

ZİRAAT ORMAN VE SU ÜRÜNLERİ

ALANINDA GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

EDİTÖRLER

PROF. DR. MUSTAFA YILMAZ

ARAŞ. GÖR. MELİKE KÖSE



ZİRAAT ORMAN VE SU ÜRÜNLERİ ALANINDA GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

Editörler: Prof. Dr. Mustafa Yılmaz, Araş. Gör. Melike Köse

Yayınevi Grubu Genel Başkanı: Yusuf Ziya Aydoğan (yza@egitimyayinevi.com)

Genel Yayın Yönetmeni: Yusuf Yavuz (yusufyavuz@egitimyayinevi.com)

Sayfa Tasarımı: Kübra Konca Nam

Kapak Tasarımı: Eğitim Yayınevi Tasarım Birimi

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı

Yayıncı Sertifika No: 76780

E-ISBN: 978-625-5014-81-8

1. Baskı, Ekim 2026

Kütüphane Kimlik Kartı

ZİRAAT ORMAN VE SU ÜRÜNLERİ ALANINDA GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

Editörler: Prof. Dr. Mustafa Yılmaz, Araş. Gör. Melike Köse

E-ISBN: 978-625-5014-81-8

IV+366 s., 160x240 mm

Kaynakça var, dizin yok.

Copyright © Bu kitabın Türkiye'deki her türlü yayın hakkı Eğitim Yayınevi'ne aittir. Bütün hakları saklıdır. Kitabın tamamı veya bir kısmı 5846 sayılı yasanın hükümlerine göre kitabı yayımlayan firmanın ve yazarlarının önceden izni olmadan elektronik/mechanik yolla, fotokopi yoluyla ya da herhangi bir kayıt sistemi ile çoğaltılamaz, yayımlanamaz.



Yayınevi Türkiye Ofis:

Konya: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye

İstanbul: Salon Yayınları, Atakent mah., Yasemen sok., No: 4/B, Ümraniye, İstanbul, Türkiye

Santral: +90 332 351 92 85

Editör hatları: +90 533 151 50 42, +90 507 151 50 43

bilgi@egitimyayinevi.com

Yayınevi Amerika Ofis: New York: Egitim Publishing Group, Inc.

P.O. Box 768/Armonk, New York, 10504-0768, United States of America

americaoffice@egitimyayinevi.com

Lojistik ve Sevkiyat Merkezi: Kitapmatik Lojistik ve Sevkiyat Merkezi, Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye

İnternet Satış: www.kitapmatik.com.tr

Whatsapp hattı: +90 553 950 50 37

bilgi@kitapmatik.com.tr

Kitabevi Şubesi: Eğitim Kitabevi, Şükran mah. Rampalı 121, Meram, Konya, Türkiye

Whatsapp hattı: +90 501 651 92 85

bilgi@egitimkitabevi.com

EĞİTİM YAYINEVİ
GRUBU

EĞİTİM
yayınevi

SALON
YAYINLARI

kitapmatik
Lojistik ve Sevkiyat

Kitapmatik
YAYINLARI

EĞİTİM
kitabevi

İÇİNDEKİLER

SORGUMDA BÜTÜNCÜL SAVUNMA STRATEJİLERİ: DHURRİN VE SORGOLEONUN MOLEKÜLER REGÜLASYONU, ÇEVRESEL STRES YANITLARI VE BİYOTEKNOLOJİK YAKLAŞIMLAR.....	1
Mehmet Öten	
SICAK İKLİM ÇİM BİTKİLERİ	44
Ertuğrul Balekoğlu, Ali Salman	
TARLA TARIMINDA YABANCI OT HASTALIK VE ZARARLILARIN ENTEGRE TESPİTİ İÇİN DERİN ÖĞRENME TABANLI BİR YAKLAŞIM	73
Lerzan Öztürk, Bahadır Şin	
SÜS BİTKİSİ OLARAK KULLANILABİLEN TARLA BİTKİLERİ.....	95
Güzella Yılmaz Vural	
SERİN İKLİM ÇİM BİTKİLERİ	107
Ertuğrul Balekoğlu, Mustafa Yılmaz	
İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN BİTKİSEL ÜRETİM ÜZERİNE ETKİLERİ.....	132
Uğur Bilgili, Melike Köse	
TARLA BİTKİLERİ TARIMINDA UZAKTAN ALGILAMA YÖNTEMLERİNİN BİTKİ KORUMA AÇISINDAN KULLANILMASI .	147
Bahadır Şin, Lerzan Öztürk	
TARLA BİTKİLERİNDE BİYOSTİMULANTLARIN ROLÜ VE ÖNEMİ	168
Şebnem Kuşvuran, Alpaslan Kuşvuran	
TIBBİ VE AROMATİK BİTKİLER TOHUMCULUĞU	192
Selma Devrim, İsa Telci	
ORGANİK TARIMDA MİKROORGANİZMALARIN ROLÜ VE ÖNEMİ	205
Sancar Bulut, Melike Köse	

TIBBİ VE AROMATİK BİTKİLERDE BİYOSTİMÜLANT UYGULAMALARI	222
Muharrem Dikener, Muhammed Said Yolcu	
TÜRKİYE’DE KÖRPE MISIR (BABY CORN)	242
Burhan Kara, Mustafa Yılmaz	
TATLI MISIR (<i>Zea mays saccharata</i> Sturt.)’IN ÖNEMİ, YETİŞTİRİCİLİĞİ VE KALİTE ÖZELLİKLERİ	260
Alpaslan Kuşvuran, Şebnem Kuşvuran	

