizikokimyasal özelliklerini doğrudan etkiler. Aljinatın anyonik polielektrolit yapısı, özellikle guluronik asit birimleri üzerinden iki değerlikli katyonlarla (örneğin Ca^{2+}) etkileşime girerek "yumurta kutusu" modeliyle açıklanan jel oluşumuna imkân tanır. Bu özelliği, aljinatın doku mühendisliği, ilaç taşıyıcı sistemler ve biyomedikal uygulamalar gibi çeşitli alanlarda kullanımının temelini oluşturur (Khammassi ve ark., 2026).

4.2. Laminarin: Kahverengi alglerde başlıca depo polisakkariti olarak görev yapar ve β-(1,6) bağlarıyla dallanmış bir yapıdadır. İndirgen uçlarındaki şeker tipine göre M-zincirleri (D-mannitol ile sonlanan) ve G-zincirleri (glukoz ile sonlanan) olarak sınıflandırılır. (Khammassi ve ark., 2026).

4.3. Fukoidan: Kahverengi alglerin hücreler arası matrisinde yapısal bir bileşen olarak bulunan fukoidan, sülfatlanmış bir polisakkarittir. Yapısı ağırlıklı olarak sülfat ester grupları ve O-asetilasyon ile sübstitüe edilmiş fukoz birimlerinden oluşur; ayrıca mannoz, galaktoz, ksiloz ve üronik asitler gibi diğer monosakkaritleri de içerebilir. Sahip olduğu sülfat grupları, moleküle güçlü bir polianyonik karakter kazandırarak proteinler ve mineral iyonları gibi katyonik türlerle etkileşime girmesini sağlar. Bu özellikleri, fukoidanın antioksidan, antikoagülan, anti-enflamatuar ve antitümör gibi biyolojik aktivitelerinin temelini oluşturur (Khammassi ve ark., 2026).

5. MİNERAL MADDELER VE İZ ELEMENTLER

Deniz yosunu özütlerinin, bünyesinde bulundurduğu aljinat ve mannitol gibi doğal şelatlayıcı ajanlar sayesinde, mikro besin elementlerini (Fe, Zn, Mn) bitkilerin alımına daha uygun hale getirdiği bilinmektedir. Bu mekanizma, özellikle yapraktan uygulamalarda besin elementlerinin stomalar yoluyla alınımını

hızlandırarak sentetik gübrelere kıyasla daha hızlı bir etki göstermesini sağlar (Amrutha ve ark.,2025; Akter ve ark., 2026).

6. AMİNO ASİTLER, VİTAMİNLER VE BETAİNLER

DYE'ler, bitki metabolizması için kritik rol oynayan 20'den fazla amino asit içeren zengin bir yapıya sahiptir. Bu özütler aynı zamanda B1, B2, niasin, biotin, folik asit, E vitamini ve karoten gibi çeşitli vitaminleri ve antioksidan bileşenleri de bünyesinde barındırır. Yapılan araştırmalar, özütte bulunan amino asitlerin, bitkilerdeki antioksidan enzim aktivitesini artırdığını ortaya koymuştur. Bu durum, oksidatif stresi azaltarak bitkinin çevresel stres koşullarına karşı direncini ve toleransını önemli ölçüde yükseltmektedir. Ek olarak, deniz yosunu özütünün içerdiği yüksek potasyum, bitkilerde stoma hareketlerinin düzenlenmesine yardımcı olur. Bu sayede su kaybı en aza indirilir ve bitkinin turgor basıncı (hücre içi su basıncı) korunarak genel sağlığı desteklenir (Abdulrazzaq ve Abdulmajeed, 2025).

7. SÜS BİTKİLERİNDE BÜYÜME VE KALİTE PARAMETRELERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Deniz yosunu ekstraktlarının süs bitkileri üzerindeki etkileri, tohum aşamasından hasat sonrası vazo ömrüne kadar geniş bir yelpazeyi kapsar. Bu etkiler, bitki türüne, uygulama dozuna, uygulama zamanına ve yosun türüne bağlı olarak farklılık gösterir.

7.1. Tohum Çimlenmesi ve Fide Kalitesi

Süs bitkileri üretiminde tohum çimlenme oranı ve fide üniformitesi, üretim maliyetlerini ve planlamasını doğrudan etkileyen faktörlerdir. DYE uygulamalarının, özellikle dormansi gösteren veya düşük çimlenme gücüne sahip tohumlarda başarıyı artırdığı bildirilmiştir. DYE içindeki giberellin benzeri maddeler, tohum kabuğunun geçirgenliğini artırarak ve embriyo büyümesini tetikleyerek çimlenmeyi hızlandırır (Nirmani Kularathne ve ark.,2021).

7.1.1. *Lavandula* (Lavanta): tohumlarına uygulanan ozmotik koşullandırma uygulamaları özellikle deniz yosunu ekstraktı ve metil jasmonat kullanımı tohumların çimlenme oranını ve çimlenme hızını önemli ölçüde artırmaktadır. (Demırkaya ve ark., 2017)

7.1.2. *Helianthus annuus* (Süs ayçiçeği): tohumlarına uygulanan deniz yosunu (*Ascophyllum nodosum*) ekstraktının, özellikle 15 mL L^{-1} dozunda çimlenme yüzdesini ve hızını artırdığı, çimlenme süresini kısalttığı ve fide büyümesini (boy, yeşil aksam yaş ve kuru ağırlığı) olumlu yönde etkilediği bildirilmiştir. (Santos ve ark.,2019).

7.2. Kök Sistemi Mimarisi ve Besin Alınımı

DYE'lerin en karakteristik etkisi kökler üzerindedir. Oksin-sitokinin dengesi, yan kök oluşumunu ve kök tüylerinin yoğunluğunu artırır. Bu durum, bitkinin toprak hacminden daha fazla yararlanmasını sağlar (Tavares ve ark.,2020; Yang ve ark.,2025).

7.2.1. *Tagetes* (Kadife çiçeği): tohumlarına uygulanan deniz yosunu (*Ascophyllum nodosum*) ekstraktının, içerdiği oksin ve sitokinin benzeri maddeler aracılığıyla kök uzunluğunu ve çapını artırdığını, böylece bitkilerin toprak hacminden daha fazla yararlanmasına olanak tanıdığını bildirmiştir (Tavares ve ark.,2020).

7.2.2. *Cosmos bipinnatus* (Bahçe kozmosu): tohumlarına uygulanan deniz yosunu kaynaklı neoagarooligosakkaritlerin (NAOS), çimlenme sırasında ABA düzeyini düşürüp oksin, gibberellin miktarlarını artırarak kök gelişimini teşvik ettiğini ve özellikle stres koşullarında kök kuru ağırlığını yükselttiğini bildirmiştir. (Yang ve ark.,2025).

7.3. Vejetatif Büyüme ve Fotosentetik Verimlilik

DYE uygulamaları, yaprak alanını ve klorofil içeriğini artırarak fotosentetik kapasiteyi yükseltir. Klorofil sentezini teşvik eden magnezyum ve demir gibi elementlerin yanı sıra, sitokininlerin

kloroplast parçalanmasını önlemesi bu etkide anahtar rol oynar. (Annabi ve ark.,2025).

7.3.1. *China aster* (Çin asteri): DYE, özellikle %0.2 Humik asit + %0.5 Deniz yosunu özütü kombinasyonuyla uygulandığında, bitkide vejetatif büyümeyi önemli ölçüde teşvik etmiş; bitki boyunu, dal sayısını ve yaprak alanını artırarak fotosentetik verimliliği yükseltmiştir (Pandya ve ark.,2023).

7.3.2. *Gazania splender* L. (Gazanya): DYE, *Gazania* bitkisinde yaprak sayısı, klorofil içeriği ve karbonhidrat miktarını artırarak vejetatif büyümeyi ve fotosentetik verimliliği teşvik etmiştir (Khadim Al-Hamzawi, 2019).

7.3.3. *Aster amellus* L. (Aster): *Azospirillum lipoferum* ve *Ascophyllum nodosum*, özellikle düşük dozlu kombinasyonlar halinde, Aster fidelerinin kalitesini artırmada önemli bir potansiyel taşıdığı ve sürdürülebilir süs bitkileri yetiştiriciliğinde kimyasal gübrelere kıyasla çevre dostu ve etkili bir alternatif olabileceği bildirilmiştir (Öztaş,2026a).

7.3.4. *Calendula officinalis* L. (Aynısefa): Deniz yosunu özütü uygulamaları, yaprak biyokütlesi, yan dal ve çiçek sayısı gibi gelişim performans parametrelerinde Hoagland çözeltisine eşdeğer veya üstün sonuçlar sergilemiştir (Öztaş,2026b).

8.4. Çiçeklenme ve Hasat Sonrası Kalite (Vazo Ömrü)

Süs bitkilerinde ticari değerin en önemli göstergesi çiçek kalitesidir. DYE'ler, çiçek tomurcuğu oluşumunu teşvik eder ve çiçeklenme süresini uzatır (Bayat ve ark.,2025).

8.4.1. *Petunia hybrida* L. (Petunya): DYE uygulaması, petunya bitkisinde çiçek tomurcuğu oluşumunu teşvik ederek toplam çiçek sayısını artırmış ve çiçeklerin dayanıklılık süresini (çiçeklenme

süresi) kontrole kıyasla belirgin şekilde uzatmıştır (Bayat ve ark.,2025).

8.4.2. *Hibiscus sabdariffa* L. (Hibiskus): DYE uygulaması, çiçek tomurcuğu oluşumunu (indüksiyon) teşvik ederek bitki başına çanak sayısını, çanak ağırlığını ve kalınlığını önemli ölçüde artırmış, böylece çiçek kalitesini yükseltmiştir (Nazzal ve ark.,2019).

9. ABİYOTİK STRES FAKTÖRLERİNE KARŞI TOLERANS MEKANİZMALARI

Abiyotik stresler, bitki büyümesini sınırlayan ve süs bitkilerinde estetik kaybına yol açan en önemli faktörlerdir. DYE'ler, bitkilerin bu streslere karşı savunma mekanizmalarını "önceden uyarma" (priming) yeteneğine sahiptir (Kumari ve ark.,2023).

9.1. Kuraklık Stresi ve Su Kullanım Etkinliği

Su yetersizliği, bitkilerde turgor kaybına, fotosentezin durmasına ve hücre ölümlerine yol açar. DYE'ler, içerdikleri betainler, mannitol ve prolin gibi osmolitler sayesinde hücre içi osmotik basıncı dengeler.

9.1.1. *Hydrangea paniculata* (Salkım ortanca): DYE uygulaması, *Ascophyllum nodosum* bazlı deniz yosunu ekstraktı kuraklık stresini hafifletmek için bitki-su ilişkilerini iyileştirdiği (gövde büzülmesini azaltmış), klorofil kaybını yavaşlattığı, hormon benzeri bileşiklerle stres toleransını düzenlediği, dal uzunluğu ve biyokütleyi artırarak morfolojik gelişimi teşvik etiği ve kök gelişimini desteklediğini bildirmektedir (De Clercq ve ark.,2023).

9.1.2.*Tagetes patula* (Fransız kadifesi): DYE uygulaması, bitkilerde artan sulama aralıklarıyla oluşturulan kuraklık stresi koşullarında, deniz yosunu ekstraktı uygulamasının vejetatif büyüme parametrelerini (bitki boyu, dal sayısı, yaprak alanı, taze ve kuru ağırlık), çiçeklenme özelliklerini (çiçek sayısı, çiçek çapı, vazo

ömrü) ve uçucu yağ oranını önemli ölçüde iyileştirdiği belirtmiştir (Ayyat ve Abdel-Mola, 2020).

9.1.3.*Tagetes erecta* (Afrika kadife çiçeği): DYE uygulaması, üzerinde kuraklık stresi uygulanmış ve stresi hafifletmede en etkili uygulamanın 9 g L^{-1} dozunda deniz yosunu ekstraktı olduğu belirlenmiştir (Shahverdi ve ark., 2026).

9.1.4.*Pelargonium graveolens* (Itır): DYE uygulaması, kuraklık stresine karşı deniz yosunu ekstraktının özellikle 5 ve 7.5 mL/ L^{-1} dozlarında yapraktan uygulanmasının, bitkinin büyüme, fizyolojik özellikler ve uçucu yağ kompozisyonu üzerinde olumlu etkiler sağlayarak kuraklık stresini hafiflettiği belirlenmiştir (Gerami ve ark., 2025).

9.1.5. *Polianthes tuberosa* L. (Sümbülteber): DYE uygulaması, kuraklık stresine karşı deniz yosunu ekstraktı (500, 1000 ve 2000 ppm), hümik asit (150, 300 ve 600 ppm) ve mikoriza uygulamalarının etkilerinin incelendiği çalışmada, özellikle 2000 ppm deniz yosunu ekstraktı ve mikoriza uygulamalarının bitkinin morfolojik ve fizyolojik özelliklerini iyileştirerek kuraklık stresini hafiflettiği belirlenmiştir (Mahdhy ve ark., 2024).

9.2. Tuzluluk Stresi ve İyon Dengesi

Tuzluluk, iyon toksisitesine (özellikle Na^+ ve Cl^-) ve fizyolojik kuruluğa neden olur. DYE'ler, bitkinin seçici geçirgenliğini artırarak Na+ alımını sınırlar ve K+ alımını teşvik eder (Aziz ve ark.,2011).

9.2.1. *Amaranthus tricolor* (Horoz ibiği): DYE uygulaması, tuzlu su ile sulanan bitkilerde tuz stresini hafifletmiş; gövde uzunluğu, yaprak sayısı, çiçeklenme parametreleri ve bitki ağırlığında iyileşme sağlamıştır (Aziz ve ark.,2011).

9.2.2. *Lavandula officinalis* (Lavanta): bitkisinde tuzluluk stresine (40 ve 80 mM NaCl) karşı sıvı deniz yosunu gübresinin %4 dozunda

uygulanmasının, bitkinin kalite, büyüme, fotosentetik ve biyokimyasal özelliklerini iyileştirerek tuz stresinin olumsuz etkilerini hafiflettiği belirlenmiştir (Korkmaz ve Çiçek, 2024).

10. UYGULAMA YÖNTEMLERİ VE DOZLAR

10.1.Yaprak Uygulamaları: Yapraktan uygulamalar, deniz yosunu özütü ve diğer uygulama bileşenlerinin bitki yapraklarına püskürtülmesi yoluyla gerçekleştirilir.

10.1.1.*Tagetes patula* (Fransız kadifesi): DYE uygulaması, 3 ml/L ve 5 ml/L olmak üzere iki farklı dozu denenmiştir. Tavsiye edilen doz 5 ml/L'dir. Özellikle kuraklık stresini azaltmak için yüksek konsantrasyonun (5 ml/L) veya bu dozun potasyum silikat (5 ml/L) ile kombinasyonunun kullanılması önerilmektedir (Ayyat ve Abdel-Mola, 2020).

10.1.2. *Hydrangea paniculata* (Salkım ortanca): DYE uygulaması, kuraklık stresini hafifletmek için yapraktan uygulanan deniz yosunu ekstraktlarından *Ascophyllum nodosum*'un 1.5 L/ha veya 0.5 mL/L dozu önerilmiştir (De Clercq ve ark., 2023).

10.1.3. *China aster* (Çin aster): DYE uygulaması, Yapraktan uygulanan deniz yosunu ekstraktı %0.5 (5 ml/L) dozunda tek başına ve %0.2 hümik asit ile kombinasyon halinde test edilmiş; en iyi sonuçlar ve önerilen doz, hümik asit %0.2 + deniz yosunu ekstraktı %0.5 kombinasyonu olarak belirlenmiştir (Pandya ve ark., 2023).

10.2. Toprak Uygulamaları: Toprak uygulamaları, deniz yosunu özütünün belirlenen dozlarda yetiştirme ortamına verilmesiyle gerçekleştirilmiştir.

10.2.1. *Lagurus ovatus* L. (Tavşan kuyruğu otu): DYE uygulaması, topraktan uygulama için önerilen deniz yosunu özütü dozu ise 4 ml/L'dir. Araştırma sonuçlarına göre, bu doz bitkide

vejetatif büyüme, çiçeklenme ve verim özelliklerini en iyi şekilde iyileştirmiştir (Manhas ve ark.,2026).

10.2.2. *Viola tricolor* (Hercai menekşe): DYE uygulaması, 4 ml/L deniz yosunu özütünün topraktan uygulama olarak kullanılması, bitki boyu, bitki genişliği, dal sayısı, erken çiçeklenme, çiçek sayısı ve tohum verimi gibi birçok parametrede en iyi sonuçları vermiştir (Jena ve Topno 2023).

10.2.3. *Petunia hybrid* (Petunya): DYE uygulaması, 5 ml/L dozunda topraktan uygulanmasının, petunya fidelerinin hasat sonrası ömrünü uzatmak için uygun olduğu belirtilmiştir (Li ve Mattson 2015).

SONUÇ

Süs bitkileri sektöründe deniz yosunu ekstraktlarının (DYE) kullanımı, bitki büyümesini, kalitesini ve çevresel stres faktörlerine karşı toleransını artırmada önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu derleme, DYE'lerin zengin biyoaktif bileşen içeriği sayesinde, bitki büyüme düzenleyicileri (oksinler, sitokininler, gibberellinler, absisik asit), polisakkaritler (aljinat, laminarin, fukoidan), mineral maddeler, amino asitler ve vitaminler gibi çeşitli mekanizmalar aracılığıyla bitki fizyolojisi üzerinde olumlu etkiler gösterdiği yönde bilgileri yapılan çalışmalarla ortaya koymuştur. Özellikle, DYE uygulamalarının tohum çimlenmesini ve fide kalitesini iyileştirdiği, kök sistemini güçlendirerek besin alımını artırdığı, vejetatif büyümeyi ve fotosentetik verimliliği yükselttiği, çiçeklenmeyi teşvik ettiği ve hasat sonrası vazo ömrünü uzattığı belirtilmiştir. Ayrıca, kuraklık ve tuzluluk gibi abiyotik stres koşulları altında bitkilerin su kullanım etkinliğini artırarak ve iyon dengesini düzenleyerek toleranslarını önemli ölçüde artırdığı yönde bulgulara yer verilmiştir. Bu bulgular, DYE'lerin sürdürülebilir süs bitkileri yetiştiriciliğinde kimyasal gübre ve pestisit kullanımını azaltmaya

yönelik çevre dostu ve ekonomik bir alternatif olarak konumlandırılabileceğini göstermektedir.

Kaynakça

Abdulrazzaq, Z. M., & Abdulmajeed, A. H. (2025). Effect of Adding Micronutrients and Seaweed Extract on The Shoot, Root and Chemical Growth Characteristics of *Petunia hybrida*. Basrah Journal of Agricultural Sciences, 38(Special Issue)), 221-230.

Akter, Z., Jannat, S. A., Shibly, S. M., Sultana, A., Amran, A. H., Faria, J. H., & Anwar, M. P. (2026). Biostimulatory Influence of Commercial Seaweed Extract on Seed Emergence, Seedling Growth, and Vigor of Winter Rice. Phyton, 95(1).

Amrutha, T. G., Devi, U., Babybai, H. V., & Shilpa, H. D. (2025). Seaweed Extract as a Potential Stimulant in Mitigating Abiotic Stress: A Comprehensive Review. Journal of Advances in Biology & Biotechnology, 28(9), 990-1001.

Annabi, H. A., Laribi, B., Riahi, A., Hachana, A., Arfaoui, H., Mechri, M., & Bettaieb, (2025) T. Improvement of growth, biomass production and mineral composition of aquaponically grown lettuce by foliar application of two seaweed extracts. Asian Journal of Agriculture and Biologyhttps://doi.org/10.35495/ajab.2025.053

Atwa, D. I., Soliman, A. S., Hassan, M., & Mahmoud, A. W. M. (2023). Natural extracts elevated drought resistance in Iris tingitana plant. Journal of Applied Horticulture, 25(1).

Ayyat, A. M., & Abdel-Mola, M. A. M. (2020). Response of Tagetes patula plants to foliar application of potassium silicate and seaweed extract under various irrigation intervals. Scientific Journal of flowers and Ornamental Plants, 7(4), 513-526.

Aziz, N. A., Mahgoub, M. H., & Siam, H. S. (2011). Growth, flowering and chemical constituents performence of

Amaranthus tricolor plants as influenced by seaweed (*Ascophyllum nodosum*) extract application under salt stress conditions.

Bayat, H., Vahidi, M. J., Radan, A., & Parsa, Z. (2025). Impact of Seaweed Extract and Biochar on the Morphological and Physiological Traits of *Petunia hybrida* L. Agriculturae Conspectus Scientificus, 90(3), 211-217.

Bayram, C. A., & Murmu, K. (2025). Biostimulants as a Sustainable Strategy for Enhancing Vegetable Production: A Literature Review. International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences, (Advanced Online Publication), 15-16.

Circuncisão, A. R., Pereira, M., Dias, M. C., Oliveira-Pinto, P. R., Santos, C., Silva, A. M., & Silva, S. (2026). Exploiting Laminaria digitata *L. Aqueous* Extract for Tomato Biostimulation: A Physiological and Metabolomic Approach. Physiologia Plantarum, 178(1), e70762.

De Clercq, P., Pauwels, E., Top, S., Steppe, K., & Van Labeke, M. C. (2023). Effect of seaweed-based biostimulants on growth and development of *Hydrangea paniculata* under continuous or periodic drought stress. Horticulturae, 9(4), 509.

Demirkaya, M., Aydın, B., Şekerci, A. D., & Gülşen, O. (2017). Effects of osmotic conditioning treatments of lavender (*Lavandula angustifolia*) seeds on mean germination time and germination rate. International Journal of Secondary Metabolite, 4(3, Special Issue 2), 418-422.

El-Beltagi, H. S., Mohamed, A. A., Sameeh, M. Y., Ramadan, K. M., Mahmoud, M. A., Bendary, E. S., & Rezk, A. (2026). Seaweed-derived biostimulants and plant salinity stress: chemical diversity, mechanisms, and biochemical constraints.

Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, *54*(1), 15016-15016.

Gangadaran,M., Pooja K.M., Pathania N., Kumar A., Anas M., Mehta A, Kumari Y,. & Garima G., 2026 Climate change and soil health: Implications for sustainable land management., International Journal of Research in Agronomy 2026; 9(1): 569-578.
https://www.doi.org/10.33545/2618060X.2026.v9.i1h.4734

Gerami, N., Rahimmalek, M., Gholami, M., Tohidi, B., & Szumny, A. (2025). Changes in Phytochemical, Physiological, and Morphological Traits in Pelargonium graveolens as Affected by Drought Stress and *Ascophyllum nodosum* Extract. International Journal of Molecular Sciences, 26(18), 9210.

Gur, S., Kahraman, Ö., & Gür, N. (2026). Evaluation of Factors Affecting the Sustainability of Waste Management of Outdoor Ornamental Plant Nurseries by Analytical Network Process Method. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9(1), 225-237.

Jena, D., & Topno, S. E. (2023). Effect of seaweed extract application rate and method on growth, flowering and yield of pansy (*Viola* x *wittrockiana*). International Journal of Environment and Climate Change, 13(10), 519-525.

Khadim Al-Hamzawi, M. (2019, September). Effect of seaweed extract and micronutrients mixture on some growth characters and flowering of *Dianthus chinensis* l. and *Gazania splender* l. plants. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1294, No. 9, p. 092001). IOP Publishing.

Korkmaz, E., & Çiçek, N. (2024). Investigation of the alleviating effect of liquid seaweed fertilizer on *Lavandula officinalis*

under salt stress. Environmental Monitoring and Assessment, 196(2), 187.

Kumar, G., Nanda, S., Singh, S. K., Kumar, S., Singh, D., Singh, B. N., & Mukherjee, A. (2024). Seaweed extracts: enhancing plant resilience to biotic and abiotic stresses. Frontiers in Marine Science, 11, 1457500.

Kumari, S., Sehrawat, K. D., Phogat, D., Sehrawat, A. R., Chaudhary, R., Sushkova, S. N., & Shende, S. S. (2023). *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis, a pivotal biostimulant toward sustainable agriculture: a comprehensive review. Agriculture, vol. 13, no. 6.

Li, Y., & Mattson, N. S. (2015). Effects of seaweed extract application rate and method on post-production life of *petunia* and tomato transplants. HortTechnology, 25(4), 505-510.

Manhas, R., Singh, A., Laishram, N., Gupta, S., Gheware, K. M., Chand, G., & Gupta, V. (2026). Growth and flowering response of Lagurus (*Lagurus ovatus* L.) to *Ascophyllum nodosum* extract based biostimulant and gibberellic acid (GA3) application. BMC Plant Biology.

Mahdyh, S., Boogar, A. R., Aran, M., Ramezan, D., Zargar, M., & Diakite, S. (2024). Optimizing Tuberose production using mycorrhiza and biostimulants to enhance drought tolerance.

Muska, A., Pilvere, I., & Nipers, A. (2025). European green deal objective for sustainable agriculture: Opportunities and challenges to reduce pesticide use. Emerg. Sci. J, 9(4), 1774-1791.

Nasiri, Y., Kochakkhani, H., & Asadi, M. (2025). Effect of *Ascophyllum nodosum* extract and chemical fertilizers on the growth, yield and composition of *Satureja hortensis* L. essential oil. Pesquisa Agropecuária Tropical, 55, e81375.

Nazzal, M. M. K., & Al-Nuaymi, S. B. I. (2019). Effect of spraying cytokinin and seaweed extract on some flower growth traits of roselle *Hibiscus Sabdariffa* L. Plant Archives, 19(2), 1864-1867.

Nghia, N. K., Robatjazi, J., Vy, V. D. T., Tecimen, H. B., Lasar, H. G. W., Lesueur, D., & Luan, D. T. (2025). Effect of organic farming practices on soil health improvement of coconut farms. Environmental Technology & Innovation, 38, 104067.

Nirmani Kularathne, M. A. M., Srikrishnah, S., & Sutharsan, S. (2021). Effect of Seaweed Extractson Ornamental Plants. Current Agriculture Research Journal, 9(3).

Okorie, B., Dimitrova, K. P., & Balabanova, D. A. (2026). Effects of a microbial plant biostimulant on soil microbial activity, photosynthetic performance, and grain productivity of winter wheat under greenhouse conditions. Eurasian Journal of Soil Science, 15(1), 90-101.