SORGUMDA BÜTÜNCÜL SAVUNMA STRATEJİLERİ: DHURRİN VE SORGOLEONUN MOLEKÜLER REGÜLASYONU, ÇEVRESEL STRES YANITLARI VE BİYOTEKNOLOJİK YAKLAŞIMLAR

Mehmet Öten*

ÖZET

Sorgum (*Sorghum bicolor* L.), yüksek sıcaklık, kuraklık ve düşük girdi koşullarına uyum sağlayabilmesi nedeniyle yarı kurak ve kurak bölgelerde önemli bir tahıl, yem ve biyoenerji bitkisidir. Bu uyum yeteneğinde, bitkinin biyotik ve abiyotik streslere karşı geliştirdiği sekonder metabolitler önemli rol oynamaktadır. Bu derlemede sorgumun başlıca savunma metabolitleri olan dhurrin ve sorgoleonun biyosentezi, moleküler düzenlenmesi, stres yanıtlarındaki işlevleri, ekolojik etkileri ve biyoteknolojik iyileştirme potansiyelleri güncel literatür ışığında değerlendirilmiştir. Dhurrin biyosentezinin CYP79A1, CYP71E1 ve UGT85B1 enzimlerinin oluşturduğu metabolon yapısı içerisinde gerçekleştiği, genotipler arasında önemli ekspresyon farklılıklarının bulunduğu ve bu farklılıkların hidrojen siyanür potansiyeli (HCNp) ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Bulgular, dhurrinin yalnızca siyanogenik bir savunma bileşiği olmadığını; aynı zamanda azot depolama, geri dönüşüm ve stres koşullarında kaynak yönetiminde görev aldığını göstermektedir. Kuraklık koşullarında dhurrin metabolizmasının yeniden düzenlendiği, membran bütünlüğünün kontrolsüz siyanogenezin önlenmesinde kritik öneme sahip olduğu ve dhurrinin doğrudan bir antioksidan mekanizma olarak işlev görmediği ortaya konmuştur. Sorgoleonun kök tüylerinde sentezlendiği ve rizosfere salgılanarak güçlü alelopatik etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. Bu bileşiğin fotosistem II ve mitokondriyal elektron taşınımını baskılayarak yabancı ot gelişimini sınırlandırdığı, ayrıca rizosfer mikrobiyotası ve azot dönüşüm süreçlerini etkileyerek ekosistem düzeyinde işlev gördüğü bildirilmiştir. Böylece sorgumun, yer üstünde dhurrin temelli siyanogenik savunmayı ve yer altında sorgoleon temelli alelopatik savunmayı bütünluştiren çift yönlü bir kimyasal savunma

* Prof. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Sakarya, mehmetoten@subu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-3737-2356>

sistemi geliřtirdiđi anlařılmaktadır. Ayrıca fenilpropanoid kkenli metabolitlerin savunma biyolojisindeki rol deđerlendirilmiřtir. Fenolik asitlerin hcre duvarı dayanıklılıđı ve antioksidan savunmaya, 3-deoksantosiyanidinlerin patojenlere karřı indklenebilir fitoaleksinin yanıtına ve kondanse tanenlerin herbivorlar ile fungal patojenlere karřı korumaya katkı sađladığı ortaya konmuřtur. Bu metabolitlerin stres toleransı ve bitki savunmasında tamamlayıcı iřlevler stlendiđi belirlenmiřtir. Son olarak, antisens RNA, dřk siyanogenik mutantlar ve CRISPR/Cas9 tabanlı genom dzenleme yaklařımlarının yem gvenliđi ile stres toleransının birlikte geliřtirilmesi aısından sunduđu olanaklar deđerlendirilmiřtir.

Genel olarak deđerlendirildiđinde, sorgumun savunma ve stres tolerans sisteminin birbirini tamamlayan ok katmanlı bir sekonder metabolit ađı tarafından dzenlendiđi grlmektedir. Dhurinin yalnızca siyanogenik bir savunma bileřiđi deđil, aynı zamanda azot depolama ve yeniden kullanımında grev alan iřlevsel bir metabolit olduđu; sorgoleonun ise gl alelopatik etkileriyle rizosfer ekolojisini ve bitkiler arası rekabeti řekillendirdiđi ortaya konmuřtur. Bunun yanında fenolik asitler, 3-deoksantosiyanidinler ve kondanse tanenlerin antioksidan savunma, hcre duvarı dayanıklılıđı ve patojen baskılanmasına katkı sađlayarak stres toleransını desteklediđi belirlenmiřtir. Elde edilen bulgular, sorgum sekonder metabolizmasının savunma biyolojisi, yem gvenliđi, iklim deđiřikliđine uyum ve srdrlebilir retim srelerinde merkezi bir rol oynadıđını; ayrıca genom dzenleme ve molekler ıřlah stratejileri iin nemli hedefler sunduđunu gstermektedir.

Anahtar kelimeler: *Sorghum bicolor*, dhurinin, sorgoleon, sekonder metabolitler, kuraklık stresi, alelopati, yem gvenliđi.