Öztaş, Ö., Yaşar, F., & Üzal, Ö. (2026a). Aster (*Aster amellus* L.) Fide Gelişim Parametreleri ve Renk Değerleri Üzerine Farklı Dozlarda *Azospirillum lipoferum* ve *Ascophyllum nodosum* Ekstrakt Uygulamalarının Etkileri. *ANADOLU Journal of Aegean Agricultural Research Institute*, *36*(1), 63-72.

Öztaş, Ö., Üzal, Ö., Yaşar, F., & Yaşar, Ö. (2026b). *Bacillus subtilis* ve Deniz Yosunu Özütünün *Calendula officinalis* L. Bitkisinde Morfo-Fizyolojik Olarak Etkilerinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Süs ve Tıbbi Bitkiler Botanik Bahçesi Dergisi*, *5*(1), 30-38.

Özbayram, A. K. (2025). Küresel ve Türkiye Ölçeğinde Süs Bitkisi Üretimi Üzerine Bir Değerlendirme. Düzce Üniversitesi Süs ve Tıbbi Bitkiler Botanik Bahçesi Dergisi, 4(2), 20-31.

Özcan, E., Ali, S. A., Asim, M., & Atar, H. H. (2026). Biostimulant effect of seaweed extracts on micropropagation of important ground macrophyte Micranthemum tweediei and data-driven insights using machine learning and response surface regression. Aquaculture International, 34(2), 42.

Pandya, S., Patel, B., & Sindha, M. (2023). Efficacy of biostimulants on growth and flowering of China aster var. Arka Archana. *The Pharma Innovation Journal*, *12*(12), 3603-3607.

Pandya, S., Patel, B., & Sindha, M. (2023). Efficacy of biostimulants on growth and flowering of *China aster* var. Arka Archana. The Pharma Innovation Journal, 12(12), 3603-3607.

Rahmawati, N., & Efandari, A. (2025). Analysis of Ornamental Plant Export Business Using Business Model Canvas (BMC) at PT Nusaplant Flora Nusantara. In E3S Web of Conferences (Vol. 665, p. 01028). EDP Sciences.

Staykov, N., Kanojia, A., Lyall, R., Ivanova, V., Alseekh, S., Petrov, V., & Gechev, T. (2025). Sustainable agriculture through seaweed biostimulants: a two-year study demonstrates yield enhancement in pepper and eggplant. Frontiers in Plant Science, 16, 1655340.

Shahverdi, A. H., Eghlima, G., Hajizadeh, H. S., Aghamir, F., & Mohammadi, M. (2026). Enhancing zeaxanthin yield and drought resilience in African marigold via seaweed-derived biostimulant: A multilevel physiological and biochemical assessment. Industrial Crops and Products, 239, 122457.

Tahar, A., Zghida, H., Pereira, D. T., Korbee, N., Treichel, H., Figueroa, F. L., & Achour, L. (2025). Biochemical Composition and Alkaline Extraction Optimization of Soluble Bioactive Compounds from the Green Algae Caulerpa cylindraceae. Marine Drugs, 23(5), 208.

Tavares, A. R., dos Santos, P. L. F., Zabotto, A. R., do Nascimento, M. V. L., Jordão, H. W. C., Boas, R. L. V., & Broetto, F. (2020). Seaweed extract to enhance marigold seed germination and seedling establishment. SN Applied Sciences, 2(11), 1792.

Yang, X., Wen, C., Gong, L., & Zeng, H. (2025). Exogenous neoagaro-oligosaccharides accelerate seed germination and alleviate the impact of growth retardants on germination and seedling growth of garden cosmos (*Cosmos bipinnatus* Cav.). Scientific Reports, 15(1), 37500.

Zamani, F., Duri, L. G., Mori, M., & Paradiso, R. (2025). Advances in light manipulation in greenhouse horticulture: the innovative smart covers. Frontiers in Plant Science, 16, 1640530.

BÖLÜM 3

TARIMDA NANOTEKNOLOJİK YAKLAŞIMLAR

Mert İLHAN[1]

[1] Arş. Gör, Ordu Üniversitesi, Bahçe Bitkileri, Orcid: 0000-0002-0012-9782

Giriş

Nanoteknolojinin kavramsal temelleri, 1959 yılında fizikçi Richard Feynman'ın maddeyi atomik boyutta manipüle etme fikrini öne sürdüğü "There's Plenty of Room at the Bottom" adlı konuşmasına dayanmaktadır (Feynman, 1994). "Nanoteknoloji" terimi ise ilk kez 1970'lerde Norio Taniguchi tarafından hassas mühendisliği tanımlamak amacıyla literatüre kazandırılmıştır (Agrawal & Rathore, 2014). Tıp ve elektronik gibi disiplinlerde çığır açan bu teknoloji; 1980'li yıllarda mikroskopi tekniklerinin gelişmesiyle tarım bilimlerine de entegre olmaya başlamıştır (Chugh & Jahangir Dar, 2021). Tarımsal alandaki ilk sistematik adımlar, artan küresel gıda talebine yanıt olarak 2003 yılında Birleşik Devletler Tarım Bakanlığı'nın (USDA) yayımladığı yol haritasıyla atılmış; bu süreç nano gübre, pestisit ve sensör araştırmalarını küresel çapta ivmelendirmiştir (Singh & Sengar, 2020). Nitekim 2016 yılı itibarıyla sadece tarım ve gıda çatısı altında yayımlanan 14.000'e yakın bilimsel belge ve 2700'ü aşkın patent, bu alanın stratejik önemini açıkça ortaya koymaktadır (Prasad ve ark., 2017; Moulick ve ark., 2024; Anas ve ark., 2025). Temel olarak 100 nanometrenin altındaki atomik ve moleküler ölçekteki maddelerin tasarlanması ve manipüle edilmesine dayanan bu bilim dalı malzemelere benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikler kazandırarak tarımda verimliliği maksimize edecek yenilikçi teknolojilerin kapısını aralamaktadır (Saravanan & Vetha Potheher, 2023). Nano boyutun makro ve mikro boyutlarla karşılaştırılması Şekil 1'de gösterilmiştir.

Bu yenilikçi teknolojinin temelini oluşturan nanomalzemeler; fiziksel (mekanik öğütme vb.), kimyasal (çöktürme vb.) ve biyolojik (yeşil sentez) olmak üzere çeşitli temel yaklaşımlarla üretilebilmekte olup, sentez mekanizmalarına ait detaylar Şekil 2'de özetlenmiştir (Ansari ve ark., 2020). Tarımsal

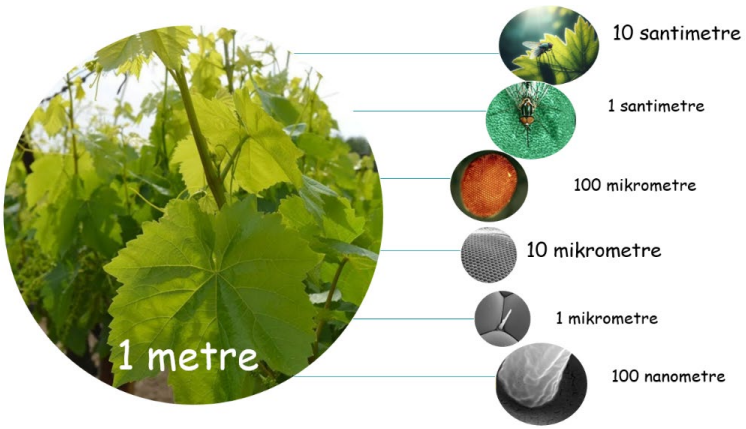
uygulamalara entegre edilen bu nanomalzemeler, yapısal formlarına göre çeşitli gruplara ayrılmaktadır (Majumdar ve ark., 2021; Pagano ve ark., 2025). Bunlar arasında sıklıkla kullanılan nanopartiküller (metal ve metal oksit yapılar); yüksek yüzey alanı/hacim oranları sayesinde üstün reaktivite ve hücresel penetrasyon özellikleri sergilemektedir (Carnovale ve ark., 2016). Karbon bazlı nanotüpler ve nanofiberler yapısal stabiliteleri ile öne çıkarken; nanokompozitler ve kuantum noktaları (quantum dots) gibi yapılar özellikle optik ve analitik sensör teknolojilerinde belirleyici rol oynamaktadır (Patel ve ark., 2023; Oliveira ve ark., 2026). Boyuta bağlı artan yüzey reaktivitesi, bu materyallerin geleneksel formlarına kıyasla çok daha düşük dozlarda çok daha yüksek biyoaktivite göstermesini sağlamaktadır (Gupta ve ark., 2023).

Küresel nüfus artışı, daralan tarım alanları ve şiddetlenen iklim değişikliği gibi faktörler gıda güvenliğini ciddi şekilde tehdit ederken, nanoteknoloji destekli tarım uygulamaları bu baskıları hafifletmede güçlü bir alternatif sunmaktadır (Kumari ve ark., 2026). Bu bağlamda geliştirilen nanogübreler, bitki besin maddelerini hücresel düzeyde doğrudan ileterek emilim verimliliğini artırmakta; nanopestisitler ve nanoherbisitler ise etken maddelerin hedefe yönelik salınımını sağlayarak tarımsal kimyasal kullanımını önemli ölçüde sınırlandırmaktadır (Giraldo ve ark., 2014; Nuruzzaman ve ark., 2016; García-Gómez ve ark., 2018; Zaman ve ark., 2025; Thakur & Yadav, 2025). Geleneksel agrokimyasalların aksine, hedef dokuya doğrudan nüfuz eden bu sistemler çevresel toksisiteyi ve kirliliği başarılı bir şekilde baskılamaktadır (Singh ve ark., 2017). Öte yandan, nano düzeydeki bu girdilerin yapay zeka (AI), Küresel Konumlandırma Sistemleri (GPS) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) gibi akıllı teknolojilerle entegrasyonu, modern hassas tarım uygulamalarının temelini oluşturmaktadır (Zhang ve ark., 2021). Geliştirilen bu sensör ve takip ağları; toprak koşullarının, çevresel parametrelerin ve bitki sağlığının gerçek zamanlı

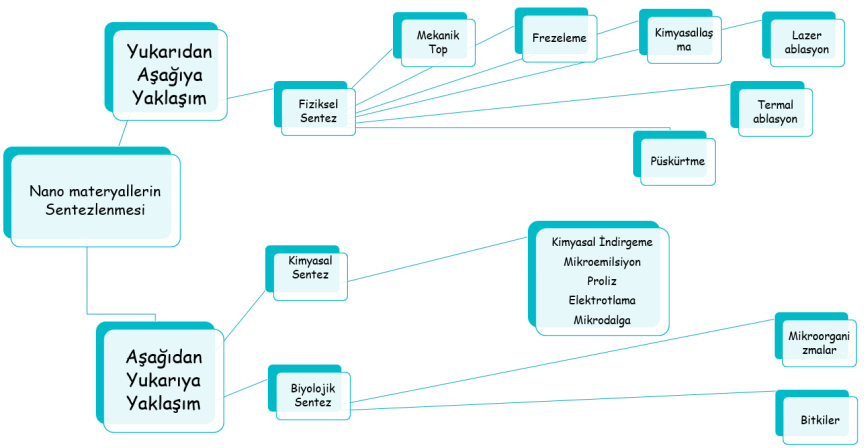
monitörizasyonuna olanak tanıyarak kaynak kullanımını optimize etmektedir (Shukla ve ark., 2024). Sonuç olarak, nanoteknolojik sistemlerin tarıma entegrasyonu, sürdürülebilir üretim yoğunlaşmasını destekleyerek geleceğin gıda güvenliğinin sağlanmasında kritik bir öneme sahiptir.

Bu çalışmada tarımda nanoteknolojik yaklaşımlar güncel literatür ışığında derlenmiştir.

Şekil 1 Nano boyutun diğer boyutlar ile karşılaştırılması



Şekil 2 Nano materyallerin sentezleme yöntemleri



Kaynak: (Ansari ve ark., 2020)

Nanomalzemelerin sınıflandırılması ve özellikleri

Tarımsal uygulamalarda kullanılan nanomalzemeler, bitkiler tarafından yaprak ve kök yoluyla emilerek hedeflenen dokulara daha kolay ve etkili bir şekilde ulaşabilmektedir (Sahithya ve ark., 2025). Bitki besin maddelerinin alınmasını optimize eden ve çevresel olumsuz etkileri azaltan bu materyallerin tarımsal etkinliği ve biyoaktivitesi; boyut, şekil ve üretim tekniği gibi fizikokimyasal özelliklerine bağlı olarak doğrudan değişkenlik göstermektedir (Gupta ve ark., 2023). Buna göre nanopartiküllerin boyutunun küçülmesi hücresel porlardan geçişi kolaylaştırırken, spesifik yüzey morfolojileri aktif bileşenlerin bitki dokularına tutunmasını ve biyoaktivitesini artırmaktadır (Carnovale ve ark., 2016). Bu yapısal özelliklerin doğru optimize edilmesi, tarım sektöründe nano gübrelerin, nano pestisitlerin ve nano biyosensörlerin daha akıllı ve hedef odaklı çalışmasına olanak tanımaktadır (Dağhan, 2017; Özatay ve Kaya, 2025). Uygulanan nanopartiküllerin boyutu ve morfolojisinin yanı sıra konsantrasyonu, kimyasal bileşimi ve bitkinin bu maddelere maruz kalma süresi de, bitkilerin abiyotik streslere karşı dayanımını ve genel beslenme etkinliğini doğrudan belirleyen kritik parametreler olarak öne çıkmaktadır (Al-Dossary ve ark., 2025).

Tarımda kullanılan nanomalzemeler, kimyasal bileşimlerine göre başlıca metal ve metal oksit nanopartiküller, karbon bazlı nanopartiküller, polimerik nanopartiküller ve nanokompozit yapılar olarak dört gruba ayrılmaktadır (Majumdar ve ark., 2021; Pagano ve ark., 2025). Metal nanopartiküller (gümüş, altın, platin, paladyum, bakır, çinko vb.) ve metal oksit nanopartiküller (çinko oksit, titanyum dioksit, demir oksit, bakır oksit, seryum oksit vb.), bitki hastalıklarına karşı önemli antimikrobiyal özellikler sağlamaktadır (Patel ve ark., 2023; Oliveira ve ark., 2026). Ayrıca bu yapılar; demir, çinko ve bakır gibi esansiyel mikro elementleri

yüksek biyoyararlanım ile bitkiye doğrudan sunarak tohum çimlenmesini iyileştirme, besin noksanlıklarını giderme ve enzimatik aktiviteleri teşvik etme gibi kritik besin iletimi görevleri üstlenmektedir (Kulkarni, 2015; Kumar ve ark., 2025). Karbon bazlı nanopartiküller (karbon nanotüpler, fullerenler, grafen, karbon kuantum noktaları, nano elmaslar); yüksek iletkenlikleri ve yapısal stabilite avantajlarıyla bitki büyümesini desteklemektedir (Patel ve ark., 2023; Oliveira ve ark., 2026). Polimerik nanopartiküller (zein, kitosan, aljinat, jelatin, polilaktikkoglikolik asit, polilaktik asit, polietilen glikol, polikaprolakton); aktif bileşenleri kapsülleyerek gübre ve pestisitlerin bitkiye yavaş ve kontrollü salınımını sağlayan bir mekanizma sunmakta ve kimyasal yıkanmayı engellemektedir (Majumdar ve ark., 2021; Pagano ve ark., 2025). Son olarak nanokompozit yapılar (birden fazla farklı nanoyapının bir araya getirilmesiyle oluşturulan bütünleşik sistemler); bünyesindeki bileşenlerin sunduğu kontrollü salınım, besin iletimi ve antimikrobiyal etki gibi özellikleri tek bir sistemde entegre ederek tarımsal uygulamalarda kaynak tüketimini optimize etmekte ve verimliliği en üst düzeye çıkarmaktadır (Patel ve ark., 2023; Oliveira ve ark., 2026).

Nanoteknolojik ürünlerin bitkiler üzerindeki etkileri

Besin alımı-gübreleme ve verimlilik üzerindeki etkileri

Tarımsal üretimde kullanılan geleneksel gübreler; toprakta çözünemeyen formlara dönüşme, yıkanma ve çökelme gibi nedenlerle düşük kullanım etkinliği gibi önemli sorunlar barındırmaktadır (Achari & Kowshik, 2018; Ahmad ve ark., 2022). Bu engelleri hedefe yönelik ve kontrollü salınım mekanizmalarıyla aşan nanogübreler, bitki besin maddelerini nanometre boyutunda sunarak besin emilimini ve genel kullanım verimliliğini geleneksel gübrelere kıyasla %30-50 oranında artırmaktadır (Duhan ve ark., 2017; Chhipa, 2019). Yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip

nanopartiküller, stomalar ve kök gözenekleri yoluyla bitkiye girerek apoplastik ve simplastik yollarla taşınır; hücre duvarlarındaki nanoporlar ve ksilem aracılığıyla yapraklara ulaşarak fotosentez verimliliğini optimize eder (Liu & Lal, 2015; Al Juthery ve ark., 2021). Özellikle nanoboyutlu zeolitlerle zenginleştirilmiş besinler, yavaş salınımlı gübre görevi görerek besin kaybını en aza indirmektedir (Iavicoli ve ark., 2017). Nanopartiküllerin (ZnO, TiO_2, CuO, Fe, SiO_2, MnO) bitki fizyolojisi üzerindeki olumlu etkileri, uygulanan konsantrasyona ve yönteme doğrudan bağlıdır (Doğaroğlu & Uysal, 2026). Literatürdeki çalışmalar; doğru dozda uygulanan nanogübrelerin buğday, nohut, ayçiçeği, domates, soya, kabak ve üzüm gibi birçok tarım ürününde klorofil içeriğini, biyokütleyi ve abiyotik stres (kuraklık ve tuzluluk) toleransını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir (Lu Changmei ve ark., 2002; Gao ve ark., 2006; Prasad ve ark., 2012; Burman ve ark., 2013; Raliya & Tarafdar, 2013; Tarafdar ve ark., 2014; Raliya ve ark., 2015; Torabian ve ark., 2016; Liu ve ark., 2016; Shebl ve ark., 2019; Nile ve ark., 2022; Daler ve ark., 2024; Pagano ve ark., 2025). Örneğin spesifik nanopartikül uygulamalarının, kontrol grubuna kıyasla marulda bitki boyu ve yaprak alanı gibi büyüme parametrelerinde %12-54 oranında artış sağladığı; mısırda ise tohum çimlenme oranını %80 seviyesine kadar yükselttiği bildirilmiştir (Subbaiah ve ark., 2016). ZnO nanoparçacıklarının stomalar aracılığıyla sağladığı stabilize çinko sunumu, bitki enzim aktivitesi ve fotosentez kapasitesinin artırılmasında kritik bir rol oynamaktadır (El-Hak El ve ark., 2019; Saleem ve ark., 2022; Singh ve ark., 2024). Ayrıca muz kabuğu gibi tarımsal atıklardan sentezlenen çevreci nanogübreler de bitkisel verimliliği sürdürülebilir bir şekilde desteklemektedir (Sivarethinamohan & Sujatha, 2021). Ancak bu etkiler doza bağlı olarak çift yönlüdür. Düşük ve optimum konsantrasyonlarda uygulanan Cu ve TiO_2 nanopartikülleri meyve kalitesini ve klorofil içeriğini artırırken; eşik değerin üzerindeki aşırı dozajlar (örneğin 500 mg/L Cu veya yüksek düzeyde TiO_2, Fe, SiO_2

uygulamaları) hücresel membran bütünlüğünü bozarak fitotoksik etki yaratmakta ve verimi düşürebilmektedir (Gao ve ark., 2011; López-Vargas ve ark., 2018; Elsakhawy ve ark., 2018; Usman ve ark., 2020). Bu durum, bitki sağlığının iyileştirilmesinde devrim niteliğinde olan bu teknolojiden maksimum fayda sağlamak için optimum uygulama dozajlarının dikkatle belirlenmesi gerektiğini açıkça vurgulamaktadır.

Hastalık ve zararlılarla mücadelede nanopartiküllerin etkisi

Geleneksel pestisit uygulamaları; hedeften sapma, düşük etki süresi, yüksek çevresel kontaminasyon ve potansiyel sağlık riskleri gibi dezavantajlar barındırmaktadır. Tarımsal hastalık ve zararlılarla mücadelede bu sorunlara yenilikçi bir çözüm sunan nanopestisitler, aktif bileşenlerin hedefe yönelik ve kontrollü salınımını (enkapsülasyon) sağlayarak çevresel toksisiteyi ve sağlık risklerini en aza indirmektedir (Ditta, 2012; Demirbilek, 2015). Bu nanomalzemeler, ultra küçük partikül boyutları sayesinde bitki yüzeyine tutunmayı, doku penetrasyonunu ve hücresel alımı maksimize ederken; kullanılacak aktif madde miktarını ve tarımsal uygulama sıklığını önemli ölçüde minimize etmektedir (Giraldo ve ark., 2014; Su ve ark., 2020; Jafrasteh ve ark., 2023; Shelar ve ark., 2023). Ayrıca, çözünürlüğü düşük bileşenlerin kimyasal stabilitesini optimize ederek erken bozulmayı ve uçuculuk (volatilizasyon) yoluyla gerçekleşen ürün kaybını engellemektedir (Athanassiou ve ark., 2018).

Bitki patolojisi bağlamında; metal (gümüş, demir, bakır, çinko), ametal, karbon ve polimer bazlı nanopartiküller, geleneksel uygulamalara kıyasla çok daha üstün bir antimikrobiyal etkinlik sergilemektedir (Prasad ve ark., 2012; Moghaddasi ve ark., 2013; Pradhan ve ark., 2013; Raliya & Tarafdar, 2013; Burman ve ark., 2013; Kim ve ark., 2014). Örneğin, yüksek antimikrobiyal kapasiteye sahip gümüş nanopartiküllerinin (AgNP); domateste kök-

ur nematoduna (Ardakani, 2013) ve biberde antraknoz hastalığına (Lamsal ve ark., 2011) karşı düşük dozlarda dahi başarılı sonuçlar verdiği bildirilmiştir. Literatürdeki spesifik çalışmalarda, muz bitkisinde Colletotrichum musae patojenine karşı uygulanan AgNP'nin, kontrol grubunda %75.6 olan hastalık şiddetini %6.7 seviyesine kadar başarılı bir şekilde baskıladığı rapor edilmiştir (Jagana ve ark., 2017). Benzer şekilde, çinko oksit (ZnO) nanopartikülleri ağır metal stresini hafifletmekte ve reaktif oksijen türleri (ROS) üreterek bitkilerin doğal savunma mekanizmalarını aktive etmektedir (Banik & Pérez-de-Luque, 2017; Rizwan ve ark., 2017; Iranbakhsh ve ark., 2021). Nitekim ZnO ile kaplanmış buğday tohumlarında, membran bütünlüğünün bozulması ve hif deformasyonu gibi mekanizmalar aracılığıyla Fusarium graminearum patojenine karşı yüksek hücresel direnç sağlandığı saptanmıştır (Dimkpa ve ark., 2013; Savi ve ark., 2015). Domateste Phytophthora infestans patojenini baskılamak amacıyla kullanılan nano-CuO formülasyonlarının ise ticari bakır fungisitlere kıyasla daha üstün veya eşdeğer koruma sağladığı kanıtlanmıştır (Giannousi ve ark., 2013). Biyosentezlenmiş bu nanopartiküllerin sunduğu geniş yüzey alanı, etkili doku penetrasyonu ve kontrollü iyon salınım kapasitesi (Gudkov ve ark., 2021); gelecekteki sürdürülebilir bitki koruma ve entegre zararlı yönetimi stratejileri için oldukça güçlü bir potansiyel sunmaktadır.