1. GİRİř

Sorgum (*Sorghum bicolor* L.), mısır ve buđday gibi temel tahıllara kıyasla yksek sıcaklık, kuraklık ve dřk girdi kořullarına gsterdiđi stn adaptasyon kapasitesi nedeniyle dnya tarımında stratejik neme sahip bir C4 bitkisidir. zellikle yarı kurak ve kurak blgelerde srdrlebilir biyoktle retimi, yem kaynađı oluřturma ve biyoenerji uygulamaları aısından n plana ıkmaktadır (Wang vd. 2024:1). Bununla birlikte sorgumun evresel streslere dayanıklılıđı ve ekolojik uyumu yalnızca morfolojik ve fizyolojik zellikleriyle aıklanamaz; bitkinin sekonder metabolizma sistemi de bu adaptasyonun temel bileřenlerinden

birini oluşturmaktadır. Sekonder metabolitler, bitkinin büyüme ve gelişmesi için doğrudan zorunlu olmamakla birlikte, biyotik ve abiyotik streslere karşı hayatta kalmasını sağlayan kimyasal savunma ağlarının temel elemanlarıdır. Sorgum, bu açıdan tahıllar arasında dikkat çekici bir model tür olup siyanogenik glikozitler, fenolik bileşikler, flavonoidler, tanenler, fitoaleksinler ve alelopatik bileşikler bakımından zengin bir metabolik çeşitlilik sergilemektedir. Bu metabolitler otçul baskısı, patojen enfeksiyonları, çevresel stresler ve türler arası rekabet gibi çok sayıda seçim baskısına karşı koruyucu işlev görmektedir (Gleadow & Møller, 2014:172; Xu vd. 2021:2). Sorgumun en iyi tanımlanmış savunma metabolitlerinden biri olan dhurrin [β -D-glukopiranosiloksi-(S)-p-hidroksimandelonitril], genç dokularda yüksek seviyelerde biriken bir siyanogenik glikozittir. Nitekim farklı sorgum ve sudan otu çeşitlerinde gerçekleştirilen bir çalışmada, hidrojen siyanür (HCN) konsantrasyonunun 40 cm bitki boyunda en yüksek düzeyde olduğu (8.99 ppm), bitki boyunun 80 cm (5.66 ppm) ve 120 cm'ye (3.93 ppm) ulaşmasıyla birlikte ise anlamlı ölçüde azaldığı belirlenmiştir. Bu değerler yem güvenliği açısından kritik eşik olan 200 ppm'in oldukça altında olup, bu seviyelerde doğrudan toksisite riski bulunmamaktadır. Ancak genç bitkilerde HCNp birikiminin daha yüksek olması nedeniyle erken dönemde otlatma dikkatle yönetilmelidir. (Öten, 2017:214). Dhurrin, bitkiye herbivorlar ve bazı patojenlere karşı etkili bir koruma sağlarken, hidrolizi sonucunda açığa çıkan hidrojen siyanür (HCN) nedeniyle hayvan beslemede önemli bir risk faktörü oluşturmaktadır (Møller, 2010:338). Bu nedenle dhurrin, bitkiye savunma avantajı sağlayan ancak yüksek düzeylerde bulunduğu hayvan beslemede toksisite riski oluşturabilen çift yönlü bir metabolit olarak değerlendirilmektedir (Vetter, 2000:27). Sorgum savunma sisteminin bir diğer önemli bileşeni ise kök tüylerinden rizosfere salgılanan lipofilik *p*-benzoquinon türevi sorgoleonudur. Sorgoleon, rakip bitkilerde fotosentetik ve solunumsal süreçleri baskılayarak alelopatik üstünlük sağlamak ve böylece sorgumun toprak kaynakları üzerindeki rekabet gücünü artırmaktadır (Einhellig & Souza, 1992:369; Weston & Czarnota, 2001:367). Böylece sorgum, yer üstünde dhurrin temelli siyanogenik savunma ve yer altında sorgoleon temelli alelopatik savunmayı birlikte kullanarak birden fazla mekanizmayı içeren bir kimyasal savunma stratejisi geliştirmektedir. Bu temel hatlara; hücresel düzeyde antioksidan kapasiteyi destekleyen fenolik asitler, indüklenebilir nitelikteki flavonoid/3-deoksantosiyanidin fitoaleksinleri ve tanenler gibi diğer fenilpropanoid türevleri de eşlik etmektedir. Son yıllarda yapılan

çalışmalar, sorgum sekonder metabolizmasının yalnızca savunma işleviyle sınırlı olmadığını; aynı zamanda azot ekonomisi, çevresel stres yanıtları ve bitkinin adaptasyon süreçlerinde de önemli roller üstlendiğini göstermiştir (Bjarnholt vd. 2018:1110; Møller, 2014:341). Buna paralel olarak transkriptomik ve diğer omik teknolojilerindeki gelişmeler, dhurrin biyosentezi ve ilişkili metabolik ağların moleküler düzeyde daha ayrıntılı biçimde incelenmesini mümkün kılmıştır (Ananda vd. 2022:3). Özellikle kuraklık stresi altında bu metabolik ağların işlevsel yönelimi belirginleşmektedir. Sorgum, kuraklık stresine yanıt olarak fizyolojik ve biyokimyasal seviyede çok sayıda mekanizmayı devreye sokmakta; bu mekanizmaların merkezinde ikincil metabolitlerin dinamik sentezi ve birikimi yer almaktadır. Ancak bu metabolitlerin strese katkısı homojen değildir. Fenolik bileşikler ve tanenler doğrudan antioksidan kapasiteyi artırarak reaktif oksijen türlerini (ROS) süpürürken; bir siyanojenik glikozit olan dhurrin, doğrudan bir antioksidan mekanizma olmaktan ziyade azot depolama, hücrel sinyal iletimi ve doku bütünlüğünün korunmasında işlev yapmaktadır (Sohail vd., 2022). Bu doğrultuda, her bir metabolit grubunun strese yanıt biçimi ve bitki bünyesindeki spesifik işlevi ayrı ayrı ele alınmalıdır.

Bu çerçevede sorgumun savunma sistemi, birbirinden bağımsız metabolik yolların toplamı değil; karbon ve azot ekonomisi, çevresel stres yanıtları, biyotik etkileşimler ve gelişimsel düzenleme mekanizmalarıyla bütünleşik çalışan dinamik bir kimyasal savunma ağı olarak değerlendirilmelidir. Bu bölümde dhurrin, sorgoleon, fenolik bileşikler, flavonoidler ve kondanse tanenlerin biyosentezi, moleküler regülasyonu, çevresel stres koşullarındaki işlevleri ve yem güvenliği ile biyoteknolojik ıslah açısından taşıdığı önem güncel literatür ışığında bütüncül bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Böylece sorgum sekonder metabolizmasının yalnızca savunma biyolojisinin bir bileşeni değil, aynı zamanda iklim değişikliğine uyum, sürdürülebilir üretim ve geleceğin moleküler ıslah stratejilerinin temel belirleyicilerinden biri olduğu ortaya konulmaktadır.

2. SİYANOGENİK SAVUNMA VE GENETİK REGÜLASYON

Sorgumda siyanojenik savunma, önceden sentezlenmiş ve vakuollerde depolanan dhurrinin doku hasarı sonrasında enzimatik olarak parçalanmasına dayanan yüksek düzeyde düzenlenmiş bir kimyasal savunma mekanizmasıdır (Gleadow & Møller, 2014:160). Bu sistem, önemli miktarda enerji ve azot yatırımı gerektirmesine rağmen, herbivorlar

ve bazı patojenlere karşı hızlı ve etkili bir savunma yanıtı sağlamaktadır (Gleadow & Møller, 2014:174). Dhurrin biyosentezi ve siyanogenezin moleküler regülasyonu, biyosentetik enzimlerin hücresel düzeydeki mekânsal organizasyonu ile gen ekspresyonunun gelişimsel ve çevresel sinyallere bağlı düzenlenmesini kapsayan çok katmanlı bir kontrol ağı tarafından yönetilmektedir (Laursen vd., 2016:893; Katamreddy vd., 2025:17).

2.1. Dhurrin Biyosentezi ve Moleküler Organizasyon

Sorgumda dhurrin biyosentezi, L-tirozin amino asidinden türetilen ve bitkinin siyanogenik savunma sisteminin temelini oluşturan üç basamaklı bir biyosentetik yoldur (Conn, 1979:31; Møller, 2010:338). Bu yolla L-tirozin, önce CYP79A1 enzimi tarafından (E)-p-hidroksifenilasetaldoksime dönüştürülmekte, ardından CYP71E1 enzimi tarafından p-hidroksimandelonitrile oksitlenmekte ve son olarak UGT85B1 enzimi tarafından glikozillenerek kararlı dhurrin formu oluşturulmaktadır (Møller, 2010:340; Nielsen vd., 2008:90; Halkier & Møller, 1989:1552).

Bu biyosentetik yol yalnızca enzimatik reaksiyonların ardışık bir dizisinden ibaret olmayıp, ara ürünlerin kontrollü biçimde yönlendirilmesini sağlayan organize bir hücresel sistem içerisinde gerçekleşmektedir. Özellikle p-hidroksimandelonitril gibi kararsız ve potansiyel olarak toksik ara ürünlerin güvenli biçimde metabolize edilmesi, biyosentetik yolun mekânsal organizasyonunu kritik hale getirmektedir. Bu organizasyonun moleküler temeli, metabolon yapısı ve metabolik kanallama mekanizmaları çerçevesinde değerlendirilmektedir (Nielsen vd., 2008:95).

2.2. Metabolon Yapısı ve Moleküler Kanallama Dinamikleri

Dhurrin biyosentezinin en dikkat çekici özelliklerinden biri, biyosentetik enzimlerin endoplazmik retikulum membranı üzerinde organize olmuş bir metabolon yapısı içerisinde faaliyet göstermesidir. CYP79A1, CYP71E1 ve UGT85B1 enzimlerinin fiziksel ve fonksiyonel olarak bir araya gelmesi, ara ürünlerin doğrudan bir enzimden diğerine aktarılmasını sağlayan metabolik kanallama mekanizmasını mümkün kılmaktadır (Laursen vd., 2016:893; Nielsen vd., 2008:94).

Metabolik kanallamanın temel avantajı, biyosentez sırasında oluşan kararsız ve potansiyel olarak sitotoksik ara ürünlerin sitoplazmaya

yayılmasını önleyerek hücrel toksisite riskini azaltmasıdır. Özellikle p-hidroksimandelonitril gibi reaktif ara ürünlerin kontrollü biçimde yönlendirilmesi, hem biyosentetik verimliliği artırmakta hem de siyanogenik savunma sisteminin güvenli biçimde çalışmasını sağlamaktadır (Laursen vd., 2016:892).