Abiyotik ve biyotik stres koşulları üzerine nanomalzemelerin etkisi

Nanopartiküller (NP); bitkilerde kuraklık, tuzluluk, ekstrem sıcaklıklar ve ağır metal toksisitesi gibi abiyotik stresler ile patojen kaynaklı biyotik stres faktörlerinin yarattığı fizyolojik baskıyı hafifletmede kritik bir rol oynamaktadır. Bu materyaller, stres altındaki bitkilerde reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimini dengeleyerek ve süperoksit dismutaz, katalaz, peroksidaz, nitrat redüktaz gibi antioksidan savunma mekanizmalarını güçlendirerek

hücresel toleransı önemli ölçüde maksimize etmektedir (Lei ve ark., 2007; Wang ve ark., 2015; Abdel-Aziz ve ark., 2023; Upadhayay ve ark., 2023; Dutta ve ark., 2023). Sağlanan bu hücresel redoks dengesi, prolin ve spesifik amino asitlerin birikimini teşvik ederken; klorofil içeriğini ve fotosentez verimliliğini optimize ederek bitkiyi hücresel düzeydeki oksidatif hasardan korumaktadır (Kirova ve ark., 2022; Thabet & Alqudah, 2024). Ancak nanoteknolojik ürünlerin bu stres faktörleri üzerindeki etkilerinde, uygulanan konsantrasyon ve hedef bitki türü son derece belirleyici bir role sahiptir. Örneğin, titanyum dioksit (TiO_2) uygulaması soya fasulyesinde abiyotik strese karşı büyüme parametrelerini olumlu yönde desteklerken; buğday köklerinde eşik değerin aşılması yüksek veya ROS üretimine ve DNA hasarına yol açarak fitotoksik etki yaratabilmektedir (Kumar ve ark., 2018). Literatürde farklı nanopartiküllerin, çeşitli bitki türlerinde abiyotik (kuraklık, tuzluluk, sıcaklık, ağır metal vb.) ve biyotik stres koşullarındaki spesifik etkilerini detaylı olarak inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Tablo 1). Sonuç olarak nano bazlı uygulamalar, çoklu stres faktörlerine karşı bitki dayanımını artırmada güçlü bir potansiyel sunmaktadır. Ancak bu teknolojinin tarımsal sistemlere geniş çaplı ve güvenli entegrasyonu için uzun vadeli ekotoksikolojik etkilerin izlenmesi, büyük ölçekli saha denemelerinin yürütülmesi ve toprak mikroorganizmalarıyla olan sinerjik uyumun optimize edilmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Tablo 1 Çeşitli nanopartiküllerin farklı stres koşullarında bitkiler üzerindeki etkileri

Nanopartikül (NP)	**Bitki Türü**	**Stres Faktörü**	**Temel Etkiler ve Bulgular**	**Kaynakça**
Titanyum Dioksit (TiO_2)	Keten (*Linum usitatissimum*)	Kuraklık	Klorofil/karotenoid artışı, H_2O_2 ve MDA seviyelerinde	(Aghdam ve ark., 2016; Faraji & Sepehri, 2020)

Nanopartikül (NP)	Bitki Türü	Stres Faktörü	Temel Etkiler ve Bulgular	Kaynakça
	Buğday (*Triticum aestivum*)		azalma, antioksidatif enzim aktivasyonu	
Çinko Oksit (ZnO)	Soya (*Glycine max)* Bamya (*Abelmoschus esculentus)* Pamuk (*Gossypium hirsitum*)	Kuraklık Tuz	Çimlenme ve fotosentetik pigment artışı, SOD/CAT aktivasyonu	(Sedghi ve ark., 2013; Alabdallah & Alzahrani, 2020; Priyanka & Venkatachalam, 2016)
Silisyum / SiO_2	Çilek (Fragaria×anansa) Üzüm (Vitis vinifera)	Tuz, Kuraklık	Büyüme parametrelerinde, prolin ve klorofil içeriğinde artış, stoma iletkenliğinde iyileşme	(Avestan ve ark., 2019; Daler ve ark., 2025)
Demir Sülfat / Fe	Ayçiçeği (*Helianthus annuus*) Buğday (*Triticum aestivum*)	Tuz, Kuraklık Kadmiyum	Klorofil ve Fe artışı, sodyum ve kadmiyum birikiminde önemli azalma	(Torabian ve ark., 2017; Adrees ve ark., 2020)
Gümüş Nitrat / Ag	Buğday (*Triticum aestivum*)	Sıcaklık	Kök ve sürgün uzunluğunda, genel morfolojik gelişimde artış	(Iqbal ve ark., 2019)
Alüminyum Oksit	Soya (*Glycine max*)	Sel Baskını	Hipokotil uzunluğu ve glikoliz/mitokondriyal protein sentezinde artış	(Mustafa & Komatsu, 2016)

Nanopartikül (NP)	Bitki Türü	Stres Faktörü	Temel Etkiler ve Bulgular	Kaynakça
Selenyum	Domates (*Solanum lycopersicum*)	Düşük/Yüksek Sıcaklık	Kontrol grubuna kıyasla sürgün ve kök biyokütlesinde, kök hacminde iyileşme	(Haghighi ve ark., 2014)
Kitosan	Arpa (*Hordeum vulgare*)	Kuraklık	Nispi su içeriği, protein, prolin ve CAT/SOD enzim aktivitelerinde artış	(Behboudi ve ark., 2018)

Akıllı tarım sistemlerinde nanoteknoloji entegrasyonu

Akıllı tarım sistemlerinde nanoteknoloji entegrasyonu, tarımsal verimliliği maksimize ederken çevresel etkileri minimize eden yenilikçi bir yaklaşımdır. Bu kapsamda öne çıkan nano biyosensörler; geleneksel sensörlere kıyasla üstün hassasiyet sunarak sıcaklık, don, sulama zamanı, besin ihtiyacı ve zararlı varlığı gibi tarımsal değişkenleri gerçek zamanlı olarak monitörize eden analitik ünitelerdir (Bhagat ve ark., 2015; Fraceto ve ark., 2016; Kaushal & Wani, 2017; Bratovčić ve ark., 2023). Mevcut tarımsal sistemlerde; bitki patojenlerinin erken teşhisi, gıda güvenliğinin sağlanması ve tarımsal kimyasal girdilerin hedefe yönelik, kontrollü kullanımının optimize edilmesi açısından bu ileri düzey takip sistemlerine kritik bir gereksinim duyulmaktadır (Camara ve ark., 2019; Sanzari ve ark., 2019). Tarımsal ihtiyaçlara spesifik olarak yanıt verebilen bu sistemler; plazmonik materyaller, floresans yapılar, karbon nanotüpler ve kuantum noktaları gibi çeşitli nanomalzemelerin entegrasyonuyla üretilmektedir (Subramanian & Tarafdar, 2011; Ashoka ve ark., 2017; Afify ve ark., 2019). Bu materyallerden üretilen sensörlerin çalışma prensipleri genel olarak

biyolojik ve fizikokimyasal bileşenlerin etkileşimine dayanmakta olup; bitkilerdeki mekanik deformasyonları veya biyokimyasal değişimleri elektriksel sinyallere dönüştürerek, kablosuz nanoanten özellikleri vasıtasıyla harici veri tabanlarına anlık olarak aktarırlar (Rai ve ark., 2012; Mocan ve ark., 2017; Mathivanan, 2021; Wu ve ark., 2025). Geliştirilen bu sensör ağları; sulamada su tutma kapasitesini optimize eden nanohidrojeller (Koushal ve ark., 2025) ve kimyasal sızıntıyı baskılayan nano enkapsülasyon teknikleriyle (Madhavi ve ark., 2020) birleştiğinde, bitkilerin besin alımını teşvik etmekte, toprak nemi ile pH seviyesini dengeleyerek mahsul verimini %20-50 oranında artırabilmektedir (Demirbilek, 2015; Antonacci ve ark., 2018; Subramanian ve ark., 2022; Miguel-Rojas & Pérez-de-Luque, 2023; Shukla ve ark., 2024). Ancak, bu formülasyonların toksik olmayan yöntemlerle sentezlenmesi zorluğu, sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından halen aşılması gereken bir parametre olarak öne çıkmaktadır (Ashoka ve ark., 2017). Sonuç olarak, nanomalzemelerle desteklenen bu analitik sistemler; abiyotik strese karşı toleransı güçlendirmenin yanı sıra genetik iyileştirme, doğal kaynak yönetimi ve gıda güvenliği gibi alanlarda gelecekteki uygulamalar için güçlü potansiyeller barındırmaktadır (Eapen & D'Souza, 2005; Chau ve ark., 2007; Kuzma, 2007; Ahmed ve ark., 2012; Graham ve ark., 2016; Alhamid ve ark., 2018).

Sonuç ve öneriler

Nanoteknolojinin tarım sektörüyle entegrasyonu; birim alandan elde edilen verimi maksimize etme ve kaynak kullanımını minimize ederek tarımsal girdileri optimize etme noktasında geleneksel yöntemlere kıyasla devrim niteliğinde avantajlar sunmaktadır. Akıllı ve hassas tarım sistemlerinin temelini oluşturan nanogübreler, nanopestisitler ve nanosensörler; bitki besin alımını teşvik etmekte, hastalık ve zararlılarla mücadelede hedef odaklı koruma sağlamakta ve abiyotik/biyotik stres faktörlerine karşı

hücresel toleransı en üst düzeye çıkarmaktadır. Ayrıca, kimyasal kullanımını sınırlandırarak çevresel kontaminasyonu başarılı bir şekilde baskılama potansiyeline sahiptir.

Ancak, sağlanan bu yüksek verimlilik ve sürdürülebilirlik potansiyelinin yanı sıra, nanomalzemelerin toprak biyolojisi, bitki fizyolojisi ve insan sağlığı üzerindeki olası ekotoksikolojik etkilerinin multidisipliner bir yaklaşımla analiz edilmesi gerekmektedir. Laboratuvar koşullarında elde edilen başarılı sonuçların, uzun vadeli ve geniş ölçekli saha denemeleriyle doğrulanması tarımsal adaptasyon için elzemdir. Gelecekte, nanopartiküllerin bitki sistemleriyle moleküler düzeydeki etkileşimlerinin (genomik, proteomik, metabolomik) aydınlatılması, stres toleransını yöneten mekanizmaların anlaşılması ve çevresel risklerin optimize edilmesi bilimsel bir zorunluluktur. Nihai olarak, bu teknolojinin güvenli ve sorumlu bir şekilde uygulanabilmesi için şeffaf bilimsel risk analizlerinin yapılması, yasal/etik düzenlemelerin oluşturulması ve ekolojik dengeyi gözeten politikalarla üretici/tüketici bilincinin inşa edilmesi tarımsal geleceğimiz açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Bu bağlamda gelecek projeksiyonu için temel öneriler şunlardır:

- Nanomalzemelerin üretiminde toksisite riskini ortadan kaldıran çevre dostu (yeşil sentez) tekniklerin tercih edilmesi,
- Kontrollü laboratuvar deneylerinin yanı sıra geniş kapsamlı, uzun süreli ve farklı ekolojik koşulları kapsayan saha denemelerinin yürütülmesi,
- Nano ürünlerin toprak mikroflorası, bitki metabolizması ve insan sağlığı üzerindeki olası toksik etkilerinin kapsamlı şekilde araştırılması,

- Nano-bitki etkileşimlerinin hücresel ve moleküler düzeyde (genomik, proteomik, metabolomik) deşifre edilmesi,
- Nanopartiküllerin çevresel hareketliliği, toprakta biyobirikimi ve ekosistem döngüsü üzerindeki etkilerinin detaylı olarak değerlendirilmesi,
- Etik ve düzenleyici yasal çerçevelerin acilen geliştirilerek, nanoteknolojinin tarımda güvenli ve sorumlu kullanımının güvence altına alınması,
- Akıllı tarım sistemleriyle nanoteknoloji entegrasyonunun yaygınlaştırılarak kaynak kullanımının optimize edilmesi ve tarımsal sürdürülebilirliğin desteklenmesi,
- Bilimsel veriler ışığında şeffaf politikalar üretilerek üretici ve tüketicilerin nanoteknolojinin faydaları/riskleri konusunda bilinçlendirilmesi.

Bu öneriler, nanoteknolojinin tarımsal üretimde etkin, güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlayarak geleceğin gıda güvenliğini inşa edecek temel adımlar olarak değerlendirilmektedir.

Kaynakça

Abdel-Aziz, H. M., Benavides-Mendoza, A., Rizwan, M., & Seleiman, M. F. (2023). Nanofertilizers and abiotic stress tolerance in plants. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1154113. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1154113

Achari, G. A., & Kowshik, M. (2018). Recent developments on nanotechnology in agriculture: plant mineral nutrition, health, and interactions with soil microflora. *Journal of agricultural and food chemistry*, *66*(33), 8647-8661. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00691

Adrees, M., Khan, Z. S., Ali, S., Hafeez, M., Khalid, S., ur Rehman, M. Z., ... & Rizwan, M. (2020). Simultaneous mitigation of cadmium and drought stress in wheat by soil application of iron nanoparticles. *Chemosphere*, *238*, 124681. 10.1016/j.chemosphere.2019.124681

Afify, R. R., El-Nwehy, S. S., Bakry, A. B., & Abd El-Aziz, M. E. (2019). Response of peanut (Arachis hypogaea L.) crop grown on newly reclaimed sandy soil to foliar application of potassium nanofertilizer. *Middle East Journal of Applied Sciences*, *9*(1), 78-85. https://www.curresweb.com/mejas/mejas/2019/78-85.pdf

Aflatouni, F. (2025). Advancements in Nanotechnology: Revolutionizing Medicine and Electronics. *International Journal of Innovative Computer Science and IT Research*, *1*(01), 16-24.

Aghdam, M. T. B., Mohammadi, H., & Ghorbanpour, M. (2016). Effects of nanoparticulate anatase titanium dioxide on physiological and biochemical performance of *Linum usitatissimum* (Linaceae) under well-watered and drought stress conditions. *Brazilian journal of botany*, *39*(1), 139-146. https://link.springer.com/article/10.1007/S40415-015-0227-X

Agrawal, S., & Rathore, P. (2014). Nanotechnology pros and cons to agriculture: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *3*(3), 43-55. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20143126497

Ahmed, F., Arshi, N., Kumar, S., Gill, S. S., Gill, R., Tuteja, N., & Koo, B. H. (2012). Nanobiotechnology: Scope and potential for crop improvement. In Crop improvement under adverse conditions (pp. 245–269). Springer New York. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4614-4633-0_11

Alabdallah, N. M., & Alzahrani, H. S. (2020). The potential mitigation effect of ZnO nanoparticles on [Abelmoschus esculentus L. Moench] metabolism under salt stress conditions. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *27*(11), 3132-3137. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.08.005

Al-Dossary, O., Alnaddaf, L. M., & Al-Khayri, J. M. (2025). Crop management to enhance plant resilience to abiotic stress using nanotechnology: towards more efficient and sustainable agriculture. *Frontiers in plant science*, *16*, 1626624. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1626624

Alhamid, J. O., Mo, C., Zhang, X., Wang, P., Whiting, M. D., & Zhang, Q. (2018). Cellulose nanocrystals reduce cold damage to reproductive buds in fruit crops. *Biosystems engineering*, *172*, 124-133. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.06.006

Ahmad, A., Hashmi, S. S., Palma, J. M., & Corpas, F. J. (2022). Influence of metallic, metallic oxide, and organic nanoparticles on plant physiology. *Chemosphere*, *290*, 133329. 10.1016/j.chemosphere.2021.133329

Al-Juthery, H. W. A., Lahmod, N. R., & Al-Taee, R. A. H. G. (2021). Intelligent, nano-fertilizers: A new technology for improvement nutrient use efficiency. *IOP Conference Series: Earth and*

Environmental Science, *735*(1), 012086. 10.1088/1755-1315/735/1/012086

Anas, M., Umar, M., & Razzak, A. (2025). Nanotechnology is an Emerging Tool for Stress Management in Crop Plants. *Nanotechnology-based Sustainable Agriculture*, 105-134. https://doi.org/10.1002/9783527849949.ch04

Ansari, M., Shahzadi, K., & Ahmed, S. (2020). Nanotechnology: a breakthrough in agronomy. In *Nanoagronomy* (pp. 1-21). Cham: Springer International Publishing. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-41275-3_1

Antonacci, A., Arduini, F., Moscone, D., Palleschi, G., & Scognamiglio, V. (2018). Nanostructured (Bio) sensors for smart agriculture. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *98*, 95-103. 10.1016/j.trac.2017.10.022

Ardakani, A. S. (2013). Toxicity of silver, titanium and silicon nanoparticles on the root-knot nematode, Meloidogyne incognita, and growth parameters of tomato. *Nematology*, *15*(6), 671-677. https://brill.com/view/journals/nemy/15/6/article-p671_4.xml

Ashoka, P. (2017). Green nanotechnology is a key for eco-friendly agriculture. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 4440-4441. 10.1016/j.jclepro.2016.11.117

Athanassiou, C. G., Kavallieratos, N. G., Benelli, G., Losic, D., Usha Rani, P., & Desneux, N. (2018). Nanoparticles for pest control: current status and future perspectives. *Journal of Pest Science*, *91*(1), 1-15. https://doi.org/10.1007/s10340-017-0898-0

Avestan, S., Ghasemnezhad, M., Esfahani, M., & Byrt, C. S. (2019). Application of nano-silicon dioxide improves salt stress tolerance in strawberry plants. *Agronomy*, *9*(5), 246. https://doi.org/10.3390/agronomy9050246

Baker, J. R. (2013). Why I believe nanoparticles are crucial as a carrier for targeted drug delivery. *WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology*, *5*(5), 423-429. https://doi.org/10.1002/wnan.1226

Banik, S., & Pérez-de-Luque, A. (2017). In vitro effects of copper nanoparticles on plant pathogens, beneficial microbes and crop plants. *Spanish Journal of Agricultural Research*, *15*(2), e1005-e1005. https://doi.org/10.5424/sjar/2017152-10305

Behboudi, F., Tahmasebi Sarvestani, Z., Kassaee, M. Z., Modares Sanavi, S. A. M., Sorooshzadeh, A., & Ahmadi, S. B. (2018). Evaluation of chitosan nanoparticles effects on yield and yield components of barley (*Hordeum vulgare* L.) under late season drought stress. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*, *3*(1), 22-39. https://www.jwent.net/http:/jwent.net/article_30948.html

Bhagat, Y., Gangadhara, K., Rabinal, C., Chaudhari, G., & Ugale, P. (2015). Nanotechnology in agriculture: A review. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, *9*(1), 737-747. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20153197159

Bratovcic, A., Hikal, W. M., Mehdizadeh, M., Al Ahl, H. A., Omidi, A., Adetunji, C. O., ... & Bera, A. (2023). Application of nanotechnology in agroecosystems: nanoparticles for improving agricultural production. *Reviews in Agricultural Science*, *11*, 291-309. https://doi.org/10.7831/ras.11.0_291

Burman, U., Saini, M., & Kumar, P. (2013). Effect of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant system of chickpea seedlings. *Toxicological & Environmental Chemistry*, *95*(4), 605-612. https://doi.org/10.1080/02772248.2013.803796

Camara, M. C., Campos, E. V. R., Monteiro, R. A., do Espirito Santo Pereira, A., de Freitas Proença, P. L., & Fraceto, L. F. (2019).

Development of stimuli-responsive nano-based pesticides: emerging opportunities for agriculture. *Journal of nanobiotechnology*, *17*(1), 100. https://doi.org/10.1186/s12951-019-0533-8

Carnovale, C., Bryant, G., Shukla, R., & Bansal, V. (2016). Size, shape and surface chemistry of nano-gold dictate its cellular interactions, uptake and toxicity. *Progress in Materials Science*, *83*, 152-190. 10.1016/j.pmatsci.2016.04.003

Chau, C. F., Wu, S. H., & Yen, G. C. (2007). The development of regulations for food nanotechnology. *Trends in Food Science & Technology*, *18*(5), 269-280. 10.1016/j.tifs.2007.01.007

Chhipa, H. (2019). Applications of nanotechnology in agriculture. In Methods in microbiology (p. 115). Academic Press. 10.1016/bs.mim.2019.01.002

Chugh, P., & Dar, S. J. (2021). Nanotechnology: applications, opportunities, and constraints in agriculture. *Nanotechnol Sci Appl*, *125*, 48. https://www.researchgate.net/profile/Saleem-Jahangir-2/publication/352931715_Nanotechnology_Applications_Opportunities_and_Constraints_in_Agriculture_Nanotechnology_Principles_and_Applications_Edited/links/66e27403f84dd1716ce77f41/Nanotechnology-Applications-Opportunities-and-Constraints-in-Agriculture-Nanotechnology-Principles-and-Applications-Edited.pdf

Dağhan, H. (2017). Nano gübreler. *Türkiye tarımsal araştırmalar dergisi*, *4*(2), 197-203. 10.19159/tutad.294991

Daler, S., Kaya, O., Canturk, S., Korkmaz, N., Kılıç, T., Karadağ, A., & Hatterman-Valenti, H. (2025). Silicon nanoparticles (SiO_2 NPs) boost drought tolerance in grapevines by enhancing some morphological, physiological, and biochemical traits. *Plant Molecular Biology Reporter*, *43*(3), 1057-1075. https://doi.org/10.1007/s11105-024-01520-y

Daler, S., Kaya, O., Korkmaz, N., Kılıç, T., Karadağ, A., & Hatterman-Valenti, H. (2024). Titanium nanoparticles (TiO_2-NPs) as catalysts for enhancing drought tolerance in grapevine saplings. *Horticulturae*, *10*(10), 1103. https://doi.org/10.3390/horticulturae10101103

Day, W. (2005). Engineering precision into variable biological systems. *Annals of Applied Biology*, *146*(2), 155-162. https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2005.040064.x

Demirbilek, M. E. (2015). Tarımda ve gıdada nanoteknoloji. *Gıda Ve Yem Bilimi Teknolojisi Dergisi*, (15). https://dergipark.org.tr/en/pub/gidaveyem/article/52616

Dimkpa, C. O., McLean, J. E., Britt, D. W., & Anderson, A. J. (2013). Antifungal activity of ZnO nanoparticles and their interactive effect with a biocontrol bacterium on growth antagonism of the plant pathogen Fusarium graminearum. *Biometals*, *26*(6), 913-924. 10.1007/s10534-013-9667-6

Ditta, A. (2012). How helpful is nanotechnology in agriculture?. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, *3*(3), 033002. 10.1088/2043-6262/3/3/033002

Doğaroğlu, Z. G., & Uysal, Y. (2026). Yeşil sentez ile üretilen ZnO-NP'lerin sürdürülebilir tarımdaki etkinliğinin değerlendirilmesi. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 111. https://doi.org/10.35414/akufemubid.1665417

Doyle, D. J. (2013). Medical nanotechnology and nanomedicine (perspectives in nanotechnology). *Anesthesia & Analgesia*, *117*(5), 1265-1266. 10.1213/ANE.0b013e3182a8af83

Duhan, J. S., Kumar, R., Kumar, N., Kaur, P., Nehra, K., & Duhan, S. (2017). Nanotechnology: The new perspective in precision

agriculture. *Biotechnology reports*, *15*, 11-23. 10.1016/j.btre.2017.03.002

Dutta, P., Kumari, A., Mahanta, M., Upamanya, G. K., Heisnam, P., Borua, S., ... & Vijayreddy, D. (2023). Nanotechnological approaches for management of soil-borne plant pathogens. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1136233. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1136233

Eapen, S., & D'souza, S. F. (2005). Prospects of genetic engineering of plants for phytoremediation of toxic metals. *Biotechnology advances*, *23*(2), 97-114. 10.1016/j.biotechadv.2004.10.001

Eddy, D. R., Ishmah, S. N., Permana, M. D., & Firdaus, M. L. (2020). Synthesis of titanium dioxide/silicon dioxide from beach sand as photocatalyst for Cr and Pb remediation. *Catalysts*, *10*(11), 1248. https://doi.org/10.3390/catal10111248

El-Hak El, R. E. S. A., El-Aty El, S. A., El-Gazzar, A. A. E. F., Shaaban, E. A. E. A., & Saleh, M. M. S. (2019). Efficiency of nano-zinc foliar spray on growth, yield and fruit quality of Flame seedless grape. *Journal of Applied Sciences*, *19*(6), 612-617. 10.3923/jas.2019.612.617

Elsakhawy, T., Omara, A. E. D., Alshaal, T., & El-Ramady, H. (2018). Nanomaterials and plant abiotic stress in agroecosystems. *Environment, Biodiversity and Soil Security*, *2*(2018), 73-94. 10.21608/jenvbs.2018.3897.1030

Faraji, J., & Sepehri, A. (2020). Exogenous nitric oxide improves the protective effects of TiO_2 nanoparticles on growth, antioxidant system, and photosynthetic performance of wheat seedlings under drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *20*(2), 703-714. https://doi.org/10.1007/s42729-019-00158-0

Feynman, R. P. (1994). No ordinary genius: The illustrated Richard Feynman. WW Norton & Company. https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=1HxzLaPYo2IC&oi=fnd&pg=PA9&dq=Feynman,+R.+P.+(1994).+No+ordinary+genius:+The+illustrated+Richard+Feynman.+WW+Norton+%26+Company.&ots=qZxe2SKIuy&sig=CcXRXaGj2BCH9g5KYxIaDQqv_kI&redir_esc=y

Fraceto, L. F., Grillo, R., de Medeiros, G. A., Scognamiglio, V., Rea, G., & Bartolucci, C. (2016). Nanotechnology in agriculture: which innovation potential does it have?. *Frontiers in Environmental Science*, *4*, 20. https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00020

Gao, F., Hong, F., Liu, C., Zheng, L., Su, M., Wu, X., ... & Yang, P. (2006). Mechanism of nano-anatase TiO2 on promoting photosynthetic carbon reaction of spinach: inducing complex of rubisco-rubisco activase. *Biological trace element research*, *111*(1), 239-253. https://link.springer.com/article/10.1385/BTER:111:1:239

Gao, J., Wang, Y., Folta, K. M., Krishna, V., Bai, W., Indeglia, P., ... & Moudgil, B. (2011). Polyhydroxy fullerenes (fullerols or fullerenols): beneficial effects on growth and lifespan in diverse biological models. *PLoS One*, *6*(5), e19976. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019976

García-Gómez, C., Obrador, A., González, D., Babín, M., & Fernández, M. D. (2018). Comparative study of the phytotoxicity of ZnO nanoparticles and Zn accumulation in nine crops grown in a calcareous soil and an acidic soil. *Science of the total environment*, *644*, 770-780. 10.1016/j.scitotenv.2018.06.356

Giannousi, K., Avramidis, I., & Dendrinou-Samara, C. (2013). Synthesis, characterization and evaluation of copper based nanoparticles as agrochemicals against Phytophthora infestans. *RSC advances*, *3*(44), 21743-21752. https://doi.org/10.1039/c3ra42118j

Giraldo, J. P., Landry, M. P., Faltermeier, S. M., McNicholas, T. P., Iverson, N. M., Boghossian, A. A., ... & Strano, M. S. (2014). Plant nanobionics approach to augment photosynthesis and biochemical sensing. *Nature materials*, *13*(4), 400-408. http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nmat3890

Gökdemir, F. Ş., Gündoğdu, M., Muftareviç, S., Sunar, A., & Eyidoğan, F. (2023). Nanopartiküllerin tarımsal bilimlerdeki önemi ve kullanım alanları. *Selcuk University Journal of Science Faculty*, *49*(1), 11-17. https://dergipark.org.tr/en/pub/sufefd/article/1218183

Graham, J. H., Johnson, E. G., Myers, M. E., Young, M., Rajasekaran, P., Das, S., & Santra, S. (2016). Potential of nano-formulated zinc oxide for control of citrus canker on grapefruit trees. *Plant disease*, *100*(12), 2442-2447. https://doi.org/10.1094/PDIS-05-16-0598-RE

Gudkov, S. V., Burmistrov, D. E., Serov, D. A., Rebezov, M. B., Semenova, A. A., & Lisitsyn, A. B. (2021). A mini review of antibacterial properties of ZnO nanoparticles. *Frontiers in Physics*, *9*, 641481. https://doi.org/10.3389/fphy.2021.641481

Gupta, P., Sharma, M., & Sharma, S. (2023). Nanotechnology in agriculture: prospect, opportunities and challenges. *Emergent Life Sciences Research*, 164-176. https://doi.org/10.31783/elsr.2023.91164176

Haghighi, M., Abolghasemi, R., & da Silva, J. A. T. (2014). Low and high temperature stress affect the growth characteristics of tomato in hydroponic culture with Se and nano-Se amendment. *Scientia Horticulturae*, *178*, 231-240. 10.1016/j.scienta.2014.09.006

Iavicoli, I., Leso, V., Beezhold, D. H., & Shvedova, A. A. (2017). Nanotechnology in agriculture: Opportunities, toxicological implications, and occupational risks. *Toxicology and applied*

pharmacology, *329*, 96-111. https://doi.org/10.1016/j.taap.2017.05.025

Iqbal, M., Raja, N. I., Mashwani, Z. U. R., Hussain, M., Ejaz, M., & Yasmeen, F. (2019). Effect of silver nanoparticles on growth of wheat under heat stress. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, *43*(2), 387-395. https://doi.org/10.1007/s40995-017-0417-4

Iranbakhsh, A., Oraghi Ardebili, Z., & Oraghi Ardebili, N. (2021). Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles and their impact on plants. In Plant responses to nanomaterials: Recent interventions, and physiological and biochemical responses (pp. 33-93). Cham: Springer International Publishing. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-36740-4_3

Jafrasteh, F., Farmani, A., & Mohamadi, J. (2023). Meticulous research for design of plasmonics sensors for cancer detection and food contaminants analysis via machine learning and artificial intelligence. *Scientific reports*, *13*(1), 15349. https://doi.org/10.1038/s41598-023-42699-6

Jagana, D., Hegde, Y. R., & Lella, R. (2017). Green nanoparticles: A novel approach for the management of banana anthracnose caused by Colletotrichum musae. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci*, *6*(10), 1749-56. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.211

Kaushal, M., & Wani, S. P. (2017). Nanosensors: frontiers in precision agriculture. In *Nanotechnology: an agricultural paradigm* (pp. 279-291). Singapore: Springer Singapore. 10.1007/978-981-10-4573-8_13

Kelkar, A. D., Herr, D. J. C., & Ryan, J. G. (2014). Nanoscience and nanoengineering. CRC Press.

Kim, J. H., Lee, Y., Kim, E. J., Gu, S., Sohn, E. J., Seo, Y. S., ... & Chang, Y. S. (2014). Exposure of iron nanoparticles to Arabidopsis thaliana enhances root elongation by triggering cell wall loosening. *Environmental Science & Technology*, *48*(6), 3477-3485. https://doi.org/10.1021/es4043462

Kirov, E., Genev, M., Petrov, M., Miladinova-Georgiev, K., & Sichanov, M. (2022). Employment of nanoparticles for improvement of plant growth and development. *Botanica Lithuanica*, *28*(2), 113. https://doi.org/10.35513/Botlit.2022.2.4

Koushal, S., Vishnoi, M., Pj, R., Vishnoi, V., & Singh, K. (2025). Hydrogels as a key solution for sustainable agriculture: Exploring water retention and soil improvement. *International Journal of Research in Agronomy*, *8*(8), 415-423.

Kulkarni, S. K. (2015). Synthesis of nanomaterials—I (physical methods) (pp. 55-76). Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-09171-6

Kumar, S. M., Yadav, S., Choudhary, R., Anumantharaj, A., Yadav, A., Hussain, Z., ... & Yadav, S. K. (2025). Nanopriming with zinc oxide nanoparticle boosts seed vigour, photosynthesis, osmolytes accumulation and antioxidant activity in tomato. *Scientific Reports*, *15*(1), 37375. https://doi.org/10.1038/s41598-025-09269-4

Kumar, V., Sharma, M., Khare, T., & Wani, S. H. (2018). Impact of nanoparticles on oxidative stress and responsive antioxidative defense in plants. In *Nanomaterials in plants, algae, and microorganisms* (pp. 393-406). Academic Press. 10.1016/B978-0-12-811487-2.00017-7

Kumari, A., Singh, J., & Yadav, S. K. (2026). Harnessing nanobiotechnology for sustainable agriculture: from plant nanobionics to AI-driven precision farming. *Bioscience*

Nanotechnology, *2*(1), 3. https://doi.org/10.1186/s44331-026-00011-z

Kuzma, J. (2007). Moving forward responsibly: Oversight for the nanotechnology-biology interface. *Journal of Nanoparticle Research*, *9*(1), 165-182. 10.1007/s11051-006-9151-0

Lamsal, K., Kim, S. W., Jung, J. H., Kim, Y. S., Kim, K. S., & Lee, Y. S. (2011). Application of silver nanoparticles for the control of Colletotrichum species in vitro and pepper anthracnose disease in field. *Mycobiology*, *39*(3), 194-199. https://doi.org/10.5941/MYCO.2011.39.3.194

Lei, Z., Mingyu, S., Chao, L., Liang, C., Hao, H., Xiao, W., ... & Fashui, H. (2007). Effects of nanoanatase TiO_2 on photosynthesis of spinach chloroplasts under different light illumination. *Biological trace element research*, *119*(1), 68-76. 10.1007/s12011-007-0047-3

Linley, S., & Thomson, N. R. (2021). Environmental applications of nanotechnology: nano-enabled remediation processes in water, soil and air treatment. *Water, Air, & Soil Pollution*, *232*(2), 59. https://doi.org/10.1007/s11270-021-04985-9

Liu, R., Zhang, H., & Lal, R. (2016). Effects of stabilized nanoparticles of copper, zinc, manganese, and iron oxides in low concentrations on lettuce (*Lactuca sativa*) seed germination: nanotoxicants or nanonutrients?. *Water, Air, & Soil Pollution*, *227*(1), 42. 10.1007/s11270-015-2738-2

Liu, R., & Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the total environment*, *514*, 131-139. 10.1016/j.scitotenv.2015.01.104

López-Vargas, E. R., Ortega-Ortíz, H., Cadenas-Pliego, G., de Alba Romenus, K., Cabrera de la Fuente, M., Benavides-Mendoza, A., & Juárez-Maldonado, A. (2018). Foliar application of copper

nanoparticles increases the fruit quality and the content of bioactive compounds in tomatoes. *Applied Sciences*, *8*(7), 1020. https://doi.org/10.3390/app8071020

Lu, C., Zhang, C., Wen, J., Wu, G., & Tao, M. (2002). Research of the effect of nanometer materials on germination and growth enhancement of *Glycine max* and its mechanism. *Soybean Science*. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20033001984

Madhavi, V., Reddy, A. V. B., Madhavi, G., & Reddy, N. B. (2020). Nanoencapsulation of pesticides: Sustainable perspective in agriculture. *AIP Conference Proceedings*, *2283*(1), 040029. https://doi.org/10.1063/5.0018027

Majumdar, S., & Keller, A. A. (2021). Omics to address the opportunities and challenges of nanotechnology in agriculture. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *51*(22), 2595-2636. https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1785264

Mathivanan, S. (2021). Perspectives of nano-materials and nanobiosensors in food safety and agriculture. In IntechOpen eBooks. IntechOpen.

Mgadi, K., Ndaba, B., Roopnarain, A., Rama, H., & Adeleke, R. (2024). Nanoparticle applications in agriculture: overview and response of plant-associated microorganisms. *Frontiers in Microbiology*, *15*, 1354440. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1354440

Miguel-Rojas, C., & Pérez-de-Luque, A. (2023). Nanobiosensors and nanoformulations in agriculture: new advances and challenges for sustainable agriculture. *Emerging topics in life sciences*, *7*(2), 229-238. https://doi.org/10.1042/ETLS20230070

Mocan, T., Matea, C. T., Pop, T., Mosteanu, O., Buzoianu, A. D., Puia, C., ... & Mocan, L. (2017). Development of nanoparticle-based

optical sensors for pathogenic bacterial detection. *Journal of nanobiotechnology*, *15*(1), 25. 10.1186/s12951-017-0260-y

Moghaddasi, S., Khoshgoftarmanesh, A. H., Karimzadeh, F., & Chaney, R. L. (2013). Preparation of nano-particles from waste tire rubber and evaluation of their effectiveness as zinc source for cucumber in nutrient solution culture. *Scientia Horticulturae*, *160*, 398-403. 10.1016/j.scienta.2013.06.028

Moulick, D., Khan, F. R., Siddiqui, N., Pradhan, J., Khamari, P., & Mahanta, S. (2024). Applications of nanotechnology in abiotic stress management and biofortification. *The Nanotechnology Driven Agriculture*, 50-66. 10.1201/9781003376446-3

Mustafa, G., & Komatsu, S. (2016). Insights into the response of soybean mitochondrial proteins to various sizes of aluminum oxide nanoparticles under flooding stress. *Journal of Proteome Research*, *15*(12), 4464-4475. https://doi.org/10.1021/acs.jproteome.6b00572

Nile, S. H., Thiruvengadam, M., Wang, Y., Samynathan, R., Shariati, M. A., Rebezov, M., ... & Kai, G. (2022). Nano-priming as emerging seed priming technology for sustainable agriculture—recent developments and future perspectives. *Journal of nanobiotechnology*, *20*(1), 254. https://doi.org/10.1186/s12951-022-01423-8

Nuruzzaman, M. D., Rahman, M. M., Liu, Y., & Naidu, R. (2016). Nanoencapsulation, nano-guard for pesticides: a new window for safe application. *Journal of agricultural and food chemistry*, *64*(7), 1447-1483. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b05214

Oliveira, H. C., Seabra, A. B., Tortella, G., Fernández-Baldo, M. A., & Benavides-Mendoza, A. (2026). Advances of nanotechnology for agricultural applications. *Plant Nano Biology*, *15*, 100249. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773111126000057

Özatay, Ş., & Kaya, Ç. (2025). New Approaches in Agriculture and Food Industry: Nanoparticles and their Potential Uses. *Bilim-teknoloji-yenilik ekosistemi dergisi*, *6*(1), 61-73. https://dergipark.org.tr/en/pub/bityed/article/1710123

Pagano, M., Lunetta, E., Belli, F., Mocarli, G., Cocozza, C., & Cacciotti, I. (2025). Advancements in agricultural nanotechnology: An updated review. *Plants*, *14*(18), 2939. 10.3390/plants14182939

Patel, P., Dhingra, P., Kothari, S. L., Jain, R., & Kachhwaha, S. (2023). Interaction between Metal Oxide Nanoparticles and Terrestrial Plants: An Overview of the Mode of Action and Future Perspectives. *Nanobiotechnology: Principles and Applications*, 36-87. https://doi.org/10.2174/97898151235551230101

Pradhan, S., Patra, P., Das, S., Chandra, S., Mitra, S., Dey, K. K., ... & Goswami, A. (2013). Photochemical modulation of biosafe manganese nanoparticles on Vigna radiata: a detailed molecular, biochemical, and biophysical study. *Environmental science & technology*, *47*(22), 13122-13131. https://doi.org/10.1021/es402659t

Prasad, T. N. V. K. V., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Reddy, K. R., ... & Pradeep, T. (2012). Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of plant nutrition*, *35*(6), 905-927. https://doi.org/10.1080/01904167.2012.663443

Prasad, R., Bhattacharyya, A., & Nguyen, Q. D. (2017). Nanotechnology in sustainable agriculture: recent developments, challenges, and perspectives. *Frontiers in microbiology*, *8*, 264976. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01014

Priyanka, N., & Venkatachalam, P. (2016). Biofabricated zinc oxide nanoparticles coated with phycomolecules as novel micronutrient catalysts for stimulating plant growth of cotton. *Advances in natural*

sciences: nanoscience and Nanotechnology, *7*(4), 045018. 10.1088/2043-6262/7/4/045018

Rai, V., Acharya, S., & Dey, N. (2012). Implications of nanobiosensors in agriculture. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, *3*(2A), 315. 10.4236/jbnb.2012.322039

Raliya, R., & Tarafdar, J. C. (2013). ZnO nanoparticle biosynthesis and its effect on phosphorous-mobilizing enzyme secretion and gum contents in Clusterbean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.). *Agricultural Research*, *2*(1), 48-57. 10.1007/s40003-012-0049-z

Raliya, R., Nair, R., Chavalmane, S., Wang, W. N., & Biswas, P. (2015). Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant. *Metallomics*, *7*(12), 1584-1594. https://doi.org/10.1039/c5mt00168d

Rizwan, M., Ali, S., Abbas, F., Adrees, M., Zia-ur-Rehman, M., Farid, M., ... & Ali, B. (2017). Role of organic and inorganic amendments in alleviating heavy metal stress in oilseed crops. *Oilseed crops: Yield and adaptations under environmental stress*, 224-235. https://doi.org/10.1002/9781119048800.ch12

Ruotolo, R., Maestri, E., Pagano, L., Marmiroli, M., White, J. C., & Marmiroli, N. (2018). Plant response to metal-containing engineered nanomaterials: an omics-based perspective. *Environmental science & technology*, *52*(5), 2451-2467. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04121

Sahithya, K., Banu, F., & Monika, S. (2025). Nanofertilizers: A shifting paradigm for the sustainable agriculture. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 10(3). https://doi.org/10.1007/s41204-025-00475-z

Salaheldeen Elnashaie, S., Danafar, F., & Hashemipour Rafsanjani, H. (2015). From nanotechnology to nanoengineering. In *Nanotechnology for Chemical Engineers* (pp. 79-178). Singapore: Springer Singapore. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-287-496-2_2

Saleem, M. H., Usman, K., Rizwan, M., Jabri, H. A., & Alsafran, M. (2022). Functions and strategies for enhancing zinc availability in plants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 13. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1033092

Sanzari, I., Leone, A., & Ambrosone, A. (2019). Nanotechnology in plant science: to make a long story short. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *7*, 120. https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00120

Saravanan, M., & Vetha Potheher, I. (2023). Advancements and applications of nanotechnology in material science (pp. 199-209). Iterative International Publishers. 10.58532/V3BECS21P10CH1

Satya, S., Hashmi, K., Gupta, S., Mishra, P., Khan, T., & Joshi, S. (2024). The vital role of nanoparticles in enhancing plant growth and development. *Journal of Nanotechnology Research*, *7*, 48. https://doi.org/10.3390/engproc2024067048

Savi, G. D., Piacentini, K. C., De Souza, S. R., Costa, M. E., Santos, C. M., & Scussel, V. M. (2015). Efficacy of zinc compounds in controlling Fusarium head blight and deoxynivalenol formation in wheat (Triticum aestivum L.). *International journal of food microbiology*, *205*, 98-104. 10.1016/j.ijfoodmicro.2015.04.001

Sedghi, M., Hadi, M., & Toluie, S. G. (2013). Effect of nano zinc oxide on the germination parameters of soybean seeds under drought stress. *Annales of West University of Timisoara. Series of Biology*, *16*(2), 73.

https://biologie.uvt.ro/annals/vol_16_2/AWUTSerBio_Dec2013_73-78.pdf

Shebl, A., Hassan, A., Salama, D., Abd El-Aziz, M. E., & Abd Elwahed, M. (2019). Green synthesis of manganese zinc ferrite nanoparticles and their application as nanofertilizers for Cucurbita pepo L. *Beilstein Archives*, *2019*(1), 45. https://doi.org/10.3762/bxiv.2019.45.v1

Shelar, A., Nile, S. H., Singh, A. V., Rothenstein, D., Bill, J., Xiao, J., ... & Patil, R. (2023). Recent advances in nano-enabled seed treatment strategies for sustainable agriculture: challenges, risk assessment, and future perspectives. *Nano-Micro Letters*, *15*(1), 54. https://doi.org/10.1007/s40820-023-01025-5

Shukla, K., Mishra, V., Singh, J., Varshney, V., Verma, R., & Srivastava, S. (2024). Nanotechnology in sustainable agriculture: A double-edged sword. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *104*(10), 5675-5688. https://doi.org/10.1002/jsfa.13342

Singh, A., Rajput, V. D., Varshney, A., Sharma, R., Ghazaryan, K., Minkina, T., ... & El-Ramady, H. (2024). Revolutionizing crop production: Nanoscale wonders-current applications, advances, and future frontiers. *Egyptian Journal of Soil Science*, *64*(1), 221-258.

Singh, J., & Sengar, R. S. (2020). Nanotechnology in agriculture and food. *Annals of Horticulture*, *13*(1), 14-24. 10.5958/0976-4623.2020.00015.8

Singh, M. D. (2017). Nano-fertilizers is a new way to increase nutrients use efficiency in crop production. *International Journal of Agriculture Sciences, ISSN*, *9*(7), 0975-3710. https://ureaknowhow.com/wp-content/uploads/2020/09/2017-Singh-Nano-Fertilizers-is-a-new-way-to-increase-nutrients-use-efficiency-in-crop-production.pdf

Sivarethinamohan, R., & Sujatha, S. (2021). Unlocking the potentials of using nanotechnology to stabilize agriculture and food production. *AIP Conference Proceedings*, *2327*(1), 020022. https://doi.org/10.1063/5.0039418

Su, C., Ji, Y., Liu, S., Gao, S., Cao, S., Xu, X., ... & Liu, Y. (2020). Fluorescence-labeled abamectin nanopesticide for comprehensive control of pinewood nematode and Monochamus alternatus Hope. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *8*(44), 16555-16564. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c05771

Subbaiah, L. V., Prasad, T. N. V. K. V., Krishna, T. G., Sudhakar, P., Reddy, B. R., & Pradeep, T. (2016). Novel effects of nanoparticulate delivery of zinc on growth, productivity, and zinc biofortification in maize (*Zea mays* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *64*(19), 3778-3788. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00838

Subramanian, C. B., Nayak, N. R., Mohanty, D. K., Rout, S., & Kumar, S. N. (2022). Use of nanotechnology sensors for sustainable agriculture. In 2022 6th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC) (pp. 638-643). IEEE. 10.1109/ICCMC53470.2022.9754045

Subramanian, K. S., & Tarafdar, J. C. (2011). Prospects of nanotechnology in Indian farming. *Indian J Agric Sci*, *81*(10), 887-893. https://www.researchgate.net/profile/J-Tarafdar/publication/262178208_Research_Review_Article_Prospects_of_nanotechnology_in_Indian_farming/links/02e7e536cea39195da000000/Research-Review-Article-Prospects-of-nanotechnology-in-Indian-farming.pdf

Tarafdar, J. C., Raliya, R., Mahawar, H., & Rathore, I. (2014). Development of zinc nanofertilizer to enhance crop production in pearl millet (*Pennisetum americanum*). *Agricultural research*, *3*(3), 257-262. 10.1007/s40003-014-0113-y

Thabet, S. G., & Alqudah, A. M. (2024). Unraveling the role of nanoparticles in improving plant resilience under environmental stress condition. *Plant and Soil*, *503*(1), 313-330. https://doi.org/10.1007/s11104-024-06581-2

Thakur, N., & Yadav, A. N. (2025). Nanotechnology in agriculture: a review on precision farming and sustainable crop production. *BioNanoScience*, *15*(2), 243. https://doi.org/10.1007/s12668-025-01861-2

Torabian, S., Zahedi, M., & Khoshgoftar, A. H. (2016). Effects of foliar spray of two kinds of zinc oxide on the growth and ion concentration of sunflower cultivars under salt stress. *Journal of plant nutrition*, *39*(2), 172-180. https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1009107

Torabian, S., Zahedi, M., & Khoshgoftar, A. H. (2017). Effects of foliar spray of nano-particles of FeSO4 on the growth and ion content of sunflower under saline condition. *Journal of Plant Nutrition*, *40*(5), 615-623. https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1240187

Upadhayay, V. K., Chitara, M. K., Mishra, D., Jha, M. N., Jaiswal, A., Kumari, G., ... & Sharma, A. (2023). Synergistic impact of nanomaterials and plant probiotics in agriculture: A tale of two-way strategy for long-term sustainability. *Frontiers in microbiology*, *14*, 1133968. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1133968

Upadhye, P. A., Mahalle, P. N., Bhattacharya, S., Gulhane, M., Ubale, S. A., & Patil, P. J. (2025). The Use of Nanotechnology in Improving Irrigation Efficiency. *International Water and Irrigation*, *44*(1). https://www.researchgate.net/profile/Punam-Patil-4/publication/393189062_Use_of_Nanotechnology/links/68638c1ee4632b045dc8d488/Use-of-Nanotechnology.pdf

Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S. A., ur Rehman, H., ... & Sanaullah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Science of the total environment*, *721*, 137778. 10.1016/j.scitotenv.2020.137778

Wang, S., Wang, F., & Gao, S. (2015). Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings. *Environmental science and pollution research*, *22*(4), 2837-2845. 10.1007/s11356-014-3525-0

Wu, C., Shen, X., Feng, W., Li, P., & Chen, Y. (2025). Agricultural nanotechnology. *Coordination Chemistry Reviews*, *543*, 216906. 10.1016/j.ccr.2025.216906

Zaman, W., Ayaz, A., & Park, S. (2025). Nanomaterials in agriculture: a pathway to enhanced plant growth and abiotic stress resistance. *Plants*, *14*(5), 716. https://doi.org/10.3390/plants14050716

Zhang, P., Guo, Z., Ullah, S., Melagraki, G., Afantitis, A., & Lynch, I. (2021). Nanotechnology and artificial intelligence to enable sustainable and precision agriculture. *Nature plants*, *7*(7), 864-876.

BÖLÜM 4

ALLELOKİMYASALLARIN FUNGUSİT OLARAK KULLANIMI

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

ALLELOKİMYASALLARIN FUNGUSİT OLARAK KULLANIMI

MİNE DEMİR[1] **EMİNE SEMA ÇETİN**[2]

Giriş

Fungal hastalıklar tarımsal üretimde her yıl ciddi ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Tahıllarda görülen Fusarium, bağlarda *Botrytis cinerea* kaynaklı gri küf, sebzelerde mildiyö hastalıkları bunların en bilinen örnekleridir. Tahminlere göre fungal etkenler dünya genelinde tarımsal ürünlerin yaklaşık %10-15'ini tahrip etmekte ve bu oran bazı bölgelerde çok daha yüksek seviyelere ulaşabilmektedir. Milyonlarca yıl süren evrimsel süreçte bitkiler böylesi bir tehdit karşısında pasif kalmamak adına hem sürekli aktif olan hem de ihtiyaç duyulduğunda devreye giren antifungal bileşikler üretmeyi öğrenmişlerdir. Bu bileşiklerin ortak özelliği, tek bir noktayı değil fungal hücrenin birden fazla yapısını hedef

[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

almalarıdır. Bu da sentetik ilaçlara kıyasla direnç gelişimini çok daha güç kılmaktadır.

Sentetik fungisitlere olan bağımlılığın azaltılması, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de gıda güvenliği açısından önemli bir hedef hâline gelmiştir. Avrupa Birliği'nin 2030 yılına kadar kimyasal pestisit kullanımını %50 azaltma hedefi, bitkisel antifungal bileşiklere olan akademik ve endüstriyel ilginin artmasında belirleyici bir rol oynamıştır. Bu bölümde fungusit allelokimyasalların kimyasal çeşitliliği, mekanizmaları ve uygulama potansiyelleri ele alınmıştır.

Fungisit Allelokimyasalların Sınıflandırılması

Fenolik Bileşikler ve Terpenoid Fenoller

Timol ve karvakrol, kekik (*Thymus vulgaris*) ve mercanköşk (*Origanum vulgare*) bitkilerinden elde edilen terpenoid fenollerdir. Bu iki bileşik antifungal araştırmalarda adeta referans olarak kabul görmektedir. *Candida albicans, Aspergillus niger* ve *Fusarium oxysporum* üzerinde 0.125-1.0 µg/mL aralığında MIC değerleri bildirilen timol ve karvakrol, özellikle ergosterol biyosentez yolağını hedef alarak etki oluşturmaktadır (Bakkali vd., 2008). Her iki bileşiğin birlikte kullanıldığında sinerjistik bir etki göstermesi, bunların hem ayrı ayrı hem de birlikte değerlendirilmesini anlamlı kılmaktadır.

Eugenol, karanfil yağının (*Syzygium aromaticum*) temel bileşenidir. *Aspergillus flavus* üzerinde ergosterol sentezini inhibe etmesinin yanı sıra aflatoksin üretimini de baskıladığı bilinmektedir. Bu özelliği onu gıda güvenliği çalışmaları açısından ilgi çekici bir bileşik hâline getirmektedir (Marchese vd., 2017). Resveratrol ise asma (*Vitis vinifera*) tarafından *Botrytis cinerea* ve *Plasmopara viticola* saldırılarına yanıt olarak sentezlenen bir stilbenoid fitoaleksindir. Gal vd. (2003) yürüttüğü çalışmada

resveratrolün şarap üzümünde gri küfe karşı savunmanın temel kimyasal bileşeni olduğu ortaya konulmuştur.

Terpenoidler

Monoterpen ve seskiterpen yapılı bileşikler, uçucu yağların antifungal aktivitesinin asıl kaynağını oluşturmaktadır. Sinnamaldehit, tarçın kabuğundan (*Cinnamomum verum*) elde edilen ve Fusarium spp., Alternaria spp. ile *Rhizoctonia solani* üzerinde 0.125-0.5 µg/mL gibi düşük MIC değerleri bildirilen bir fenilpropanoid aldehittir. Etki mekanizmasının esas olarak fungal β-glukan sentaz inhibisyonuna ve buna bağlı hücre duvarı bütünlüğünün bozulmasına dayandığı düşünülmektedir (Pina-Pérez vd., 2017).

Limon otu (*Cymbopogon citratus*) bitkisinin başlıca bileşeni sitral ise ve Aspergillus ile Penicillium türlerine karşı güçlü bir antifungal aktivite sergilemektedir. GRAS (Genel Olarak Güvenli Kabul Edilen) statüsüne sahip olması, sitrali gıda endüstrisi uygulamalarında özellikle tercih edilen bir bileşik yapmaktadır (Nazzaro vd., 2013). Çay ağacı (*Melaleuca alternifolia*) yağının temel bileşeni terpinen-4-ol ise dermatofitler ve Candida türleri üzerinde etkili bir monoterpen alkoldür.

Alkaloidler

Berberin, sarıkök ve diğer Berberis türlerinden elde edilen bir izokuinolin alkaloiddir. *Candida albicans* ve *Cryptococcus neoformans* başta olmak üzere birçok patojen fungusa karşı aktif olduğu bilinmektedir. DNA topoisomeraz inhibisyonu ve hücre zarı geçirgenliğinin artırılması olmak üzere birden fazla mekanizma üzerinden etki ettiği bildirilmektedir. 4-16 µg/mL aralığındaki MIC değerleri göz önünde bulundurulduğunda, berberinin tek başına bir antifungal ajan olarak değil, özellikle mevcut ilaçlarla kombinasyon hâlinde kullanılabileceği düşünülmektedir (Iwasa vd., 1998).