Bu organizasyonun, biyosentetik akışın düzenlenmesine katkıda bulunabileceği ve metabolik kapasitenin dinamik kontrolünde rol oynayabileceği düşünülmektedir. Son yıllarda gerçekleştirilen yapısal ve fonksiyonel çalışmalar, metabolonun dinamik bir kompleks olduğunu ve enzimler arası etkileşimlerin biyosentetik kapasite ile siyanogenik potansiyelin düzenlenmesinde önemli rol oynadığını göstermektedir (Laursen vd., 2016:893; Wang vd., 2024:4).

2.3. Dhurrinin HCN'ye dönüşümü ve siyanogenezin aktivasyonu

Dhurrin, sağlam bitki dokularında vakuollerde depolanan kararlı bir siyanogenik glikozittir ve tek başına toksik değildir. Siyanogenez, doku hasarı sonrasında dhurrinin hidrolitik enzimlerle temas etmesiyle aktive olan iki basamaklı bir enzimatik süreçtir. İlk aşamada dhurrin, β -glukozidaz (dhurrinase) enzimi tarafından hidrolize edilerek p-hidroksimandelonitril oluşturur. İkinci aşamada ise p-hidroksimandelonitril, α -hidroksinitril liyaz (HNL) enziminin kataliziyle p-hidroksibenzaldehit ve hidrojen siyanüre (HCN) parçalanır (Møller, 2010:338; Gleadow & Møller, 2014:158).

Sağlam dokularda dhurrinin vakuollerde, β -glukozidazın ise farklı hücrel kompartımanlarda bulunması, HCN oluşumunu engelleyen temel düzenleyici mekanizmalardan biridir. Yaprak, sap veya kök dokularında meydana gelen mekanik hasar, herbivor beslenmesi ya da patojen saldırısı sonucunda bu kompartımanlaşma bozulmakta, dhurrin hidrolitik enzimlerle temas ederek kısa sürede HCN açığa çıkmasına neden olmaktadır. Bu hızlı kimyasal savunma yanıtı, sorgumun herbivora karşı etkili bir korunma mekanizması geliştirmesini sağlamaktadır (Gleadow & Møller, 2014:159).

HCN oluşumunun miktarı yalnızca dokudaki toplam dhurrin konsantrasyonuna değil, aynı zamanda β -glukozidaz ve α -hidroksinitril liyaz aktivitelerine, membran bütünlüğüne ve çevresel stres koşullarına da bağlıdır. Bu nedenle siyanogenik potansiyel, dhurrin biyosentezi ile siyanogenezin aktivasyon mekanizmalarının birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir (Gleadow & Møller, 2014:166).

2.4. Genotipler Arası Ekspresyon Profilleri ve HCN Potansiyeli İlişkisi

Sorgum genotipleri arasında dhurrin biyosentezi ve buna bağlı hidrojen siyanür potansiyeli (HCNp) bakımından önemli farklılıklar bulunmaktadır. Son yıllarda gerçekleştirilen transkriptomik çalışmalar, bu varyasyonun büyük ölçüde dhurrin biyosentez yolunda görev yapan genlerin ekspresyon düzeylerinden kaynaklandığını göstermektedir. Özellikle CYP79A1, CYP71E1 ve UGT85B1 genlerinin ifade düzeyleri ile toplam dhurrin miktarı ve HCN potansiyeli arasında güçlü pozitif ilişkiler bildirilmiştir (Katamreddy vd., 2025:12).

Kuraklığa toleranslı ve duyarlı sorgum genotiplerinin karşılaştırıldığı transkriptomik analizlerde, yüksek HCN potansiyeline sahip genotiplerde CYP79A1 ve UGT85B1 genlerinin belirgin biçimde yukarı regüle olduğu saptanmıştır. Bu genotiplerde gözlenen artmış transkript birikimi, dhurrin biyosentez kapasitesinin yükselmesiyle doğrudan ilişkilidir. Seçilmiş sorgum genotiplerinde biyosentetik genlerin ekspresyon düzeyleri ile HCNp değerleri arasındaki ilişki Tablo 1’de özetlenmiştir (Katamreddy vd., 2025:14).

Tablo 1. Seçilmiş Sorgum Genotiplerinde Dhurrin Biyosentez Genlerinin Ekspresyon Seviyeleri ve HCNp Değerleri

Genotip	CYP79A1 Ekspresyonu	CYP71E1 Ekspresyonu	UGT85B1 Ekspresyonu	HCNp (ppm)	Risk Kategorisi
ICSV	1,0 (Kontrol)	Anlamlı artış	1,0	280-310	Düşük
CSH 24-	2,1 kat (Orta)	Anlamlı artış	2,4 kat	364	Orta
ICSR	4,2 kat	2,5-4 kat	3,8 kat	512	Çok