Sanguinarine ise kan kökü (*Sanguinaria canadensis*) bitkisinde bulunan bir benzofenantridin alkaloididir. DNA interkalasyonu yoluyla fungal hücre bölünmesini baskıladığı, *Aspergillus fumigatus* üzerinde de belirgin antifungal aktivite gösterdiği bildirilmektedir. İlginç olan, sanguinarinin bazı çalışmalarda timol ile birlikte kullanıldığında sinerjistik etki oluşturmasıdır (Wink, 2010).

Organosülfür Bileşikleri

Sarmısak (*Allium sativum*) bileşeni allisein, tarih boyunca antifungal özelliğiyle tanınan bitkisel bileşiklerin başında gelmektedir. Sarımsak dokusu ezildiğinde ya da kesildiğinde aliin bileşiği alinaz enzimi ile alliseine dönüşür. Bu reaktif organosülfür bileşiği; Candida, Aspergillus ve dermatofitler üzerinde 0.03-0.5 µg/mL gibi son derece düşük MIC değerleriyle etki göstermektedir (Ankri ve Mirelman, 1999). Alliseinin etki mekanizması, fungal sistein proteazlarındaki tiyol gruplarını bloke etmesi ve ergosterol biyosentez enzimlerini (özellikle lanosterol 14α-demetilaz) inhibe etmesi şeklinde açıklanmaktadır.

Alliseinin dönüşüm ürünleri olan DADS (dialil disülfit) ve DATS (dialil trisülfit) da antifungal aktivite sergilemekte; allisein ile birlikte organosülfür bileşiklerinin bütününü antifungal açıdan değerli kılmaktadır. Amfoterisin B ile kombinasyonunun dirençli Candida suşlarında sinerjistik etki gösterdiğine dair bulgular da bu alanda dikkat çekmektedir (Ankri ve Mirelman, 1999).

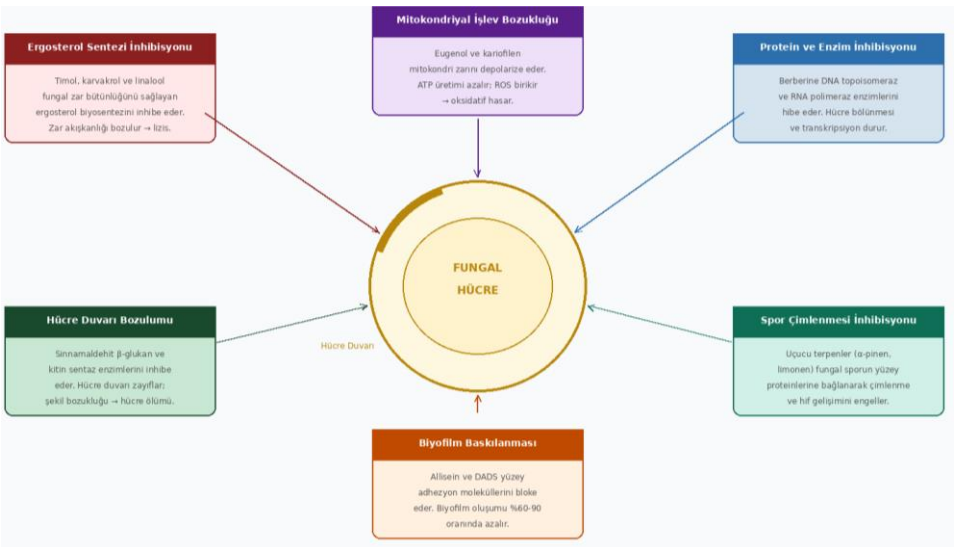
Tablo 1. Başlıca fungisit allelokimyasallar, kaynak bitkileri, hedef funguslar ve MIC değerleri

Bileşik	**Kimyasal Sınıf**	**Kaynak Bitki**	**Hedef Fungus (Seçili)**	**MIC (µg/mL)**
Timol	Monoterpenoid fenol	*Thymus vulgaris*	*C. albicans, A. niger*	0.125–0.5
Karvakrol	Monoterpenoid fenol	*Origanum vulgare*	*F. oxysporum, B. cinerea*	0.25–1.0
Eugenol	Fenolik propanoid	*Syzygium aromaticum*	*A. flavus,* Penicillium spp.	0.5–2.0
Sinnamaldehit	Fenilpropanoid aldehit	*Cinnamomum verum*	Fusarium spp., *Alternaria spp.*	0.125–0.5
α-Terpineol	Monoterpen alkol	*Melaleuca alternifolia*	Candida spp., Trichophyton	1.0–4.0
Berberine	İzokuinolin alkaloid	Berberis spp.	*C. albicans, C. neoformans*	4.0–16.0
Linalool	Asiklik monoterpen	*Lavandula angustifolia*	*A. fumigatus, C. glabrata*	2.0–8.0
Allisein	Organosülfür	*Allium sativum*	Geniş spektrum; dermatofitler	0.03–0.5
Resveratrol	Stilbenoid fitoaleksin	*Vitis vinifera*	*B. cinerea, P. viticola*	50–200
Sitral	Monoterpen aldehit	*Cymbopogon citratus*	Aspergillus spp., Penicillium	0.5–2.5
Sanguinarine	Benzofenantridin alkaloid	*Sanguinaria canadensis*	*A. fumigatus*, Candida spp.	2.0–8.0
DADS / DATS	Organosülfür	*Allium sativum*	Dermatofitler, Candida	0.05–1.0

Fungal Hücre Üzerindeki Etki Mekanizmaları

Fungisit allelokimyasalların sentetik fungisitlerden en belirgin farkı, tek bir moleküler hedef yerine birden fazla hücresel yapıyı eş zamanlı olarak etkileyebilmeleridir. Bu özellik hem direnç gelişimini güçleştirmekte hem de bu bileşiklerin zaten dirençli hale gelmiş funguslara karşı bile etkinliğini koruyabilmesini sağlamaktadır. Aşağıda başlıca etki mekanizmaları ele alınmaktadır.

Şekil 1. Fungisit allelokimyasalların fungal hücre üzerindeki etki mekanizmaları



Kaynak: Bakkali vd., 2008; Marchese vd., 2017'den uyarlanmıştır. Kullanılan görseller dijital araçlar yardımıyla hazırlanmıştır.

Ergosterol Sentezi ve Zar Bütünlüğünün Bozulması

Fungal hücre zarının temel sterol bileşeni ergosteroldür. Memeli hücrelerinde ise bu görevi kolesterol üstlenmektedir. Bu yapısal farklılık, ergosterol biyosentezini selektif bir antifungal hedef olarak kullanmaya olanak tanımaktadır. Timol ve karvakrol, ergosterol biyosentez yolağındaki lanosterol 14α-demetilaz

enzimini (CYP51) inhibe ederek zar ergosterol içeriğini düşürmekte ve toksik sterol ara ürünlerinin birikmesine yol açmaktadır (Hammer vd., 1999). Bu süreç zar akışkanlığını bozarak hücre içi iyonların (K^+, H^+) dışarı sızmasına neden olur.

Bakkali vd. (2008), timol ve karvakrolün *C. albicans* hücrelerinde transmembran potansiyelini çökerterek ATP sentezini engellediğini göstermiştir. Yüksek konsantrasyonlarda hücre lizisi gözlemlenirken daha düşük konsantrasyonlarda büyüme durma ve virulans faktörlerinin baskılanması söz konusu olabilmektedir. Bu doz bağımlılığı, uygulamada hedeflenen etkiye göre konsantrasyon ayarlamasının önemini ortaya koymaktadır.

Hücre Duvarı Bozulumu

Fungal hücre duvarı, β-1,3-glukan, β-1,6-glukan ve kitinden oluşan bir iskelet yapısına sahiptir ve memeli hücrelerinde bu yapıya rastlanmaz; bu durum hücre duvarını seçici bir antifungal hedef hâline getirir. Sinnamaldehit, β-glukan sentaz enzimini inhibe ederek hücre duvarı biyosentezini aksatmaktadır. Bunun sonucunda fungal hücrede şekil bozukluğu ve ozmotik strese karşı artan duyarlılık gözlemlenmekte, nihayetinde hücre lizisi gerçekleşmektedir (Pina-Pérez vd., 2017).

Bazı flavonoidler ve resveratrol analoglarının ise kitin sentaz enzimini inhibe ettiği bildirilmektedir. Aspergillus sporlarının çimlenmesi sırasında kitin sentezinin engellenmesi hif ucu büyümesini ve bitki dokusuna penetrasyonu bloke etmektedir. Bu etki özellikle profilaktik uygulamalar yani patojen bitki dokusuna girmeden önce durdurulabilmesi açısından önemlidir (Hammerschmidt, 1999).

Mitokondriyal İşlev Bozukluğu ve Oksidatif Stres

Eugenol ve β-kariofilen fungal mitokondri zarını depolarize ederek elektron taşıma zincirini sekteye uğratmakta, bunun

sonucunda ATP üretimi azalmakta ve reaktif oksijen türleri (reactive oxygene species, ROS) birikmektedir. Biriken ROS ise lipid peroksidasyonuna, protein oksidasyonuna ve DNA hasarına neden olarak apopitozisi tetiklemektedir. Allisein de benzer şekilde mitokondriyal NADH dehidrogenazı etkileyerek oksidatif stres yaratmaktadır (Ankri ve Mirelman, 1999). Bu mekanizma, söz konusu bileşiklerin neden tek bir hedefte değil birden fazla noktada etki ettiğini açıklamaktadır.

Spor Çimlenmesi ve Hif Gelişiminin İnhibisyonu

α-Pinen, limonen ve linalool gibi uçucu terpenler, fungal sporların yüzey proteinlerine bağlanarak çimlenmeyi engelleyebilmekte ve hif uzamasını baskılayabilmektedir. *Botrytis cinerea* üzerinde yapılan bir çalışmada eugenolün spor çimlenmesini yaklaşık %90 oranında inhibe ettiği bildirilmiştir (Nazzaro vd., 2013). Bu etki, özellikle hastalık oluşmadan önce müdahale etmeye, yani koruyucu uygulamalara olanak tanıması açısından değerlidir.

Biyofilm Baskılanması

Fungal biyofilmler antifungal tedaviye karşı çok yüksek direnç sergilemesiyle bilinmektedir. Kimi zaman serbest hücrelere kıyasla 100-1000 kat artmış bir direnç söz konusu olabilmektedir. Bu durum kronik enfeksiyonların tedavisini önemli ölçüde güçleştirmektedir. Allisein ve DADS, fungal biyofilm oluşumunu baskılayan bileşikler arasındadır. Candida biyofilmleri üzerinde allisein bileşiği biyofilm oluşumunu %60-90 oranında azaltmış, timol ve karvakrol ise oluşan biyofilmleri bozmuştur (Marchese vd., 2017). Bu bulgular, söz konusu bileşiklerin yalnızca planktonik fungal hücreler üzerinde değil, klinik açıdan önem taşıyan biyofilm formlarına karşı da işe yarayabileceğini göstermektedir.

Tablo 2. Fungisit allelokimyasalların fungal hedefleri ve genel etki mekanizmaları

Bileşik (Sınıf)	Fungal Hedef	Etki Mekanizması
Timol, Karvakrol (Terpenoid fenol)	Hücre zarı ergosterolu	CYP51 inhibisyonu; zar permeabilitesi ↑; K^+/ATP kaybı (Bakkali vd., 2008)
Eugenol (Fenilpropanoid)	Mitokondri zarı; ergosterol	Membran depolarizasyonu; ROS↑; aflatoksin sentezi ↓ (Marchese vd., 2017)
Sinnamaldehit (Fenilpropanoid aldehit)	Hücre duvarı β-glukanı	β-Glukan sentaz inhibisyonu; hücre duvarı lizisi (Pina Perez vd., 2017)
Allisein / DADS (Organosülfür)	SH grupları; ergosterol	Tiyol blokajı; CYP51 inhibisyonu; biyofilm baskılanması (Ankri ve Mirelman, 1999)
Berberine (Alkaloid)	DNA; RNA polimeraz	Topoisomeraz inhibisyonu; transkripsiyon blokajı (Iwasa vd., 1998)
Resveratrol (Stilbenoid fitoaleksin)	Hücre duvarı; sporangium	Kitin sentaz inhibisyonu; spor çimlenmesi engeli
Linalool (Monoterpen alkol)	Hücre zarı; mitokondri	Zar akışkanlığı bozulumu; elektron taşıma inhibisyonu

Konstitütif ve İndüklenmiş Antifungal Savunma

Bitkiler antifungal savunmayı iki farklı stratejiyle yürütmektedir: Bunlardan bir kısmı hiçbir uyarı beklemeksizin sürekli aktif tutulurken, diğeri yalnızca fungal tehdit algılandığında devreye girmektedir. Bu iki katmanlı yapı, bitkiye hem hız hem de enerji tasarrufu açısından avantaj sağlamaktadır (Hammerschmidt, 1999).

Fitoanticipinler, Sürekli Aktif Savunma

Fitoanticipinler, herhangi bir fungal temas gerçekleşmeden önce bitkide sentezlenip depolanan antifungal bileşiklerdir. Bitki epidermisindeki fenolik asitler ve taninler, fungal sporların çimlenmesini zorlaştıran bir yüzey kimyası oluşturur. Lamiaceae familyasına ait bitkilerin tüy bezlerinde depolanan monoterpenler ise sürekli salınan kimyasal bir bariyer işlevi görür.

Saponinler de bu grubun önemli bileşiklerindendir. Ergosterol ile kompleks oluşturarak fungal zar bütünlüğünü bozabilmektedir. *Avena sativa*'da bulunan avenasin bu mekanizmanın bir örneğidir. Sarımsak ve soğan gibi Allium türlerinde ise allisein öncülü olan aliin, doku hasarı oluştuğunda alinaz enzimi ile anında reaksiyona girerek aktif forma dönüşmektedir. Bu durum aslında iki aşamalı bir savunma mekanizması olarak değerlendirilebilir.

Fitoaleksinler: Uyarıya Yanıt Olarak Üretilen Bileşikler

Fitoaleksinler, fungal saldırıya ya da fungal elicitörlere (kitosan, β-glukan oligomerleri) yanıt olarak yeni sentezlenen antifungal bileşiklerdir. Bu kavram ilk kez Müller ve Börger (1940) tarafından patateste *Phytophthora infestans*'a karşı yürütülen çalışmalarda tanımlanmıştır.

Resveratrol bu grubun en iyi bilinen temsilcisidir. *Vitis vinifera, Botrytis cinerea* saldırısını algıladığında fitoaleksin olarak resveratrol ve viniferinleri (resveratrol oligomerleri) sentezler. Bu bileşikler Botrytis sporlarının çimlenmesini ve hif büyümesini baskılar. Bezelyede pisatin, yoncada medikarpin benzer rolleri üstlenen diğer önemli fitoaleksinlerdir. İlginç bir nokta olarak, bazı funguslara özgü fitoaleksin bileşimi bitki türüne ve saldıran patojen türüne göre farklılık göstermektedir. Bu durum fitoaleksin sisteminin ne kadar özgün ve dinamik olduğunu göstermektedir.

Salisilik Asit ve Jasmonat Aracılı Sistemik Direnç

Sistemik Edinilmiş Direnç (SAR), bitki vücudunun tamamında antifungal savunmayı güçlendiren bir ön uyarı mekanizmasıdır. Salisilik asit (SA) bu sürecin koordinatörü konumundadır; SA birikmesi PR (patojenezle ilişkili) protein genlerinin ekspresyonunu artırır. Bu proteinler arasında yer alan kitinaz ve β-1,3-glukanaz enzimleri fungal hücre duvarını doğrudan parçalayabilmektedir (Hammerschmidt, 1999).

Jasmonat aracılı direnç ise daha çok nekrotrofik patojenler (Botrytis, Alternaria) söz konusu olduğunda SA yolağına kıyasla ön plana çıkmaktadır. JA hem fenolik bileşik sentezini hem de antimikrobiyal peptidlerin (defensin, tiyonin) üretimini artırmaktadır. SA ile JA arasındaki çapraz iletişim, bitkinin saldırı tipine göre savunma kaynaklarını yeniden düzenlemesine olanak tanıyan esnek bir mekanizma oluşturmaktadır (Hua vd., 2021).

Tarımsal ve Gıda Endüstrisi Uygulamaları

Fungisit allelokimyasalların pratiğe aktarılması, formülasyon teknolojisindeki gelişmelerle birlikte giderek daha gerçekçi bir hale gelmektedir. Uçucu yağların çabuk buharlaşması ve ışığa duyarlılığı gibi pratik sorunlar bir yana bırakıldığında, bu bileşikler hem tarım hem de gıda sektörü için ciddi bir potansiyel taşımaktadır.

Biyofungisit Formülasyonları

Allelokimyasal temelli biyofungisitlerin sahaya çıkmasındaki en büyük engel, aktif bileşenin kararsız yapısıdır. Uçucu yağlar çabuk buharlaşmakta, ışıkla bozunabilmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için çeşitli formülasyon yaklaşımları geliştirilmiştir. Bunların başında nano-kapsülasyon gelmektedir. Polimer veya lipit bazlı kapsüller bileşeni koruyarak kontrollü salım sağlamaktadır. Kitosan veya siklodekstrin enkapsülasyonu ile

polisakkarit kaplama da benzer amaçla kullanılmaktadır. Hasat sonrası uygulamalarda ise modifiye atmosfer yöntemiyle depo ortamına uçucu terpen karıştırılması giderek yaygınlaşmaktadır (Morcia vd., 2020).

Gıda Güvenliği Uygulamaları

Fungal gıda bozulması ve mikotoksin kirliliği dünya genelinde önemli bir halk sağlığı sorunudur. *Aspergillus flavus* ve *A. parasiticus* tarafından üretilen aflatoksinler güçlü hepatotoksinler ve karsinojenlerdir. Fusarium türleri ise DON ve T-2 toksin gibi trikotesenler üretmektedir. Bu noktada eugenol ve sinnamaldehit, antifungal aktivitelerinin ötesinde toksin biyosentezini de baskılamasıyla öne çıkmaktadır. Marchese vd. (2017), eugenolün *A. flavus'*da aflatoksin üretimini %80-95 oranında azalttığını bildirmiştir. Bu sonuç hasat sonrası depolamada pratik uygulamalar için güçlü bir zemin oluşturmaktadır.

Timol, karvakrol ve sitral bazlı preparatlar ise meyve ve sebzelerin depolama ömrünü uzatmada test edilmektedir. *Botrytis cinerea, Rhizopus stolonifer* ve *Penicillium expansum* gibi yaygın depolama patojenlerine karşı etkili olduklarına dair veriler mevcuttur. GRAS statüsü taşıyan bu bileşiklerin kullanımı, konvansiyonel fungisitlerin bıraktığı kalıntı sorununu da ortadan kaldırmaktadır (Nazzaro vd., 2013).

Sinerjistik Kombinasyonlar ve Direnç Yönetimi

Timol ve karvakrol birlikte kullanıldığında her birinin tek başına uygulandığı duruma göre yaklaşık 4 kat daha düşük MIC değerleri elde edilmektedir. Bu sinerjistik etki FICI (Fractional Inhibitory Concentration Index) değerinin 0.5'in altında kalmasıyla doğrulanmaktadır. Allisein+amfoterisin B kombinasyonu ise flukonazola dirençli Candida suşlarında direnç mekanizmalarını kırabilmekte ve amfoterisin B dozunu %75 oranında azaltmaya olanak tanımaktadır (Ankri ve Mirelman, 1999).

Direnç yönetimi açısından bakıldığında, çok hedefli etki profili bu bileşikleri özellikle değerli kılmaktadır. Tek bir hedefe yönelik çalışan sentetik fungisitlerde bu hedefte gerçekleşen tek bir mutasyon direnç için yeterliyken, allelokimyasalların aynı anda birden fazla hücresel yapıyı etkilemesi fungusun eş zamanlı birden fazla mutasyon geliştirmesini gerektirmektedir. Bu durum direnç gelişimini mekanistik olarak güçleştirmektedir.

Tablo 3. Tarımsal uygulamalarda fungisit allelokimyasal stratejileri

Strateji	**Kullanım Alanı**	**Örnek Bileşik/Uygulama**
Biyofungisit formülasyonu	Tahıl hastalıkları (Fusarium)	Timol + karvakrol nano-kapsül; foliar uygulama (Morcia vd., 2020)
Hasat sonrası koruma	Meyve/sebze depolama	Eugenol, sitral kaplama; modifiye atmosfer (Nazzaro vd., 2013)
Tohum muamelesi	Fide çürüklükleri (Rhizoctonia)	Allisein; sinnamaldehit tohum kaplama (Morcia vd., 2020)
Gıda koruyucu	Mikotoksin baskılanması	Eugenol → aflatoksin ↓ %80–95 (Marchese vd., 2017)
Sinerjistik kombinasyon	Dirençli Candida izolatları	Allisein + amfoterisin B; doz ↓ %75 (Ankri ve Mirelman 1999)
SAR aktivasyonu	Sistemik koruma (bağcılık)	Kitosan → fitoaleksin indüksiyonu (Hua vd., 2021)
Organik tarım	Sertifikalı üretim	GRAS statüslü terpenoidler (Nazzaro vd., 2013)

Evrimsel Bağlam

Bitki–fungus etkileşimi, bitki–böcek koevolüsyonundan çok daha eski bir tarihe sahiptir. İlk karasal bitkiler karaya çıktıklarında, o dönemde karada çoktan yerleşik olan fungal patojenlerle yüz yüze gelmişlerdir. Bu uzun süreçte karşılıklı yaşam son derece çeşitli antifungal mekanizmaların ortaya çıkmasını sağlamıştır (Fisher vd., 2012).

Dikkat çekici bir nokta, bitkisel antifungal bileşiklerin çoğunun patojen funguslara karşı inhibitör etkisini korurken mikoriza fungusları ve saprofitik türler gibi yararlı funguslara yönelik bu kadar aktif olmamasıdır. Bu selektif toksisite tesadüf değil, uzun evrimsel sürecin bir ürünüdür. Bitki, besin alımına katkı sağlayan mutualist fungusları tanıyarak onlara daha toleranslı davranmaktadır (Hammerschmidt, 1999).

Ekolojik boyutuyla bakıldığında, antifungal kapasitesi yüksek bitkiler fungal hastalıkları baskılayarak ekosistemdeki bitki örtüsü çeşitliliğinin korunmasına dolaylı olarak katkı sağlamaktadır. Bu da polinatörler ve diğer ekosistem bileşenleri üzerinde olumlu zincirleme etkiler yaratmaktadır.

Sonuç

Sonuç olarak araştırmalar fungisit allelokimyasalların basit bir "bitkisel ilaç" kavramının çok ötesine geçtiğini ortaya koymaktadır. Timolden alliseine, sinnamaldehitten resveratrole kadar uzanan geniş kimyasal çeşitlilik, hücre zarından mitokondriyal işlevlere, biyofilm oluşumundan spor çimlenmesine kadar uzanan çok boyutlu etki profili bu bileşikleri hem araştırma hem de uygulama açısından gerçekten değerli kılmaktadır. Bununla birlikte bazı pratik sorunlar hala çözüm beklemektedir. Uçucu yağların kararsız yapısı, tarla koşullarında yeterli etkinliğin gösterilmesi ve düzenleyici onay süreçleri bunların başında gelmektedir. Nano-kapsülasyon ve sinerjistik kombinasyon gibi

formülasyon stratejilerindeki ilerlemeler ise bu engelleri aşmada umut verici görünmektedir. Önümüzdeki yıllarda metabolomik ve gen düzenleme araçlarının bu alana daha güçlü biçimde entegre olmasıyla yeni antifungal bileşiklerin keşfi ve mevcut bileşiklerin tarımsal kullanımının genişlemesi beklenebilir.

Kaynakça

Ankri, S., & Mirelman, D. (1999). Antimicrobial properties of allicin from garlic. *Microbes and Infection*, 1(2), 125–129. https://doi.org/10.1016/S1286-4579(99)80003-3

Bakkali, F., Averbeck, S., Averbeck, D., & Idaomar, M. (2008). Biological effects of essential oils: A review. *Food and Chemical Toxicology,* 46(2), 446–475. https://doi.org/10.1016/j.fct.2007.09.106

Fisher, M.C., Henk, D.A., Briggs, C.J., Brownstein, J.S., Madoff, L.C., McCraw, S.L., & Gurr, S J. (2012). Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health. *Nature*, 484(7393), 186–194. https://doi.org/10.1038/nature10947

Gal, F., Marbach, I., Peri, I., Birk, Y., & Smirnoff, P. (2003). Resveratrol and other stilbenes inhibit Candida growth. *Letters in Applied Microbiology,* 37(3), 208–211. https://doi.org/10.1046/j.1472-765X.2003.01378.x

Hammer, K. A., Carson, C. F., & Riley, T. V. (1999). Antimicrobial activity of essential oils and other plant extracts. *Journal of Applied Microbiology,* 86(6), 985–990. https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.1999.00780.x

Hammerschmidt, R. (1999). Phytoalexins: What have we learned after 60 years? *Annual Review of Phytopathology,* 37, 285–306. https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.37.1.285

Hua, C., Zhao, J.H., & Guo, H.S. (2018). Trans-kingdom RNA silencing in plant-fungal pathogen interactions. *Molecular Plant*, 11(2), 235–244. https://doi.org/10.1016/j.molp.2018.01.001

Iwasa, K., Kamigauchi, M., Ueki, M., & Taniguchi, M. (1998). Antibacterial activity and structure-activity relationships of berberine analogues. *European Journal of Medicinal Chemistry,* 33(3), 255–263. https://doi.org/10.1016/S0223-5234(98)80030-0

Marchese, A., Barbieri, R., Coppo, E., Orhan, I.E., Daglia, M., Nabavi, S.F., Izadi, M., Abdollahi, M., Nabavi, S.M., & Ajami, M. (2017). Antimicrobial activity of eugenol and essential oils containing eugenol: A mechanistic viewpoint. *Critical Reviews in Microbiology,* 43(6), 668–689. https://doi.org/10.1080/1040841X.2017.1295225

Morcia, C., Tumino, G., Ghizzoni, R., & Terzi, V. (2020). Carvacrol, thymol, and essential oils of Lamiaceae: A review of their antimicrobial activities. *Plants,* 9(2), 285. https://doi.org/10.3390/plants9020285

Müller, K.O., & Börger, H. (1940). Experimentelle Untersuchungen über die Phytophthora-Resistenz der Kartoffel. *Arbeiten aus der Biologischen Reichsanstalt für Land- und Forstwirtschaft*, 23, 189–231.