CYP79A1 geninin mRNA düzeyi ile toplam dhurrin miktarı arasında $r = 0.92$ düzeyinde güçlü bir pozitif korelasyon bildirilmiştir (Katamreddy vd., 2025:15). Bu bulgu, siyanogenik potansiyelde gözlenen genotipik varyasyonun önemli ölçüde transkripsiyonel regülasyon tarafından belirlendiğini ve CYP79A1 ekspresyonunun düşük HCN potansiyeline sahip genotiplerin seçilmesinde moleküler bir belirteç olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Dhurrin metabolizmasında gözlenen genotipik farklılıklar yalnızca gen ekspresyon düzeyleriyle açıklanamamakta, aynı zamanda genetik varyasyonlarla da ilişkilendirilmektedir. Choi vd. (2020:7), farklı sorgum genotiplerinde gerçekleştirdikleri RNA-seq analizlerinde CAS1 ve

NIT4B2 genlerinde çeşitli tek nükleotid polimorfizmleri (SNP) tanımlanmışlardır. Özellikle CAS1 geninde belirlenen bazı varyantların amino asit değişimlerine neden olabileceği ve bunun siyanür detoksifikasyon süreçlerini etkileyebileceği bildirilmiştir. Bu bulgular, dhurrin metabolizmasında gözlenen genotipik farklılıkların yalnızca gen ekspresyon düzeylerinden değil, aynı zamanda genetik varyasyonlardan da kaynaklanabileceğini göstermektedir.

2.5. Membran Stabilitesi ve Düzenleyici Rolü

Sorgumda siyanogenik potansiyel yalnızca dhurrin miktarıyla değil, aynı zamanda hücrel membran bütünlüğü ve dhurrinin güvenli kompartımanlaşmasının korunmasıyla da yakından ilişkilidir. Dhurrinin vakuollerde depolanması ile hidrolitik enzimlerin farklı hücrel kompartımanlarda bulunması, siyanogenik sistemin kontrolsüz biçimde aktive olmasını önleyen temel düzenleyici mekanizmalardan biridir. Bu nedenle membran bütünlüğünün korunması, dhurrin depolanmasının güvenliği ve siyanogenezin zamanlaması açısından kritik öneme sahiptir (Gleadow & Møller, 2014:157).

Kuraklığa toleranslı ve duyarlı sorgum genotiplerinin karşılaştırıldığı çalışmalar, membran stabilitesi ile dhurrin metabolizması arasında güçlü bir ilişki bulunduğunu göstermektedir. Kuraklığa toleranslı ICSV 93046 genotipinde fosfolipaz (PLP), lipoksigenaz (LOX) ve diğer membran koruma ile ilişkili genlerin daha yüksek düzeyde ifade edilmesi, vakuol ve hücrel membran bütünlüğünün sürdürülmesine katkı sağlamaktadır. Buna karşılık kuraklığa duyarlı ICSR 14001 genotipinde membran hasarının artması, dhurrinin vakuolden sitoplazmaya sızmasına ve hidrolitik enzimlerle temas ederek siyanogenezin tetiklenmesine neden olabilmektedir (Katamreddy vd., 2025:16).

Bu bulgular, çevresel stres koşullarında siyanogenik yanıtın yalnızca biyosentetik genlerin ekspresyonu ile açıklanamayacağını göstermektedir. Membran bütünlüğünün korunması, vakuoler depolama kapasitesi ve kompartımanlar arası metabolit hareketinin düzenlenmesi, dhurrin metabolizmasının önemli kontrol basamaklarını oluşturmaktadır. Dolayısıyla membran stabilitesi, dhurrin biyosentezi ile siyanogenik aktivasyon arasındaki bağlantıyı belirleyen temel fizyolojik düzenleyicilerden biri olarak değerlendirilmektedir (Katamreddy vd., 2025:17).

2.6. Ontogenetik Regölasyon ve Organ Spesifikliđi

Dhurrin biyosentezi, bitkinin gelişim süreci boyunca sabit kalan bir metabolik özellik olmayıp, ontogenetik evreye bađlı olarak dinamik biçimde düzenlenmektedir. Genç gelişme dönemlerinde yüksek düzeyde gerçekleşen dhurrin birikimi, bitkinin en hassas dokularını herbivorlar ve patojenlere karşı korumaya yönelik önleyici bir savunma stratejisini yansıtmaktadır. Gelişim ilerledikçe biyosentez kapasitesi azalmakta, buna karşılık dhurrin metabolizması ve azot geri kazanımı ile ilişkili süreçler ön plana çıkmaktadır (Gleadow & Møller, 2014:166).

Çimlenmeyi izleyen ilk iki haftalık dönemde, özellikle büyüme konisi, genç yapraklar ve yaprak kınlarında CYP79A1 ve diğeri dhurrin biyosentez genlerinin ekspresyonu en yüksek düzeye ulaşmaktadır. Bu dönemde bitki önemli miktarda karbon ve azot kaynađını dhurrin sentezine yönlendirerek genç dokuların korunmasına öncelik vermektedir (Gleadow & Møller, 2014:167).

Dhurrin birikimi organlar arasında da belirgin farklılık göstermektedir. Genç yapraklar ve meristematik dokular yüksek dhurrin konsantrasyonlarına sahipken, kök epidermisinde lokalize olan dhurrin rezervleri kök bölgesindeki patojen saldırılarına karşı hızlı siyanogenik yanıtın oluşturulmasına katkı sağlamaktadır (Gleadow & Møller, 2014:168).