Nazzaro, F., Fratianni, F., De Martino, L., Coppola, R., & De Feo, V. (2013). Effect of essential oils on pathogenic bacteria. *Pharmaceuticals,* 6(12), 1451–1474. https://doi.org/10.3390/ph6121451

Pina-Pérez, M.C., Ferreiro, M S., Amalaradjou, M.A., & Bhuniya, S. (2017). Antimicrobial potential of plant derived compounds against foodborne pathogens. In A. Husain & M. Ahmad (Eds.), *Frontiers in anti-infective drug discovery* (pp. 68–

110). *Bentham Science.* https://doi.org/10.2174/978168108292911706000 6

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

BÖLÜM 5
YENİLEBİLİR MANTARLARIN HASAT SONRASI MUHAFAZASINDA UÇUCU YAĞLARIN KULLANIMI: ETKİ MEKANİZMALARI VE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

Beyhan KİBAR

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Ziraat Fakültesi

Bahçe Bitkileri Bölümü

e-posta: beyhan.kibar@ibu.edu.tr

ORCID: 0000-0001-9253-5747

YENİLEBİLİR MANTARLARIN HASAT SONRASI MUHAFAZASINDA UÇUCU YAĞLARIN KULLANIMI: ETKİ MEKANİZMALARI VE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

BEYHAN KİBAR[1]

Giriş

Yenilebilir mantarlar; yüksek kaliteli protein, esansiyel amino asitler, diyet lifi, vitaminler, mineraller ve çeşitli biyoaktif bileşenler içermeleri nedeniyle insan beslenmesinde önemli bir yere sahiptir. Özellikle polisakkaritler, polifenoller, peptitler ve terpenoidler gibi bileşenlerin varlığı, mantarların fonksiyonel gıda potansiyelini de artırmaktadır. *Agaricus bisporus*, *Lentinula edodes* ve *Pleurotus* türleri başta olmak üzere yenilebilir mantarların üretim ve tüketiminin yaygınlaşması, taze mantarların hasat sonrası kalitesinin korunmasını ve pazarlama süresinin uzatılmasını giderek

[1] Prof. Dr., Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü. ORCID: 0000-0001-9253-5747

daha önemli hâle getirmiştir (Guo ve ark., 2023; Liufang ve ark., 2024).

Bununla birlikte, yenilebilir mantarlar yüksek su içerikleri, yüksek solunum ve transpirasyon hızları, koruyucu kütikula veya mumsu tabakalarının bulunmaması ve yüksek metabolik aktiviteleri nedeniyle hasattan sonra hızla kalite kaybetmektedir. Bu özellikler su kaybı, yumuşama, büzüşme, şapka açılması, esmerleşme, mikrobiyal bozulma ve besin bileşenlerindeki kayıpları hızlandırarak duyusal kaliteyi ve ticari değeri azaltmaktadır (Guo ve ark., 2023; Cao ve ark., 2024; Liufang ve ark., 2024; Xia ve ark., 2024). Hasat sonrası kalite kaybında oksidatif stres ve enzimatik esmerleşme de önemli rol oynamakta; reaktif oksijen türlerinin (ROS) birikmesi hücre zarı bütünlüğünü bozarak lipid oksidasyonunu ve esmerleşmeyle ilişkili reaksiyonları hızlandırabilmektedir. Yüksek su içeriği ve hassas doku yapısı ise mikrobiyal gelişimi kolaylaştırmaktadır (Guo ve ark., 2023).

Taze mantarların muhafazasında düşük sıcaklık, modifiye atmosfer paketleme, kontrollü atmosfer, ışınlama, ozon, plazma teknolojileri, yenilebilir kaplamalar ve kimyasal koruyucular gibi farklı yöntemlerden yararlanılmaktadır (Cao ve ark., 2024; Xia ve ark., 2024; Zheng ve ark., 2025). Ancak sentetik koruyuculara ilişkin kalıntı, toksikolojik risk ve tüketici kabulü gibi kaygılar ile bazı fiziksel yöntemlerin yüksek yatırım ve enerji gereksinimi, doğal kaynaklı muhafaza yaklaşımlarına olan ilgiyi artırmıştır. Bu kapsamda uçucu yağlar, güvenli ve çevre dostu muhafaza yaklaşımlarına yönelik artan talep doğrultusunda önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Guo ve ark., 2023; Liufang ve ark., 2024).

Uçucu yağlar; bitkilerin farklı kısımlarından elde edilen ve başlıca terpenler, terpenoidler, fenolik bileşikler, aldehitler, ketonlar, alkoller ve esterlerden oluşan uçucu karışımlardır. Kekik, tarçın, karanfil, okaliptüs, nane ve rezene gibi farklı bitkilerden elde edilen uçucu yağların yenilebilir mantarlarda mikrobiyal gelişimi, solunum hızını, esmerleşmeyi ve besin kayıplarını sınırlandırabildiği; hücre zarı bütünlüğü ve genel kalite özelliklerinin korunmasına katkı sağlayabildiği bildirilmektedir (Gao ve ark., 2014; Yan ve ark., 2023; Han ve ark., 2024; Grzyb ve ark., 2025).

Uçucu yağların etkinliği kimyasal bileşim, doz, uygulama süresi ve yöntemi, mantar türü ve depolama koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Fumigasyon, daldırma, yenilebilir kaplama ve aktif ambalajlama gibi uygulamaların yanı sıra nanoemülsiyon, mikro/nanoenkapsülasyon ve kontrollü salım sistemleri de stabiliteyi ve etkinlik süresini artırmak amacıyla araştırılmaktadır. Bununla birlikte standardizasyon güçlükleri, yüksek dozlarda istenmeyen tat ve koku oluşumu, stabilite, maliyet ve mevzuata ilişkin sorunlar ticari kullanımı sınırlandırabilmektedir (Guo ve ark., 2023; Yan ve ark., 2023). Bu bölümde, yenilebilir mantarlarda hasat sonrası kalite kayıpları ile uçucu yağların etki mekanizmaları, uygulama yöntemleri, kalite üzerindeki etkileri, avantajları, sınırlılıkları ve gelecekteki kullanım olanakları güncel çalışmalar ışığında değerlendirilecektir.

Yenilebilir Mantarlarda Hasat Sonrası Kalite Kayıpları

Yenilebilir mantarlar hasattan sonra canlılıklarını sürdürmekte; solunum, su kaybı, enzimatik reaksiyonlar ve diğer metabolik faaliyetler devam etmektedir. Yüksek su içerikleri, koruyucu kütikula tabakasının bulunmaması ve yüksek metabolik aktiviteleri nedeniyle kalite kayıpları birçok taze ürüne göre daha

hızlı gerçekleşmektedir. Su ve ağırlık kaybı, yüksek solunum hızı, oksidatif stres, esmerleşme, tekstür kaybı ve mikrobiyal gelişme birbiriyle ilişkili olarak ilerlemekte; depolama süresinin uzamasıyla besin ve aroma bileşenlerindeki kayıplar da artmaktadır. Bu değişimler mantarların duyusal kalitesini, besin değerini ve pazarlanabilirliğini azaltmaktadır (Guo ve ark., 2023; Liufang ve ark., 2024; Xia ve ark., 2024). Kalite kaybının hızı ürünün fizyolojik özelliklerinin yanı sıra depolama sıcaklığı, bağıl nem ve mekanik zarar gibi çevresel faktörlerden de etkilenmektedir.

Su Kaybı ve Nem Değişimleri: Taze yenilebilir mantarların su içeriği genellikle %85–95 arasındadır. Etkili bir kütikula veya mumsu tabakanın bulunmaması nedeniyle hasat sonrasında su kaybı hızla devam etmekte; turgor azalması, buruşma, ağırlık ve sertlik kaybına yol açmaktadır. Taze ağırlığın yaklaşık %5–10'unun kaybedilmesi ticari kabul edilebilirliği önemli ölçüde azaltabilmektedir (Silva ve ark., 2024; Xia ve ark., 2024). Düşük bağıl nem su kaybını artırırken, aşırı yüksek nem yüzeyde yoğunlaşma ve mikrobiyal gelişme riskini artırdığından uygun nem dengesinin sağlanması önemlidir.

Solunum ve Yaşlanma (Senesens): Yenilebilir mantarların yüksek solunum hızı, rezerv maddelerin hızlı tüketilmesine ve yaşlanmanın hızlanmasına neden olmakta; bu nedenle solunum hızı raf ömrünün önemli göstergelerinden biri kabul edilmektedir (Silva ve ark., 2024; Zheng ve ark., 2025). Depolama sırasında ROS birikimi ve antioksidan savunmanın yetersiz kalması, membran lipidlerinin oksidasyonuna ve hücre zarı bütünlüğünün bozulmasına yol açmaktadır. Şapka açılması, sap uzaması ve bazı türlerde spor salınımı gibi gelişimsel değişiklikler ile şeker, çözünebilir protein ve

aroma bileşenlerindeki azalmalar da kalite kaybını hızlandırmaktadır (Liufang ve ark., 2024).

Enzimatik Esmerleşme: Renk, özellikle *Agaricus bisporus* gibi açık renkli mantarlarda tüketici kabulünü belirleyen önemli bir kalite özelliğidir. Hasat sonrası esmerleşmede polifenol oksidaz (PPO) başlıca rolü oynarken, peroksidaz (POD) da sürece katkıda bulunabilmektedir (Gao ve ark., 2014; Liufang ve ark., 2024; Zheng ve ark., 2025). Oksidatif stres ve membran bütünlüğünün bozulması, fenolik bileşiklerin oksidatif enzimlerle temasını kolaylaştırarak esmerleşmeyi artırmaktadır. Mekanik zarar, yüksek sıcaklık, düşük bağıl nem ve mikrobiyal gelişme de bu süreci hızlandırabilmektedir. Esmerleşme, *A. bisporus* yanında *L. edodes*, *P. ostreatus* ve *P. eryngii* gibi ticari türlerde de önemli bir kalite sorunudur.

Tekstür Kaybı ve Yumuşama: Sertlik, taze mantarların tazeliğini ve tüketici kabulünü belirleyen önemli tekstürel özelliklerden biridir. Depolama süresince hücre duvarının temel bileşenleri olan glukan ve kitinin parçalanması dokunun yumuşamasına neden olmaktadır. Özellikle β-1,3-glukanaz ve kitinaz aktivitelerindeki artış sertlik kaybını hızlandırabilmektedir (Liufang ve ark., 2024). Su kaybı, turgor azalması, membran lipidlerinin oksidasyonu ve mikrobiyal faaliyet de tekstür kaybına katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle sertliğin korunması, hücre duvarı yapısı ve membran bütünlüğünün devamlılığıyla yakından ilişkilidir.

Mikrobiyal Bozulma: Yüksek su aktivitesi, besince zengin doku ve koruyucu yüzey tabakasının bulunmaması taze mantarları mikrobiyal bozulmaya duyarlı hâle getirmektedir. Hasat ve taşıma sırasında oluşan yaralanmalar da mikroorganizmaların dokuya girişini kolaylaştırmaktadır. Bakteriyel bozulmada özellikle *Pseudomonas* türleri önem taşımakta; *Pseudomonas tolaasii*, *A.*

bisporus'ta kahverengi leke hastalığının başlıca etmenlerinden biri olarak bilinmektedir. *Pseudomonas* türleri *P. ostreatus*'ta da sararma ve kalite kaybına neden olabilmektedir (Silva ve ark., 2024). Fungal bozulmada ise *Trichoderma*, *Cladobotryum*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus* ve *Alternaria* gibi cinsler öne çıkmaktadır (Adhikari ve Jha, 2023). Mikrobiyal gelişme çürümenin yanı sıra yumuşama ve renk değişimini de hızlandırdığından hijyenik hasat, uygun ambalajlama ve soğuk zincirin korunması kalite kayıplarının sınırlandırılmasında önemlidir.

Hasat Sonrası Bozulmayı Etkileyen Çevresel Faktörler

Yenilebilir mantarların hasat sonrası bozulma hızı; sıcaklık, bağıl nem, mekanik zarar, depolama süresi ve ambalajlama koşullarından önemli ölçüde etkilenmektedir.

Depolama sıcaklığı, solunum, enzimatik reaksiyonlar, su kaybı ve mikrobiyal gelişim üzerinde doğrudan etkilidir. Yüksek sıcaklık kalite kayıplarını hızlandırırken, hasat sonrası hızlı soğutma ve soğuk zincirin korunması bu süreçleri yavaşlatmaktadır. Çoğu taze yenilebilir mantarda yaklaşık 0–4 °C arasındaki düşük sıcaklıkların kalitenin korunması açısından uygun olduğu bildirilmektedir (Guo ve ark., 2023).

Bağıl nem, su kaybının sınırlandırılması ile mikrobiyal gelişimin kontrolü arasındaki dengenin sağlanmasında önemlidir. Düşük bağıl nem ağırlık ve sertlik kaybını artırırken, aşırı yüksek nem ve yüzeyde yoğunlaşma mikrobiyal gelişimi teşvik edebilmektedir. Bu nedenle çoğu mantar türünde yaklaşık %85–95 bağıl nemin uygun olduğu belirtilmektedir (Guo ve ark., 2023; Zheng ve ark., 2025).

Mekanik zararlar, mantarların hassas dokusu nedeniyle kalite kaybını hızlandırmaktadır. Hasat, sınıflandırma, paketleme ve taşıma sırasında oluşan ezilme ve yaralanmalar hücre bütünlüğünü bozarak esmerleşmeyi ve mikrobiyal gelişimi artırabilmektedir.

Depolama süresi uzadıkça su kaybı, solunum, oksidatif stres, esmerleşme ve yumuşama artarken besin ve aroma bileşenlerinde azalmalar meydana gelmektedir. Uygun depolama koşulları bu değişimleri tamamen önleyememekte, ancak ilerlemelerini önemli ölçüde yavaşlatabilmektedir.

Ambalajlama koşulları ise ürün çevresindeki nem ve gaz dengesinin korunmasında belirleyicidir. Uygun olmayan ambalajlama aşırı su kaybına veya nem birikimine; yetersiz gaz geçirgenliği ise O_2'nin azalması ve CO_2'nin artmasına bağlı olarak istenmeyen tat ve koku oluşumuna neden olabilmektedir. Bu nedenle ambalaj seçimi mantarın solunum hızı, depolama sıcaklığı ve hedeflenen raf ömrüne göre yapılmalıdır.

Sonuç olarak, yenilebilir mantarlarda hasat sonrası kalite kayıpları çevresel koşulların fizyolojik, biyokimyasal ve mikrobiyal süreçler üzerindeki ortak etkisiyle şekillenmektedir. Etkili bir muhafaza yaklaşımının su kaybını ve solunumu sınırlandırması, hücresel bütünlüğü koruması, oksidatif stres ve esmerleşmeyi azaltması ve mikrobiyal gelişimi baskılaması gerekmektedir. Bu gereksinimler, antioksidan ve antimikrobiyal özellikleri birlikte gösterebilen uçucu yağların yenilebilir mantarların hasat sonrası muhafazasında kullanılmasının temelini oluşturmaktadır.

Yenilebilir Mantarların Muhafazasında Uçucu Yağların Kullanımı

Uçucu yağlar, aromatik bitkilerin farklı kısımlarından elde edilen, düşük molekül ağırlıklı ve uçucu özellikte çok sayıda bileşiğin oluşturduğu doğal karışımlardır. Terpenler ve terpenoidlerin yanı sıra fenoller, aldehitler, alkoller, ketonlar ve esterler gibi farklı kimyasal grupları içermektedir. Bileşimleri; bitki türü ve çeşidi, kullanılan bitki kısmı, yetiştirme ve hasat koşulları ile ekstraksiyon yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Antioksidan, antibakteriyel ve antifungal özellikleri nedeniyle gıda muhafazasında sentetik koruyuculara alternatif doğal bileşikler olarak değerlendirilmektedir (Guo ve ark., 2023; Liufang ve ark., 2024).

Yenilebilir mantarların yüksek su içeriği, hızlı metabolizması ve mikrobiyal bozulmaya duyarlılığı, uçucu yağların bu ürünlerde kullanımını önemli hâle getirmektedir. Uçucu yağların mikrobiyal gelişimi baskılamanın yanı sıra ağırlık kaybı, esmerleşme, tekstür kaybı, şapka açılması ve oksidatif hasarı geciktirebildiği bildirilmektedir (Gao ve ark., 2014; Qu ve ark., 2020; Yan ve ark., 2023). Ayrıca PPO ve POD gibi esmerleşmeyle ilişkili enzimlerin aktivitelerini sınırlandırarak antioksidan savunmayı destekleyebilmekte ve fenolik bileşikler ile askorbik asidin korunmasına katkı sağlayabilmektedir (Gao ve ark., 2014; Guo ve ark., 2023; Liufang ve ark., 2024).

Uçucu yağların antimikrobiyal etkisi büyük ölçüde lipofilik yapılarıyla ilişkilidir. Aktif bileşenler mikroorganizmaların hücre zarındaki lipidlerle etkileşerek zar bütünlüğünü bozmakta ve geçirgenliği artırmaktadır. Bunun sonucunda hücre içi bileşenlerin sızması, enerji metabolizması ve enzim fonksiyonlarının bozulması

ile ROS birikiminin artması mikrobiyal hücre ölümüne yol açabilmektedir (Han ve ark., 2024).

Uçucu yağlar mantarlara fumigasyon, daldırma ve yüzey uygulamasıyla doğrudan uygulanabildiği gibi yenilebilir kaplama ve aktif ambalaj sistemlerine de dahil edilebilmektedir. Fumigasyon, uçucu bileşiklerin gaz fazında ürün yüzeyine ulaşmasını sağlaması nedeniyle yaygın yöntemlerden biridir. Ancak yüksek uçuculuk etkinlik süresini kısaltabilmekte, yüksek dozlar ise ürünün tat ve aromasını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu sınırlılıkların azaltılması amacıyla nanoemülsiyon, mikro/nanoenkapsülasyon, nanopartikül, nanolif ve kontrollü salım sistemleri geliştirilmekte; bu yaklaşımlarla uçucu yağların stabilitesinin artırılması ve daha düşük dozlarda uzun süreli etkinlik sağlanması amaçlanmaktadır (Guo ve ark., 2023; Cao ve ark., 2024; Liufang ve ark., 2024).

Uçucu Yağların Kimyasal Bileşimi

Uçucu yağların biyolojik etkinliği büyük ölçüde kimyasal bileşimleriyle ilişkilidir. Bileşenlerin tür ve oranları; bitki türü ve çeşidi, kullanılan bitki kısmı, yetiştirme ve hasat koşulları ile ekstraksiyon ve depolama yöntemlerine bağlı olarak değişebilmektedir. Yenilebilir mantarların muhafazasında kullanılan uçucu yağlar başlıca terpenler, fenoller, aldehitler, alkoller, ketonlar ve esterlerden oluşmaktadır (Guo ve ark., 2023).

Limonen ve pinenler gibi terpenler, timol, karvakrol ve öjenol gibi fenoller, sinnamaldehit gibi aldehitler ile linalool, mentol, karvon ve çeşitli asetatlar uçucu yağların başlıca aktif bileşenleri arasında yer almaktadır. Bu bileşikler, mikrobiyal hücre zarının yapısını ve geçirgenliğini etkileyerek antimikrobiyal aktivite gösterebilmekte; bazıları ise serbest radikallerin etkisizleştirilmesi

yoluyla antioksidan savunmaya katkı sağlayabilmektedir. Bununla birlikte uçucu yağların muhafazadaki etkinliği yalnızca tek bir bileşene değil, bileşenlerin oranına, aralarındaki sinerjik etkileşimlere ve uygulama koşullarına bağlı olarak değişmektedir (Guo ve ark., 2023; Golmohammadi ve ark., 2024; Liufang ve ark., 2024; Grzyb ve ark., 2025).

Mantar Muhafazasında Kullanılan Başlıca Uçucu Yağlar

Tarçın Uçucu Yağı: Tarçın uçucu yağı, yenilebilir mantarların hasat sonrası muhafazasında yaygın olarak araştırılan uçucu yağlardan biridir. Başlıca aktif bileşeni olan sinnamaldehit, mikrobiyal hücre zarının yapısını bozarak hücre içi bileşenlerin sızmasına ve enerji metabolizmasının aksamasına neden olabilmektedir. Tarçın uçucu yağı; fumigasyon, aktif ambalajlama ve kontrollü salım sistemleriyle uygulanmakta, yüksek uçuculuğunu sınırlandırmak amacıyla nanoemülsiyon, mikroenkapsülasyon ve nanotaşıyıcı sistemlerden yararlanılmaktadır (Guo ve ark., 2023). Tarçın uçucu yağı uygulamalarının yenilebilir mantarlarda solunum hızı, ağırlık ve nem kaybı, esmerleşme, şapka açılması ve mikrobiyal gelişmeyi sınırlandırdığı; sertlik, renk, fenolik bileşikler, antioksidan kapasite ve doku bütünlüğünün korunmasına katkı sağlayarak yaşlanmayı geciktirdiği bildirilmektedir (Louis ve ark., 2021; Shao ve ark., 2021; Guo ve ark., 2023; Golmohammadi ve ark., 2024; Song ve ark., 2025).

Kekik Uçucu Yağı: Kekik uçucu yağının başlıca aktif bileşenleri olan timol ve karvakrol güçlü antimikrobiyal ve antioksidan özellik göstermektedir. *Agaricus bisporus* ve *Pholiota nameko*'da kekik uçucu yağı uygulamalarının esmerleşme, ağırlık kaybı ve oksidatif bozulmayı azaltarak kaliteyi koruduğu bildirilmiştir (Gao ve ark., 2014; Zhu ve ark., 2019). Bununla birlikte

etkinlik konsantrasyona ve ürünün fizyolojik durumuna bağlıdır. Nitekim taze kesilmiş *A. bisporus*'ta yüksek konsantrasyonların membran hasarı, lipid peroksidasyonu ve esmerleşmeyi artırabildiği gösterilmiş, uygun doz seçiminin önemi vurgulanmıştır (Zhu ve ark., 2026).

Oregano Uçucu Yağı: Oregano uçucu yağı, özellikle karvakrol bakımından zengin olup güçlü antimikrobiyal ve antioksidan aktivite göstermektedir (Guo ve ark., 2023). Yüksek uçuculuk ve suda düşük çözünürlük nedeniyle taşıyıcı ve kontrollü salım sistemleriyle kullanımı öne çıkmaktadır. Yan ve ark. (2023), oregano uçucu yağı ve mezogözenekli nanosilika içeren aktif filmlerin *A. bisporus*'ta ağırlık kaybı, solunum, oksidatif hasar ve mikrobiyal gelişmeyi azaltırken sertlik ve bazı besinsel özelliklerin korunmasına katkı sağladığını bildirmiştir. Bununla birlikte yüksek uçucu yağ oranlarının ambalaj materyalinin fiziksel özelliklerini olumsuz etkileyebilmesi nedeniyle uygun formülasyon önem taşımaktadır.

Limon ve Diğer Turunçgil Uçucu Yağları: Limon, acı portakal, bergamot ve greyfurt uçucu yağları, başta lipofilik terpenler olmak üzere antimikrobiyal ve antioksidan özellik gösteren bileşikler içermektedir. Bu yağların *A. bisporus*'ta mikrobiyal gelişme, solunum ve esmerleşmeyi azaltarak sertlik, antioksidan savunma ve genel kaliteyi koruyabildiği bildirilmektedir (Karimirad ve ark., 2020; López-Gómez ve ark., 2021; Wang ve ark., 2021). Film, nanopartikül ve kontrollü salım sistemleriyle kullanımları hasat sonrası muhafaza açısından dikkat çekmektedir.

Kimyon Uçucu Yağı: Kimyon uçucu yağı, antimikrobiyal ve antioksidan özellikleri nedeniyle *A. bisporus*'un hasat sonrası muhafazasında araştırılmıştır. Yüksek uçuculuğunu azaltmak

amacıyla kitosan nanopartikülleriyle kontrollü salım şeklinde kullanılmış; bu uygulamanın mikrobiyal gelişme ve esmerleşmeyi azaltarak sertlik, antioksidan savunma ve genel kaliteyi koruduğu bildirilmiştir (Karimirad ve ark., 2018, 2019).

Zerdeçal Uçucu Yağı: Zerdeçal uçucu yağının yüksek uçuculuğu ve aktif bileşiklerinin düşük stabilitesi nedeniyle nanotaşıyıcı sistemlerle kullanımı araştırılmıştır. Zerdeçal uçucu yağı yüklü kitosan nanopartiküllerinin *A. bisporus*'ta mikrobiyal gelişme ve esmerleşmeyi azaltarak renk, sertlik ve antioksidan özelliklerin korunmasına katkı sağladığı bildirilmiştir (Valizadeh ve ark., 2021). Bununla birlikte nanopartikül sistemlerinin maliyeti ticari uygulamalarda dikkate alınması gereken bir faktördür.

Okaliptüs Uçucu Yağı: Okaliptüs uçucu yağı, özellikle fungal bozulmanın kontrolündeki antimikrobiyal etkisi nedeniyle dikkat çekmektedir. Etkinliğini ve stabilitesini artırmak amacıyla emülsiyon ve mikroenkapsülasyon gibi kontrollü salım sistemleri kullanılmaktadır. Han ve ark. (2024), okaliptüs uçucu yağı–tamarind gamı emülsiyonunun *A. bisporus*'ta *Trichoderma harzianum* gelişimini baskıladığını; sertlik ve beyazlığı korurken ağırlık kaybı, elektriksel iletkenlik ve solunumu azalttığını bildirmiştir. Mikroenkapsüle okaliptüs uçucu yağı içeren aktif filmlerin de solunum ve nem kaybını azaltarak renk ve kaliteyi koruduğu ve raf ömrünü uzattığı belirlenmiştir (Chen ve ark., 2022).

Diğer Uçucu Yağlar: Nane, karanfil, limon otu, citronella, *Satureja khuzistanica*, kajuput, çay ağacı, rezene ve ladin uçucu yağlarının da yenilebilir mantar muhafazasında kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Nane, *S. khuzistanica*, kajuput ve çay ağacı uçucu yağlarının *A. bisporus*'ta mikrobiyal gelişme, esmerleşme, oksidatif bozulma ve ağırlık kaybını azaltarak genel kaliteyi koruduğu

bildirilmiştir (Nasiri ve ark., 2018; Qu ve ark., 2020; Chaudhari ve ark., 2023; Ali ve ark., 2025). Rezene ve ladin uçucu yağlarının ise bozulmayı yavaşlatabildiği, ancak aroma üzerindeki olası etkileri nedeniyle duyusal kalitenin de dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir (Grzyb ve ark., 2025, 2026).

Uçucu Yağların Uygulama Yöntemleri

Uçucu yağların yenilebilir mantarların hasat sonrası muhafazasındaki etkinliği; kimyasal bileşim, konsantrasyon ve uygulama yöntemine bağlıdır. Bu yağlar doğrudan yüzey uygulaması, fumigasyon, yenilebilir kaplama, film ve aktif ambalajlama sistemleriyle kullanılabilmektedir. Yüksek uçuculuk ve suda düşük çözünürlük gibi sınırlılıkları azaltmak amacıyla mikro/nanoenkapsülasyon, nanoemülsiyon ve kontrollü salım sistemleri geliştirilmektedir (Guo ve ark., 2023; Liufang ve ark., 2024). Uygulama yöntemi seçilirken mantar ve uçucu yağ türü, konsantrasyon, depolama koşulları, duyusal kalite, maliyet ve gıda güvenliği birlikte değerlendirilmelidir. Özellikle doğrudan uygulamalarda yüksek konsantrasyonlar istenmeyen tat ve koku, yüzey hasarı ve esmerleşmeye yol açabildiğinden, son yıllarda daha düşük dozlarda uzun süreli etkinlik sağlayan enkapsülasyon ve kontrollü salım sistemleri öne çıkmaktadır.

Daldırma Uygulamaları: Bu yöntemde mantarlar, belirli konsantrasyonda uçucu yağ içeren çözelti, emülsiyon veya kaplama karışımına kısa süreyle batırılmaktadır. Uçucu yağların düşük suda çözünürlüğü nedeniyle genellikle emülsiyon hâlinde veya kitosan, jelatin, aljinat ve gamlar gibi yenilebilir kaplama materyalleriyle birlikte kullanılmaktadır. Daldırma yöntemi kolay uygulanması ve yüzeyde homojen dağılım sağlaması açısından avantajlıdır. Ancak aşırı nem ve çapraz bulaşma riskine karşı uygulama süresi,

konsantrasyon ve işlem sonrası kurutma koşulları dikkatle belirlenmelidir.

Püskürtme Uygulamaları: Bu yöntemde uçucu yağ içeren çözelti veya emülsiyon mantar yüzeyine ince damlacıklar hâlinde uygulanmaktadır. Daldırmaya göre daha az çözelti gerektirmesi ve ticari üretim süreçlerinde kolaylıkla uygulanabilmesi önemli avantajlarıdır. Ancak suda düşük çözünürlük homojen dağılımı sınırlayabileceğinden emülgatör veya uygun taşıyıcıların kullanılması gerekebilir. Ayrıca yüksek konsantrasyonlar istenmeyen tat ve koku oluşumuna neden olabileceğinden, düşük konsantrasyonlu emülsiyonların homojen uygulanması önemlidir (Liufang ve ark., 2024).

Fumigasyon ve Buhar Fazı Uygulamaları: Fumigasyon, uçucu yağların mantar muhafazasında en çok araştırılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde uçucu bileşenlerin kapalı ortamda buhar fazına geçerek ürün yüzeyine ulaşması sağlanmaktadır. Ürünün sıvıyla doğrudan temas etmemesi, düzensiz yüzeylere ulaşabilmesi ve yüzey ıslanmasını önlemesi başlıca avantajlarıdır. Çalışmalar, fumigasyonun esmerleşme, mikrobiyal gelişme, ağırlık kaybı ve oksidatif bozulmayı azaltarak depolama kalitesinin korunmasına katkı sağlayabildiğini göstermektedir (Gao ve ark., 2014; Qu ve ark., 2020; Han ve ark., 2024; Grzyb ve ark., 2025, 2026). Etkinlik; uçucu yağ dozu, uygulama süresi, ortam hacmi, sıcaklık ve ambalajın gaz geçirgenliğine bağlıdır. Düşük dozlar koruyucu etkinliği sınırlarken, yüksek dozlar istenmeyen aroma ve doku değişikliklerine yol açabilmektedir. Bu nedenle koruyucu etki sağlarken duyusal ve fiziksel kaliteyi olumsuz etkilemeyecek optimum buhar konsantrasyonunun belirlenmesi önemlidir.

Yenilebilir Kaplama ve Filmlere Katılmaları: Yenilebilir kaplamalar, mantar yüzeyinde ince bir bariyer oluşturarak su ve gaz transferini sınırlandırabilmektedir. Kitosan, aljinat, jelatin, nişasta ve bitkisel gamlara uçucu yağların eklenmesiyle bu bariyer etkisi antimikrobiyal ve antioksidan özelliklerle desteklenmektedir. Böylece su kaybı, solunum hızı, esmerleşme ve mikrobiyal gelişme azaltılırken sertlik ve genel kalite korunabilmektedir. Uçucu yağların kaplama matriksinde tutulması etkinliğin daha uzun sürmesine katkı sağlamaktadır. Ancak aşırı kalın veya düşük gaz geçirgenliğine sahip kaplamalar düşük O_2 ve yüksek CO_2 koşullarına yol açabileceğinden kaplama kalınlığı ve bileşimi dikkatle ayarlanmalıdır. *A. bisporus*'ta uçucu yağ içeren kaplamaların ağırlık kaybı, çürüme ve esmerleşmeyi azaltarak kaliteyi koruduğu bildirilmiştir (Nasiri ve ark., 2018; Golmohammadi ve ark., 2024; Ali ve ark., 2025).

Aktif Ambalajlama Sistemleri: Aktif ambalajlama, ambalaj materyaline eklenen aktif bileşenler aracılığıyla ürün çevresinin düzenlenmesini amaçlamaktadır. Uçucu yağlar film, ped, nanolif ve benzeri materyallere dahil edilerek depolama süresince kontrollü biçimde salınabilmektedir. Böylece antimikrobiyal ve antioksidan etkinlik daha uzun süre sürdürülebilirken, yüksek uçuculuk ve yoğun aroma gibi doğrudan kullanımın bazı sınırlılıkları azaltılabilmektedir. *A. bisporus*'ta uçucu yağ içeren aktif filmlerin solunum, esmerleşme, ağırlık kaybı, oksidatif hasar ve mikrobiyal gelişmeyi azaltarak sertlik ve antioksidan kapasitenin korunmasına katkı sağladığı bildirilmiştir (Wang ve ark., 2021; Yan ve ark., 2023). Bu sistemlerin etkinliği, uçucu yağın özelliklerinin yanı sıra ambalajın gaz ve su buharı geçirgenliği, dayanıklılığı ve salım hızına bağlıdır.

Mikroenkapsülasyon ve Nanoenkapsülasyon: Uçucu yağların yüksek uçuculuk, ışık ve oksijene duyarlılık, suda düşük çözünürlük ve güçlü aroma gibi özellikleri muhafazadaki kullanımını sınırlandırabilmektedir. Mikro- ve nanoenkapsülasyon, aktif bileşenlerin taşıyıcı materyaller içerisine alınarak korunmasını, daha homojen dağılmasını ve kontrollü salımını sağlayabilmektedir. Kitosan nanopartikülleri, mezogözenekli nanosilika, siklodekstrinler ve biyopolimerler bu amaçla kullanılan başlıca taşıyıcılardır (Guo ve ark., 2023). *A. bisporus*'ta kimyon, zerdeçal ve kajuput uçucu yağlarının nanopartikül sistemleriyle uygulanmasının mikrobiyal gelişme, esmerleşme ve oksidatif kalite kayıplarını azaltarak sertlik, antioksidan kapasite ve raf ömrünün korunmasına katkı sağladığı bildirilmiştir (Karimirad ve ark., 2018, 2019; Valizadeh ve ark., 2021; Chaudhari ve ark., 2023). Bununla birlikte nanoölçekli taşıyıcıların kullanımı; maliyet, ticari uygulanabilirlik, gıda güvenliği, tüketici kabulü ve mevzuata uygunluk açısından da değerlendirilmelidir.

Kontrollü ve Yavaş Salım Sistemleri: Bu sistemler, uçucu yağ bileşenlerinin depolama süresince yavaş ve düzenli biçimde serbest bırakılmasını sağlayarak hızlı uçuculuğu ve başlangıçtaki yüksek konsantrasyon riskini azaltmaktadır. Kontrollü salım; mikro/nanoenkapsülasyon, gözenekli taşıyıcılar, siklodekstrin kompleksleri, nanolifler ve aktif filmlerle sağlanabilmektedir. Mantar muhafazasında bu sistemlerin uçucu yağ kaybını azaltarak antimikrobiyal ve antioksidan etkinliğin daha uzun süre sürdürülmesine ve depolama kalitesinin korunmasına katkı sağladığı bildirilmiştir (Pan ve ark., 2019; Yan ve ark., 2023; Song ve ark., 2024).

Uçucu Yağların Etki Mekanizmaları

Uçucu yağlar, yenilebilir mantarların muhafazasında mikrobiyal gelişimi baskılamak, oksidatif stresi azaltmak, antioksidan savunmayı desteklemek ve hücre zarı bütünlüğünü korumak gibi çok yönlü etkiler göstermektedir. Ayrıca esmerleşme ve solunumu yavaşlatarak kalite kaybının geciktirilmesine ve raf ömrünün uzatılmasına katkı sağlamaktadır (Guo ve ark., 2023; Liufang ve ark., 2024).

Antimikrobiyal Etki: Uçucu yağların antimikrobiyal etkisinde başlıca hedef mikroorganizma hücre zarıdır. Uçucu yağlarda bulunan terpenler, fenolik bileşikler ve aromatik aldehitler gibi lipofilik bileşenler zarın lipid tabakasıyla etkileşerek yapı ve geçirgenliği bozmakta; iyonlar, proteinler ve nükleik asitler gibi hücresel bileşenlerin dışarı sızmasına neden olabilmektedir (Falleh, 2025). Bu bozulma membran potansiyeli, ATP sentezi ve enzim işlevlerini etkileyerek enerji metabolizmasını sınırlandırmaktadır. Ayrıca oksidatif stres ve DNA hasarının artması da mikrobiyal gelişmenin baskılanmasına katkı sağlamaktadır (Guo ve ark., 2023; Liufang ve ark., 2024).

Antioksidan Etki: Hasat sonrası dönemde aşırı ROS birikimi oksidatif stresi artırarak esmerleşme, yumuşama ve yaşlanmayı hızlandırabilmektedir (Guo ve ark., 2023). Uçucu yağlardaki timol, karvakrol ve öjenol gibi fenolik bileşikler serbest radikalleri etkisiz hâle getirerek lipid peroksidasyonunu sınırlandırabilmektedir. Karanfil, kekik ve nane uçucu yağları ile sinnamaldehit uygulamalarının antioksidan kapasiteyi ve fenolik bileşikleri korurken malondialdehit (MDA) birikimini azalttığı bildirilmiştir (Jiang ve ark., 2015; Qu ve ark., 2020). Böylece uçucu yağlar, antioksidan savunmayı destekleyerek membran

bütünlüğünün korunmasına ve yaşlanmanın geciktirilmesine katkı sağlamaktadır.

Antioksidan Savunma Sisteminin Düzenlenmesi: Hasat sonrası dönemde süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT), askorbat peroksidaz (APX), peroksidaz (POD) ve glutatyon redüktaz (GR) gibi antioksidan enzimler ROS birikiminin sınırlandırılması ve hücresel redoks dengesinin korunmasında önemli rol oynamaktadır. SOD, süperoksit anyonunu hidrojen peroksite (H_2O_2) dönüştürürken CAT ve APX oluşan H_2O_2'nin uzaklaştırılmasına, GR ise hücresel redoks dengesinin korunmasına katkı sağlamaktadır. Uçucu yağlar ve sinnamaldehit uygulamalarının farklı mantar türlerinde SOD, CAT, APX ve GR aktivitelerini koruyarak veya artırarak antioksidan savunmayı desteklediği bildirilmektedir (Jiang ve ark., 2015; Karimirad ve ark., 2018; Valizadeh ve ark., 2021; Liufang ve ark., 2024). POD, H_2O_2'nin uzaklaştırılmasına katkı sağlarken fenolik bileşiklerin oksidasyonu yoluyla esmerleşmeye de katılabilmektedir. Bu nedenle POD aktivitesindeki değişimler tek başına olumlu veya olumsuz olarak değerlendirilmemelidir. Genel olarak uçucu yağlar, antioksidan enzim sistemini düzenleyerek oksidatif stresin sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır.

Esmerleşmenin Kontrolü: Enzimatik esmerleşme, özellikle *A. bisporus*'ta raf ömrünü ve pazarlanabilirliği sınırlayan önemli kalite sorunlarından biridir. Hücre bütünlüğünün bozulmasıyla fenolik bileşiklerin PPO ile teması artmakta ve kahverengi pigmentler oluşmaktadır. Uçucu yağlar ve aktif bileşenleri, esmerleşmeyle ilişkili enzim aktivitelerini ve fenolik metabolizmayı düzenleyerek bu süreci yavaşlatabilmektedir. *A. bisporus*'ta karanfil, kekik ve nane uçucu yağları ile sinnamaldehit uygulamalarının PPO ve POD aktivitelerini sınırlandırırken fenilalanin amonyak liyaz

(PAL) aktivitesini destekleyerek fenolik bileşiklerin korunmasına ve esmerleşmenin azaltılmasına katkı sağladığı bildirilmiştir (Gao ve ark., 2014; Qu ve ark., 2020). Böylece uçucu yağlar, enzimatik aktivitenin düzenlenmesi ve hücre bütünlüğünün korunması yoluyla esmerleşmeyi geciktirebilmektedir.

Hücre Zarı Bütünlüğünün Korunması: Hasat sonrası dönemde artan ROS, membran lipidlerinde peroksidasyona yol açarak hücre zarı geçirgenliğini artırmakta ve yaşlanmayı hızlandırmaktadır. MDA, lipid peroksidasyonunun; elektrolit sızıntısı ve elektriksel iletkenlik ise membran bütünlüğündeki bozulmanın önemli göstergeleridir. Bu nedenle düşük MDA düzeyi ve düşük elektrolit sızıntısı, hücre zarı bütünlüğünün daha iyi korunduğunu göstermektedir. *A. bisporus*'ta oregano, nane ve okaliptüs uçucu yağı uygulamalarının MDA birikimini ve membran geçirgenliğini azaltarak hücre zarı bütünlüğünün korunmasına katkı sağladığı bildirilmiştir (Qu ve ark., 2020; Yan ve ark., 2023; Han ve ark., 2024). Böylece uçucu yağlar, lipid peroksidasyonunu sınırlandırarak kalite kayıplarının geciktirilmesine katkı sağlayabilmektedir.

Solunum ve Enerji Metabolizmasının Düzenlenmesi: Yenilebilir mantarlarda yüksek solunum hızı, rezerv maddelerin hızlı tüketilmesine ve yaşlanmanın hızlanmasına neden olmaktadır. Bu nedenle solunum hızının azaltılması, hasat sonrası kalitenin korunmasında önemlidir. *A. bisporus*'ta okaliptüs, oregano ve kajuput uçucu yağı içeren uygulamaların solunumu azaltarak metabolik kayıpların sınırlandırılmasına katkı sağladığı bildirilmiştir (Chaudhari ve ark., 2023; Yan ve ark., 2023; Han ve ark., 2024). Solunumun azalması, rezerv tüketimini ve yaşlanmayı yavaşlatabilir. Bununla birlikte özellikle kaplama ve aktif ambalaj

sistemlerinde bu etki; uçucu yağın yanı sıra gaz geçirgenliği, mikroatmosfer oluşumu ve kontrollü salımdan da kaynaklanabilmektedir. Uçucu yağların mitokondri ve enerji metabolizması üzerindeki doğrudan etkilerine ilişkin bilgiler ise henüz sınırlıdır (Guo ve ark., 2023).

Mikrobiyal Popülasyonların Baskılanması: Uçucu yağlar, bakteri, maya ve küf gibi bozulma etmenlerinin gelişimini sınırlandırarak mikrobiyal kaynaklı kalite kayıplarının azaltılmasına ve raf ömrünün uzatılmasına katkı sağlayabilmektedir. Farklı çalışmalarda, uçucu yağların yenilebilir mantarlarda bozulmaya neden olan mikroorganizmaların gelişimini baskıladığı bildirilmiştir (Gao ve ark., 2014; Adhikari ve Jha, 2023; Han ve ark., 2024). Antimikrobiyal etkinlik; uçucu yağın bileşimi ve konsantrasyonu, mikroorganizma türü, uygulama yöntemi ve depolama koşullarına bağlıdır. Enkapsülasyon, yenilebilir kaplama ve aktif ambalajlama gibi kontrollü salım sistemleri bu etkinliğin daha uzun süre korunmasına yardımcı olabilmektedir. Bu nedenle uygun uçucu yağ, doz ve uygulama yönteminin birlikte belirlenmesi önemlidir.

Uçucu Yağların Hasat Sonrası Kalite Üzerine Etkileri

Uçucu yağlar, antimikrobiyal etkilerinin yanı sıra yenilebilir mantarlarda fizyolojik ve biyokimyasal kalite kayıplarını da yavaşlatabilmektedir. Uygun doz ve uygulama yöntemleriyle kullanıldıklarında ağırlık kaybı ve solunumu azaltmakta, renk ve tekstürü korumakta, besin kayıpları ile oksidatif stresi sınırlandırmakta ve antioksidan savunmayı desteklemektedir. Böylece esmerleşme, yumuşama ve yaşlanmanın geciktirilmesine katkı sağlamaktadır (Guo ve ark., 2023; Liufang ve ark., 2024).

Ağırlık Kaybı, Su İçeriği ve Solunum Hızı: Yenilebilir mantarların yüksek su içeriği ve gelişmiş bir kütikula tabakasının bulunmaması, depolama sırasında hızlı ağırlık kaybına neden olmaktadır. Uçucu yağların özellikle kaplama ve aktif ambalaj sistemlerinde kullanılması, su ve gaz transferini sınırlandırarak ağırlık kaybı ve solunum hızını azaltabilmektedir. Nitekim *A. bisporus*'ta uçucu yağ uygulamalarının bu kayıpları azalttığı bildirilmiştir (Yan ve ark., 2023; Han ve ark., 2024). Bu etki, uçucu yağların metabolik aktiviteyi yavaşlatmasının yanı sıra kaplama veya ambalajın bariyer özelliğiyle de ilişkilidir.

Renk ve Esmerleşme: Renk, özellikle beyaz şapkalı *A. bisporus*'ta tüketici kabulü ve pazarlanabilirlik açısından önemli bir kalite özelliğidir. Depolama sırasında PPO ve POD aktivitelerinin artması fenolik bileşiklerin oksidasyonunu hızlandırarak esmerleşmeye yol açmaktadır. Uçucu yağ uygulamalarının bu enzimlerin aktivitelerini sınırlandırarak esmerleşmeyi geciktirdiği ve renk kalitesinin korunmasına katkı sağladığı bildirilmektedir (Gao ve ark., 2014; Echegoyen ve Nerín, 2015; Qu ve ark., 2020; Yan ve ark., 2023; Song ve ark., 2024). Bununla birlikte yüksek konsantrasyonlar hücre zarına zarar verebileceğinden renk korunumu açısından optimum dozun belirlenmesi önemlidir.

Sertlik ve Tekstür: Mantar dokusundaki yumuşama; su kaybı, hücre duvarı ve zar bütünlüğünün bozulması ve mikrobiyal gelişmeyle ilişkilidir. Uçucu yağ uygulamalarının bu süreçleri yavaşlatarak tekstürün korunmasına katkı sağladığı bildirilmektedir. Nitekim *A. bisporus*'ta uçucu yağ içeren yavaş salınımlı ambalajlar ve diğer uçucu yağ uygulamalarının sertliği kontrol grubuna göre daha iyi koruduğu belirlenmiştir (Yan ve ark., 2023; Han ve ark., 2024). Bu etki, uçucu yağın biyolojik aktivitesi ile ambalajın nem

kaybını sınırlandırıcı etkisinin birlikte rol oynamasıyla ilişkilendirilmektedir.

Besin Bileşenlerinin Korunması: Depolama sırasında yüksek solunum ve metabolik aktivite, protein, şeker, vitamin ve fenolik bileşiklerde kayıplara neden olabilmektedir. Uçucu yağ uygulamaları solunum ve oksidatif bozulmayı sınırlandırarak bu bileşenlerin korunmasına katkı sağlayabilmektedir. Nane, oregano, sinnamaldehit, rezene ve ladin uygulamalarının; çözünebilir protein ve şekerler, fenolik bileşikler, askorbik asit, ergosterol ve D_2 vitamini gibi besinsel ve biyoaktif bileşenlerin korunmasını desteklediği bildirilmiştir (Qu ve ark., 2020; Yan ve ark., 2023; Grzyb ve ark., 2025).

Antioksidan Sistem ve Oksidatif Stres: Hasat sonrası dönemde ROS birikimi, lipid peroksidasyonu ve membran hasarını artırarak yaşlanmayı hızlandırmaktadır. Uçucu yağlar doğrudan antioksidan etki göstermenin yanı sıra endojen antioksidan savunmayı da destekleyebilmektedir. Nane, karanfil, kekik ve oregano uçucu yağlarının *A. bisporus* ve *L. edodes*'te antioksidan enzim aktivitelerini desteklediği; PPO ve POD aktiviteleri, MDA birikimi ve elektrolit sızıntısını azaltarak oksidatif hasarı sınırlandırdığı bildirilmiştir (Gao ve ark., 2014; Jiang ve ark., 2015; Qu ve ark., 2020; Yan ve ark., 2023).

Mikrobiyolojik Kalite: Uçucu yağların mantar muhafazasındaki önemli avantajlarından biri bakteri ve funguslara karşı antimikrobiyal etki göstermeleridir. Terpenler, fenoller ve aldehitler gibi bileşenler mikrobiyal hücre zarını bozarak hücresel içerik kaybına ve metabolik faaliyetlerin baskılanmasına neden olabilmektedir. Farklı uçucu yağların *A. bisporus* ve diğer yenilebilir mantarlarda mikrobiyal gelişimi azalttığı bildirilmiştir (Gao ve ark.,

2014; Wang ve ark., 2021; Zhu ve ark., 2022; Han ve ark., 2024). Bununla birlikte etkinlik, uçucu yağın kimyasal bileşimine ve hedef mikroorganizmaya bağlı olarak değişmektedir.

Duyusal Kalite ve Tüketici Kabulü: Uçucu yağların ticari kullanımında mantarın doğal tat ve aromasının korunması önemlidir. Uygun konsantrasyonlarda uygulanan uçucu yağların duyusal kalite ve genel kabul edilebilirliğin korunmasına katkı sağladığı bildirilmiştir (Gao ve ark., 2014; Yan ve ark., 2023). Ancak yüksek konsantrasyonlar doğal tat ve kokuyu olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle fumigasyon, nanoenkapsülasyon ve kontrollü salımlı aktif ambalajlama gibi yöntemler, daha düşük dozlarda yeterli koruyucu etkinlik sağlaması açısından avantajlıdır.