Çiçeklenme sonrasında ise biyosentez genlerinin ekspresyonu aşağı regüle edilmekte, buna karşılık GSTL1 (glutasyon transferaz) ve NITB2 (nitrilaz) gibi dhurrin parçalanması ve azot geri kazanımı ile ilişkili genlerin ifadesi belirgin biçimde artmaktadır. Bu gelişimsel geçiş, savunma amacıyla depolanan azotun yeniden mobilize edilerek üreme organlarının ve dane gelişiminin desteklenmesine hizmet etmektedir (Bjarnholt vd., 2018:1120; Gleadow vd., 2021:3).

Bu bulgular, dhurrinin yalnızca bir savunma metaboliti olmadığını, aynı zamanda gelişimsel programlama ve azot ekonomisi ile bütünleşik biçimde düzenlenen dinamik bir metabolik sistemin parçası olduğunu göstermektedir.

2.7. Biyosentetik Rekabet: Aromatik Havuzun Paylaşımı

Dhurrin biyosentezi ile fenilpropanoid metabolizması arasında ortak aromatik öncüllerin paylaşımına bađlı metabolik etkileşimler bulunduđu düşünülmektedir (Dicko vd., 2005:2673; Gleadow & Møller, 2014:166).

Her iki metabolik yol da şikimat yolundan türeyen aromatik amino asit havuzuyla bağlantılı olduğundan, karbon ve azot kaynaklarının farklı savunma metabolitleri arasında dağılımı dinamik bir düzenleme süreci oluşturmaktadır (Haskins & Gorz, 1986:4; Dicko vd., 2005:2674).

Fenilpropanoid yolunda flavonoidler, proantosiyanidinler (kondanse tanenler) ve diğer fenolik bileşiklerin sentezi, çevresel stres koşullarına ve genotipe bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Buna karşılık dhurrin biyosentezi, özellikle genç gelişme dönemlerinde yüksek düzeyde azot ve karbon yatırımı gerektiren bir savunma stratejisidir. Bu nedenle bitkinin savunma metabolizması, farklı metabolik yollar arasında kaynak tahsisi ve düzenleyici denge mekanizmalarıyla şekillenmektedir (Gleadow & Møller, 2014:174; Dicko vd., 2005:2676).

Bazı genotiplerde fenilpropanoid metabolizmasının daha aktif olduğu koşullarda dhurrin düzeylerinin nispeten düşük bulunması, bu iki savunma sistemi arasında olası bir metabolik denge bulunduğunu düşündürmektedir. Ancak mevcut veriler, bu ilişkinin doğrudan bir rekabet mekanizmasıyla mı, yoksa ortak düzenleyici ağlar ve çevresel sinyaller aracılığıyla mı gerçekleştiğini kesin olarak ortaya koymamaktadır. Dolayısıyla dhurrin biyosentezi ile fenilpropanoid metabolizması arasındaki etkileşim, ortak öncüllerin paylaşımı ve savunma kaynaklarının yeniden tahsisi çerçevesinde değerlendirilmelidir (Dicko vd., 2005:2678).

Bu metabolik denge, özellikle düşük HCN potansiyeline sahip ve aynı zamanda yüksek fenolik içerikli sorgum genotiplerinin geliştirilmesine yönelik moleküler ıslah stratejileri açısından önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

3. YER ALTI SAVUNMASI VE ALELOPATİ: SORGOLEON METABOLİZMASI

Sorgoleon (5-[8'(Z),11'(Z),14'(Z)-pentadecatrienil]-2-hidroksi-3-metoksi-p-benzoquinon), *Sorghum bicolor* kök tüyleri tarafından sentezlenen ve rizosfere salgılanan lipofilik bir p-benzoquinon bileşiğidir (Weston & Czarnota, 2001:367; Dayan, 2006:341). Dhurrinin bitkinin toprak üstü savunmasındaki rolüne karşılık sorgoleon, kök bölgesinde işlev gören temel savunma metaboliti olarak sorgumun yer altı kimyasal savunma sistemini oluşturmaktadır (Weston & Czarnota, 2001:370). Rakip bitkiler, toprak mikroorganizmaları ve çevresel koşullarla olan etkileşimleri sayesinde sorgumun ekolojik başarısına katkıda bulunan bu bileşik, güçlü alelopatik özellikleri nedeniyle doğal ürünler ve biyoherbisit

arařtırmalarında önemli bir alıřma konusu hâline gelmiřtir (Einhellig & Souza, 1992:3; Dayan vd., 2010:1039; Wang vd., 2021:11). Bu bölümde sorgoleonun kimyasal yapısı, biyosentezi, salgılanma mekanizması, biyolojik etkileri ve ekolojik işlevleri ele alınmaktadır.

3.1. Kimyasal Yapı ve Biyosentez Yolağı

Sorgoleon biyosentezi sırasında uzun zincirli yağ asitlerinden türeyen alkilresorsinol ara ürünleri oluşmakta ve bu reaksiyonların temel katalizörleri olarak alkilresorsinol sentaz enzimleri (ARS1 ve ARS2) görev yapmaktadır. Bu enzimlerin biyosentetik yoldaki belirleyici rolü, ARS genlerinin RNA interferansı ile susturulduğu deneylerde sorgoleon birikiminin önemli ölçüde azalmasıyla gösterilmiştir (Cook vd., 2010:867).