Farklı Yenilebilir Mantar Türlerinde Uçucu Yağ Uygulamaları

Yenilebilir mantarların hasat sonrası muhafazasında uçucu yağların kullanımına ilişkin güncel çalışmalar Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. *Yenilebilir mantarların hasat sonrası muhafazasında uçucu yağ uygulamalarına ilişkin çalışmalar*

Mantar türü	**Uçucu yağ**	**Depolama süresi**	**Depolama sıcaklığı**	**Muhafaza etkisi**	**Kaynak**
Agaricus bisporus	Karanfil ve kekik uçucu yağları	16 gün	4 ± 1 °C	Esmerleşme, şapka açılması ve mikrobiyal gelişimin azaltılması; fenolik bileşikler ve askorbik asidin korunması, PPO/POD aktivitelerinin baskılanması ve sertliğin korunması.	Gao ve ark. (2014)
Lentinula edodes	Karanfil ve kekik uçucu yağları	20 gün	4 °C	Duyusal bozulmanın geciktirilmesi, antioksidan kapasite ile CAT, SOD, APX ve GR aktivitelerinin artırılması; fenolik ve flavonoid bileşiklerin korunması.	Jiang ve ark. (2015)
Agaricus bisporus	Kimyon uçucu yağı	20 gün	4 °C	Enzim aktivitesinin düzenlenmesi, yüksek antioksidan aktivitenin korunması, askorbik asit kaybının sınırlandırılması, CAT ve GR aktivitelerinin desteklenmesi.	Karimirad ve ark. (2018)

Mantar türü	**Uçucu yağ**	**Depolama süresi**	**Depolama sıcaklığı**	**Muhafaza etkisi**	**Kaynak**
Agaricus bisporus	*Satureja khuzistanica* uçucu yağı	16 gün	4 ± 1 °C	Yaşlanma, solunum, ağırlık kaybı, esmerleşme ve mikrobiyal gelişmenin azaltılması; sertlik, fenolik maddeler, askorbik asit ve antioksidan aktivitenin korunması.	Nasiri ve ark. (2018)
Agaricus bisporus (cv. Sylvan A15)	Kimyon uçucu yağı	20 gün	4 °C	Mikrobiyal gelişimin baskılanması; görünüm ve tekstürün korunması, antioksidan savunmanın desteklenmesi ve PPO aktivitesinin azaltılması.	Karimirad ve ark. (2019)
Agaricus bisporus	Tarçın uçucu yağı	7 gün	4 °C	*Mucor* sp.'ye karşı antifungal aktivitenin iyileştirilmesi.	Zhang ve ark. (2019)
Pholiota nameko	Kekik uçucu yağı	9 gün	20 °C	Ağırlık kaybı, şapka açılması, esmerleşme ve MDA birikiminin azaltılması; askorbik asit, çözünebilir şeker ve protein düzeylerinin korunması, mikrobiyal gelişimin sınırlandırılması.	Zhu ve ark. (2019)
Agaricus bisporus (cv. Sylvan A15)	Acı portakal (*Citrus aurantium*) uçucu yağı	20 gün	4 °C	İncelenen mikroorganizmaların gelişiminin baskılanması ve antioksidan enzim aktivitelerinin korunması.	Karimirad ve ark. (2020)
Agaricus bisporus	Tarçın uçucu yağı	6 gün	20 ± 3 °C	Hücre duvarı bozulması ve solunumun yavaşlatılması; sertlik, görünüm ve duyusal özelliklerin korunması.	Niu ve ark. (2020)
Agaricus bisporus	Nane uçucu yağı	8 gün	4 °C	Esmerleşme, ağırlık kaybı ve oksidatif hasarın azaltılması; besin bileşenlerinin korunması ve antioksidan savunmanın desteklenmesi.	Qu ve ark. (2020)
Agaricus bisporus (cv. Blanchocamp BL-40)	Bergamot ve greyfurt uçucu yağları	14 gün	4 °C	PPO ve PAL aktiviteleri ile *Pseudomonas* spp. gelişiminin baskılanması; yaşlanmanın geciktirilmesi, renk, görünüm ve genel kalitenin korunması.	López-Gómez ve ark. (2021)
Agaricus bisporus	Oregano uçucu yağı	4 gün	Belirtilmemiş	Antioksidan kapasitenin artırılması ve antifungal aktivitenin iyileştirilmesi.	Lu ve ark. (2021)
Agaricus bisporus	Tarçın uçucu yağı	4 gün	4 °C	Ağırlık kaybının azaltılması, APX ve GR aktivitelerinin korunması, yaşlanma ve kalite kaybının geciktirilmesi.	Shao ve ark. (2021)
Agaricus bisporus	Zerdeçal uçucu yağı	20 gün	4 °C	Renk değişimi ve mikrobiyal gelişimin azaltılması; sertlik, SOD/CAT aktiviteleri, toplam fenolik madde ve askorbik asit düzeylerinin korunması, PPO aktivitesinin baskılanması.	Valizadeh ve ark. (2021)

Mantar türü	Uçucu yağ	Depolama süresi	Depolama sıcaklığı	Muhafaza etkisi	Kaynak
Agaricus bisporus	Limon uçucu yağı	12 gün	4 °C	Solunum hızı ve esmerleşmenin azaltılması; sertlik ve antioksidan kapasitenin korunması, PPO/POD aktiviteleri ile bakteriyel gelişimin baskılanması, yaşlanma ve kalite kaybının geciktirilmesi.	Wang ve ark. (2021)
Agaricus bisporus	Okaliptüs yaprağı uçucu yağı	12 gün	Belirtilmemiş	Solunum hızının azaltılması, organik madde tüketiminin yavaşlatılması, nem içeriğinin korunması ve raf ömrünün uzatılması.	Chen ve ark. (2022)
Volvariella volvacea	Karanfil ve nane uçucu yağları	4 gün	16 ± 1 °C	Antioksidan kapasite ve sertliğin artırılması, PPO aktivitesi ve bakteri sayısının azaltılması, hücre bütünlüğünün korunması.	Gui ve ark. (2022)
Agaricus bisporus	Karanfil uçucu yağı	12 gün	4 °C	Ağırlık kaybının azaltılması; toplam fenolik madde ve askorbik asidin korunması, antioksidan sistemin desteklenmesi ve PPO/POD aktivitelerinin baskılanması.	Zhu ve ark. (2022)
Agaricus bisporus	Kajuput (*Melaleuca cajuputi*) uçucu yağı	7 gün	4 ± 1 °C	Ağırlık kaybı ve solunum hızının azaltılması, esmerleşmenin geciktirilmesi, sertlik ve antioksidan aktivitenin korunması.	Chaudhari ve ark. (2023)
Agaricus bisporus	Oregano uçucu yağı	12 gün	4 ± 1 °C	Ağırlık kaybı, solunum hızı, hücresel sızıntı, PPO/POD aktiviteleri, MDA ve mikrobiyal yükün azaltılması; sertlik, besin bileşenleri ve duyusal kalitenin korunması.	Yan ve ark. (2023)
Agaricus bisporus	Tarçın uçucu yağı	15 gün	4 ± 0.5 °C	Ağırlık ve sertlik kaybı ile şapka açılmasının sınırlandırılması; besin kayıpları ve yaşlanmanın azaltılması, PPO/POD aktivitelerindeki değişimlerin yavaşlatılması.	Golmohammadi ve ark. (2024)
Agaricus bisporus	Çay ağacı uçucu yağı	7 gün	Belirtilmemiş	Ağırlık kaybı, çürüme ve esmerleşmenin azaltılması; sertlik ve tekstürün korunması.	Ali ve ark. (2025)
Agaricus bisporus, *Boletus edulis*, *Imleria badia*	Rezene ve ladin uçucu yağları	4 gün	19 °C	Besin kayıplarının yavaşlatılması; C vitamini, ergosterol/vitamin D_2 ve doymamış yağ asitlerinin korunması, polisakkarit ve lipid parçalanmasının sınırlandırılması.	Grzyb ve ark. (2025)
Agaricus bisporus, *Boletus edulis*, *Imleria badia*	Rezene ve ladin uçucu yağları	4 gün	19 °C	Ağırlık kaybı ve çürümenin azaltılması, aroma bileşiklerinin korunması, kalite kaybının yavaşlatılması.	Grzyb ve ark. (2026)

Uçucu Yağ Uygulamalarının Avantajları, Sınırlılıkları ve Ticari Uygulanabilirliği

Uçucu yağlar, yenilebilir mantarlarda hasat sonrası kalite kayıplarını azaltma ve raf ömrünü uzatma açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Ancak laboratuvar bulgularının ticari uygulamaya aktarımı; yüksek uçuculuk, düşük su çözünürlüğü, kimyasal bileşimdeki değişkenlik, duyusal etkiler, uygun doz, maliyet ve mevzuat gibi faktörlerle sınırlanabilmektedir. Bu nedenle ticari kullanım potansiyeli; etkinlik, uygulanabilirlik, duyusal kabul, maliyet ve gıda güvenliği birlikte değerlendirilerek ele alınmalıdır (Guo ve ark., 2023; Liufang ve ark., 2024).

Başlıca Avantajları: Uçucu yağların yenilebilir mantarların hasat sonrası muhafazasındaki temel avantajları; doğal kaynaklı olmaları, antimikrobiyal ve antioksidan etkileri birlikte gösterebilmeleri ve sentetik koruyuculara alternatif oluşturmalarıdır. Uygun konsantrasyonlarda kalite kayıplarını yavaşlatarak raf ömrünün uzatılmasına katkı sağlayabilmektedirler (Guo ve ark., 2023; Liufang ve ark., 2024). Fumigasyon, yüzey uygulaması, yenilebilir kaplama, aktif ambalaj, nanoemülsiyon ve mikro/nanoenkapsülasyon gibi farklı sistemlere uyarlanabilmeleri kullanım olanaklarını artırmaktadır. Özellikle kontrollü salım sistemleri, uçucu bileşiklerin hızlı kaybını azaltarak daha düşük dozlarda ve daha uzun süreli etkinlik sağlayabilmektedir (Yan ve ark., 2023; Song ve ark., 2024). Uçucu yağların biyobozunur ve yenilebilir ambalajlarla bütünleştirilebilmesi de sürdürülebilir muhafaza açısından önemli olup sentetik koruyucu kullanımının azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir (Devi ve ark., 2024).

Uygulamayı Sınırlayan Faktörler: Uçucu yağların kullanımını sınırlayan başlıca özellikler yüksek uçuculuk, düşük

stabilite ve suda düşük çözünürlüktür. Depolama sırasında uçucu bileşikler hızla kaybolabilmekte; ışık, sıcaklık ve oksijen aktif bileşenlerin parçalanmasına veya oksidasyonuna yol açarak koruyucu etkinliği azaltabilmektedir. Hidrofobik yapıları da sulu sistemlerde homojen dağılımı güçleştirmektedir (Guo ve ark., 2023; Liufang ve ark., 2024). Güçlü aroma ve tat özellikleri de önemli bir sınırlılıktır. Yüksek konsantrasyonlar duyusal kabulü azaltabilmekte, bazı durumlarda doku hasarı ve esmerleşmeyi artırabilmektedir. Nitekim Zhu ve ark. (2026), taze kesilmiş *A. bisporus*'ta yüksek konsantrasyondaki kekik uçucu yağı emülsiyonunun esmerleşmeyi hızlandırabildiğini bildirmiştir. Bu nedenle koruyucu etkinlik ile ürün kalitesi arasında uygun doz dengesinin kurulması gerekmektedir. Uçucu yağların etkinliği mantar türü, ürünün bütün veya kesilmiş olması, depolama sıcaklığı, uygulama yöntemi ve hedeflenen raf ömrüne göre değişebilmektedir. Ayrıca kimyasal bileşim genotip, coğrafi köken, yetiştirme koşulları, hasat zamanı ve ekstraksiyon yöntemine bağlı olarak farklılık gösterebilir. Bu durum standardizasyonu ve tekrarlanabilirliği güçleştirdiğinden, ticari kullanımda kimyasal bileşimin tanımlanması, uygun dozun ürüne özgü belirlenmesi ve uygulama koşullarının standartlaştırılması önemlidir (Guo ve ark., 2023; Liufang ve ark., 2024).

Ticari Ölçeğe Aktarım, Standardizasyon ve Gıda Güvenliği: Uçucu yağ uygulamalarının laboratuvar ölçeğinden ticari kullanıma aktarılabilmesi, etkinliğin büyük miktardaki üründe ve değişken depolama koşullarında da sürdürülebilmesini gerektirir. Ancak sıcaklık ve nem dalgalanmaları, homojen uygulamanın güçlüğü ve etkili konsantrasyonun depolama boyunca korunması önemli teknik sınırlılıklar oluşturmaktadır (Liufang ve ark., 2024). Ticari kullanımda standardizasyon da önemlidir. Uçucu yağların

kimyasal bileşimi bitki kaynağı, yetiştirme koşulları, hasat zamanı ve ekstraksiyon yöntemine göre değişebildiğinden, botanik kaynağın ve başlıca aktif bileşenlerin tanımlanması ile uygulama dozu ve yönteminin standartlaştırılması gerekmektedir. Maliyet de ticari uygulanabilirliği belirleyen temel faktörlerden biridir. Nanoenkapsülasyon, kontrollü salım ve aktif ambalajlama sistemleri etkinliği artırabilmekle birlikte ek üretim maliyeti oluşturmaktadır. Bu nedenle raf ömründeki uzamanın ekonomik açıdan uygulama maliyetini karşılaması önemlidir (Guo ve ark., 2023; Liufang ve ark., 2024). Gıda güvenliği ve tüketici kabulü de ticari uygulamada dikkate alınmalıdır. Uçucu yağın saflığı, uygulama miktarı, olası kalıntılar ve nanotaşıyıcı veya aktif ambalaj sistemlerinin gıdayla temas güvenliği değerlendirilmelidir. Ayrıca mevzuat gereklilikleri ülke ve kullanım şekline göre değişebilmektedir. Bu nedenle ticari uygulanabilirlik; koruyucu etkinlik, güvenlik, mevzuata uygunluk, maliyet ve tüketici kabulü birlikte değerlendirilerek ele alınmalıdır (Jackson-Davis ve ark., 2023; Tsitlakidou ve ark., 2023).

Gelecek Perspektifleri

Uçucu yağların yenilebilir mantarların muhafazasında daha yaygın kullanılabilmesi için gelecekteki çalışmaların, stabiliteyi artıran ve daha düşük dozlarda uzun süreli etki sağlayan sistemlere yönelmesi gerekmektedir. Bu açıdan nano/mikroenkapsülasyon, nanoemülsiyonlar ve kontrollü salım sistemleri önemli bir potansiyele sahiptir. Uçucu yağların biyobozunur aktif filmler, yenilebilir kaplamalar ve akıllı ambalaj sistemleriyle bütünleştirilmesi de sürdürülebilir muhafaza açısından gelecek vadeden yaklaşımlar arasındadır (Guo ve ark., 2023; Liufang ve ark., 2024).

Gelecekte ayrıca uçucu yağların soğuk muhafaza, kitosan esaslı kaplamalar ve diğer doğal koruyucularla birlikte kullanıldığı kombine uygulamaların geliştirilmesi önem taşımaktadır. Farklı mantar türleri için uygun doz, uygulama yöntemi ve formülasyonların belirlenmesinin yanı sıra, moleküler etki mekanizmalarının açıklanmasında transkriptomik, proteomik ve metabolomik gibi omik yaklaşımlardan yararlanılabilir.

Yeni sistemlerin yalnızca laboratuvar koşullarındaki etkinliği değil; duyusal kalite, tüketici kabulü, güvenlik, maliyet, standardizasyon ve ticari ölçekte uygulanabilirlik açısından da değerlendirilmesi gerekmektedir.

Sonuç ve Öneriler

Uçucu yağlar, antimikrobiyal ve antioksidan özellikleri sayesinde yenilebilir mantarlarda hasat sonrası kalite kayıplarının azaltılması ve raf ömrünün uzatılması açısından önemli bir doğal koruyucu potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte etkinlik; uçucu yağın türü ve kimyasal bileşimi, uygulama dozu ve yöntemi, mantar türü ve depolama koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Yüksek konsantrasyonlarda duyusal kalite ve doku üzerinde olumsuz etkiler ortaya çıkabilmesi, uygun doz ve uygulama koşullarının belirlenmesini gerekli kılmaktadır.

Sonuç olarak uçucu yağların, soğuk depolama ve uygun ambalajlama gibi mevcut muhafaza yöntemlerini tamamlayıcı bir yaklaşım olarak değerlendirilmesi daha uygun görünmektedir. Etkinlik, güvenlik ve ürün kalitesi birlikte dikkate alınarak geliştirilecek standartlaştırılmış uygulamalar, uçucu yağların yenilebilir mantarların hasat sonrası muhafazasında daha yaygın kullanılmasına katkı sağlayabilir.

Kaynakça

Adhikari, H. S., & Jha, S. K. (2023). Postharvest mycobial contaminants of white button mushroom (*Agaricus bisporus*) and their management using plant essential oils. *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences, 7*(3), 500–507. https://doi.org/10.31015/jaefs.2023.3.4

Ali, L. M., Shams-Eldin, E., Abdou, E. S., & Kamel, R. M. (2025). Sustainable *Agaricus bisporus* preservation: A novel approach using biopolymeric nanoparticle-stabilized essential oil coatings. *Food Bioscience, 71*, 106921. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106921

Cao, Y., Wu, L., Xia, Q., Yi, K., & Li, Y. (2024). Novel post-harvest preservation techniques for edible fungi: A review. *Foods, 13*(10), 1554. https://doi.org/10.3390/foods13101554

Chaudhari, A. K., Das, S., Singh, B. K., & Dubey, N. K. (2023). Green facile synthesis of cajuput (*Melaleuca cajuputi* Powell.) essential oil loaded chitosan film and evaluation of its effectiveness on shelf-life extension of white button mushroom. *Food Chemistry, 401*, 134114. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134114

Chen, M., Yan, X., Cheng, M., Zhao, P., Wang, Y., Zhang, R., Wang, X., Wang, J., & Chen, M. (2022). Preparation, characterization and application of poly (lactic acid)/corn starch/eucalyptus leaf essential oil microencapsulated active bilayer degradable film. *International Journal of Biological Macromolecules, 195*, 264–273. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.023

Devi, L. S., Das, B., Dutta, D., & Kumar, S. (2024). Essential oils as functional agents in biopolymer-based sustainable food packaging system: A review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy, 39*, 101563. https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101563

Echegoyen, Y., & Nerín, C. (2015). Performance of an active paper based on cinnamon essential oil in mushrooms quality. *Food Chemistry, 170*, 30–36. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.032

Falleh, H. (2025). Demystifying the power of essential oils: A review of their antibacterial properties and potential as natural food preservatives. *EXCLI Journal, 24*, 828–850. https://doi.org/10.17179/excli2025-8439

Gao, M., Feng, L., & Jiang, T. (2014). Browning inhibition and quality preservation of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by essential oils fumigation treatment. *Food Chemistry, 149*, 107–113. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.073

Golmohammadi, A., Tahmasebi, M., Razavi, M. S., Neysari-Fam, V., Carullo, D., & Farris, S. (2024). Improved post-harvest preservation effects of mushroom (*Agaricus bisporus*) using bacterial cellulose nanocrystals-gelatin/cinnamon essential oil emulsion coatings. *International Journal of Food Science & Technology, 59*(10), 7528–7540. https://doi.org/10.1111/ijfs.17518

Grzyb, M., Szymczak, K., & Bonikowski, R. (2025). Essential oil fumigation modulates nutrient content in selected mushrooms during postharvest storage. *International Journal of Molecular Sciences, 26*(9), 3939. https://doi.org/10.3390/ijms26093939

Grzyb, M., Szymczak, K., Kunicka-Styczyńska, A., & Bonikowski, R. (2026). Multi-criteria selection and postharvest evaluation of essential oil fumigation in cultivated and wild mushrooms. *LWT, 254*, 119728. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2026.119728

Gui, H., Zhao, M., Zhang, S., Yin, R., Hu, C., Fan, M., & Li, L. (2022). Active antioxidant packaging from essential oils incorporated polylactic acid/poly(butylene adipate-co-terephthalate)/thermoplastic starch for preserving straw

mushroom. *Foods, 11*(15), 2252. https://doi.org/10.3390/foods11152252

Guo, Y., Chen, X., Gong, P., Wang, R., Han, A., Deng, Z., Qi, Z., Long, H., Wang, J., Yao, W., Yang, W., Wang, J., & Li, N. (2023). Advances in the role and mechanisms of essential oils and plant extracts as natural preservatives to extend the postharvest shelf life of edible mushrooms. *Foods, 12*(4), 801. https://doi.org/10.3390/foods12040801

Han, J., Jiang, X., Feng, L., Wang, J., Wang, X., Zhou, Q., Kitazawa, H., Guo, Y., & Li, L. (2024). Identification of *Trichderma harzianum* in postharvest *Agaricus bisporus* and a novel control approach using eucalyptus essential oil emulsion. *Scientia Horticulturae, 329*, 113029. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113029

Jackson-Davis, A., White, S., Kassama, L. S., Coleman, S., Shaw, A., Mendonça, A. F., Cooper, B., Thomas-Popo, E., Gordon, K., & London, L. (2023). A review of regulatory standards and advances in essential oils as antimicrobials in foods. *Journal of Food Protection, 86*(2), 100025. https://doi.org/10.1016/j.jfp.2022.100025

Jiang, T., Luo, Z., & Ying, T. (2015). Fumigation with essential oils improves sensory quality and enhanced antioxidant ability of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*). *Food Chemistry, 172*, 692–698. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.130

Karimirad, R., Behnamian, M., & Dezhsetan, S. (2018). Development and characterization of nano biopolymer containing cumin oil as a new approach to enhance antioxidant properties of button mushroom. *International Journal of Biological Macromolecules, 113*, 662–668. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.02.043

Karimirad, R., Behnamian, M., & Dezhsetan, S. (2019). Application of chitosan nanoparticles containing *Cuminum cyminum* oil as a delivery system for shelf life extension of *Agaricus*

bisporus. *LWT, 106*, 218–228. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.02.062

Karimirad, R., Behnamian, M., & Dezhsetan, S. (2020). Bitter orange oil incorporated into chitosan nanoparticles: Preparation, characterization and their potential application on antioxidant and antimicrobial characteristics of white button mushroom. *Food Hydrocolloids, 100*, 105387. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105387

Liufang, Y., Wu, Y., Zhou, H., Qu, H., & Yang, H. (2024). Recent advances in the application of natural products for postharvest edible mushroom quality preservation. *Foods, 13*(15), 2378. https://doi.org/10.3390/foods13152378

López-Gómez, A., Ros-Chumillas, M., Navarro-Martínez, A., Barón, M., Navarro-Segura, L., Taboada-Rodríguez, A., Marín-Iniesta, F., & Martínez-Hernández, G. B. (2021). Packaging of fresh sliced mushrooms with essential oils vapours: A new technology for maintaining quality and extending shelf life. *Foods, 10*(6), 1196. https://doi.org/10.3390/foods10061196

Louis, E., Villalobos-Carvajal, R., Reyes-Parra, J., Jara-Quijada, E., Ruiz, C., Andrades, P., Gacitúa, J., & Beldarraín-Iznaga, T. (2021). Preservation of mushrooms (*Agaricus bisporus*) by an alginate-based-coating containing a cinnamaldehyde essential oil nanoemulsion. *Food Packaging and Shelf Life, 28*, 100662. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100662

Lu, W., Chen, M., Cheng, M., Yan, X., Zhang, R., Kong, R., Wang, J., & Wang, X. (2021). Development of antioxidant and antimicrobial bioactive films based on oregano essential oil/mesoporous nano-silica/sodium alginate. *Food Packaging and Shelf Life, 29*, 100691. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100691

Nasiri, M., Barzegar, M., Sahari, M. A., & Niakousari, M. (2018). Application of Tragacanth gum impregnated with *Satureja khuzistanica* essential oil as a natural coating for

enhancement of postharvest quality and shelf life of button mushroom (*Agaricus bisporus*). *International Journal of Biological Macromolecules, 106*, 218–226. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.08.003

Niu, B., Zhan, L., Shao, P., Xiang, N., Sun, P., Chen, H., & Gao, H. (2020). Electrospinning of zein-ethyl cellulose hybrid nanofibers with improved water resistance for food preservation. *International Journal of Biological Macromolecules, 142*, 592–599. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.09.134

Pan, J., Ai, F., Shao, P., Chen, H., & Gao, H. (2019). Development of polyvinyl alcohol/β-cyclodextrin antimicrobial nanofibers for fresh mushroom packaging. *Food Chemistry, 300*, 125249. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125249

Qu, T., Li, B., Huang, X., Li, X., Ding, Y., Chen, J., & Tang, X. (2020). Effect of peppermint oil on the storage quality of white button mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Food and Bioprocess Technology, 13*(3), 404–418. https://doi.org/10.1007/s11947-019-02385-w

Shao, P., Yu, J., Chen, H. J., & Gao, H. Y. (2021). Development of microcapsule bioactive paper loaded with cinnamon essential oil to improve the quality of edible fungi. *Food Packaging and Shelf Life, 27*, 100617. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100617

Silva, M., Ramos, A. C., Lidon, F. J., Reboredo, F. H., & Gonçalves, E. M. (2024). Pre- and postharvest strategies for *Pleurotus ostreatus* mushroom in a circular economy approach. *Foods, 13*(10), 1464. https://doi.org/10.3390/foods13101464

Song, L., Chen, X., Luan, X., Feng, Y., Zhan, S., Han, X., Zhang, L., Zhang, R., & Liu, Z. (2025). Physiological and Astral-DIA relative quantitative proteomics analysis reveals the anti-browning mechanism of cinnamon essential oil on postharvest *Agaricus bisporus* infected with *Pseudomonas*

tolaasii. *Postharvest Biology and Technology, 228*, 113648. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2025.113648

Song, L., Hou, F., Yi, F., Zhan, S., Chen, X., Han, X., Zhang, R., & Liu, Z. (2024). Sustained-release film prepared by incorporation of cinnamon essential oil: Physicochemical properties and application in the preservation of mushroom (*Agaricus bisporus*). *Journal of Stored Products Research, 105*, 102253. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102253

Tsitlakidou, P., Tasopoulos, N., Chatzopoulou, P., & Mourtzinos, I. (2023). Current status, technology, regulation and future perspectives of essential oils usage in the food and drink industry. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 103*(14), 6727–6751. https://doi.org/10.1002/jsfa.12695

Valizadeh, M., Behnamian, M., Dezhsetan, S., & Karimirad, R. (2021). Controlled release of turmeric oil from chitosan nanoparticles extends shelf life of *Agaricus bisporus* and preserves its postharvest quality. *Food Bioscience, 44*, 101401. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101401

Wang, X., Sun, Y., Liu, Z., Huang, X., Yi, F., Hou, F., & Zhang, F. (2021). Preparation and characterization of chitosan/zein film loaded with lemon essential oil: Effects on postharvest quality of mushroom (*Agaricus bisporus*). *International Journal of Biological Macromolecules, 192*, 635–643. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.068

Xia, R., Hou, Z., Xu, H., Li, Y., Sun, Y., Wang, Y., Zhu, J., Wang, Z., Pan, S., & Xin, G. (2024). Emerging technologies for preservation and quality evaluation of postharvest edible mushrooms: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(23), 8445–8463. https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2200482

Yan, X., Cheng, M., Wang, Y., Zhao, P., Wang, K., Wang, Y., Wang, X., & Wang, J. (2023). Evaluation of film packaging containing mesoporous nanosilica and oregano essential oil for postharvest preservation of mushrooms (*Agaricus*

bisporus). *Postharvest Biology and Technology, 198*, 112263. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112263

Zhang, R., Cheng, M., Wang, X., & Wang, J. (2019). Bioactive mesoporous nano-silica/potato starch films against molds commonly found in post-harvest white mushrooms. *Food Hydrocolloids, 95*, 517–525. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.04.060

Zheng, N., Ma, Y.-M., Lei, H.-Y., Zhen, X.-Y., Wang, Y., Zhang, Y., Gou, D.-X., & Liu, T. (2025). Progress of post-harvest preservation technology of edible mushroom. *Food & Medicine Homology, 2*(1), 9420028. https://doi.org/10.26599/FMH.2025.9420028

Zhu, B., Liu, Y., Qin, Y., Chen, H., & Zhou, L. (2022). Release of clove essential oil loaded by mesoporous nano-silica in polylactic acid-based food packaging on postharvest preservation of white button mushroom. *International Journal of Food Science & Technology, 57*(1), 457–465. https://doi.org/10.1111/ijfs.15440

Zhu, D., Cheng, R., Xiong, S., Ge, L., Kong, G., Sun, Y., Li, W., Huang, H., Meng, D., & Cheng, F. (2026). Integrated physiological and transcriptomic analysis revealed the regulatory mechanisms of thyme essential oil emulsion treatment in accelerating the browning process of fresh-cut button mushrooms. *LWT, 244*, 119190. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2026.119190

Zhu, D., Guo, R., Li, W., Song, J., & Cheng, F. (2019). Improved postharvest preservation effects of *Pholiota nameko* mushroom by sodium alginate–based edible composite coating. *Food and Bioprocess Technology, 12*, 587–598. https://doi.org/10.1007/s11947-019-2235-5


BİDGE