Sorgoleon, kök tüylerinde başlangıta hidrokinon formunda sentezlenmekte, rizosfere salgılandıktan sonra ise oksidatif koşullar altında biyolojik olarak aktif p-benzoquinon formuna dönüşmektedir (Dayan vd., 2010:1039). Bu dönüşüm, bileşiğın alelopatik aktivitesinin ortaya çıkmasında önemli bir basamak olarak kabul edilmektedir. Yapı-aktivite ilişkilerini inceleyen alıřmalar, sorgoleonun biyolojik etkinliğinin yalnızca karakteristik uzun yan zincir yapısına bağılı olmadığını göstermiştir. Barbosa vd. (2001:755), yan zincirdeki trien biriminin fitotoksisite için zorunlu olmadığını ve eřitli sentetik quinon analoglarının doğal sorgoleona benzer biyolojik aktivite gösterebildiğini bildirmiřtir. Bu bulgular, sorgoleonun alelopatik etkisinde p-benzoquinon çekirdeğinin belirleyici rol oynayabileceğini düşündürmektedir.

3.2. Kök Tüyü Geliřimi ve Salgılanma Mekanizması

Sorgoleon üretimi, kök tüyü diferansiyasyonu ile doğrudan bağlantılıdır ve bileşik yalnızca kök tüyü hücrelerinde sentezlenerek rizosfere salgılanmaktadır. Mikroskopik incelemeler, sorgoleon içeren salgıların kök epidermisinin diğeri hücrelerinden değil, yalnızca kök tüylerinden kaynaklandığını göstermiştir. Bu durum, kök tüylerinin sorgoleon biyosentezi ve salgılanması açısından özelleřmiř yapılar olduğunu ortaya koymaktadır (Czarnota vd., 2003:861).

Kök tüyü hücrelerinin ultrastrüktürel analizleri, sorgoleonun sitoplazmada, özellikle düz endoplazmik retikulum ve muhtemelen Golgi aygıtı ile ilişkili metabolik süreçler sonucunda üretildiğini göstermiştir. Oluřan lipofilik salgı önce plazma zarı ile hücre duvarı arasındaki bölgede

küçük damlacıklar halinde birikmekte, daha sonra bu damlacıklar birleşerek büyümekte ve hücre duvarını geçerek kök tüyü uçlarında yağ damlacıkları şeklinde dış ortama salınmaktadır (Czarnota vd., 2003:864).

Salgılanma süreci statik değil, dinamik bir karakter göstermektedir. Kök tüyü uçlarında biriken yağlı salgı belirli bir seviyeye ulaştığında salgı üretiminin baskılandığı, ancak köklerin yıkanmasıyla biriken salgının uzaklaştırılması sonrasında yeniden üretim ve salgılanmanın arttığı belirlenmiştir. Bu durum, sorgoleon biyosentezi ile salgılanmasının geri besleme mekanizmalarıyla düzenlenen sürekli bir süreç olduğunu göstermektedir (Dayan vd., 2009:2107).

Kök tüyü gelişimi, bu salgılama kapasitesinin temel belirleyicilerinden biridir. Yang vd. (2004:211), su hareketinin kök yüzeyindeki etilen düzeyini azaltarak kök tüyü gelişimini baskıladığını ve bunun sonucunda sorgoleon üretiminin düştüğünü göstermiştir. Etilen salınımını artıran ethephon uygulamasının bu etkiyi tersine çevirmesi, kök tüyü oluşumu ile sorgoleon salgılanması arasındaki yakın ilişkiyi desteklemektedir.

Benzer şekilde Uddin vd. (2010:920), sorgoleon salgısının fide gelişiminin 5-10. günlerinde en yüksek düzeye ulaştığını ve hormon uygulamaları ile uygun besin koşullarının üretimi önemli ölçüde artırabildiğini bildirmiştir. Birlikte değerlendirildiğinde bu bulgular, sorgoleon salgılanmasının yalnızca kök tüylerinin varlığına değil, aynı zamanda bitkinin gelişimsel durumu ve çevresel koşullara bağlı olarak düzenlenen dinamik bir süreç olduğuna işaret etmektedir.

3.3. Alelopatik Etki Mekanizması: Fotosentez ve Mitokondriyal İnhibisyon

Sorgoleonun alelopatik etkisi, hedef bitkilerin enerji üretim sistemlerini baskılamasına dayanmaktadır. Bu bileşik hem fotosentezde görev alan Fotosistem II (PSII) kompleksini hem de mitokondriyal elektron taşıma zincirini etkileyerek büyüme ve gelişmeyi sınırlandırmaktadır. Bu çoklu etki mekanizması, sorgoleonun fitotoksik özelliklerinin temelini oluşturmaktadır. Sorgoleon formülasyonları, sera ve kontrollü saksı denemelerinde geniş yapraklı otların gelişimini yüksek oranlarda baskılama potansiyeli sunmaktadır. Bununla birlikte, sorgoleonun biyoherbisit olarak ticari ve saha ölçeğindeki başarısı; bileşiğin toprak hidrofobik bileşenlerine bağlanması (sorpsiyon), hızlı mikrobiyal degradation süreçleri ve hedef kültür bitkisindeki doz-yanıt toleransı ile sınırlıdır. Bu nedenle, laboratuvar ve sera şartlarında gözlenen alelopatik

selektivitenin tarla koşullarında toprak-metabolit-mikroorganizma etkileşimleri çerçevesinde değerlendirilmesi gerekmektedir.

Sorgoleonun fotosentetik sistem üzerindeki temel moleküler hedefi, Fotosistem II kompleksindeki plastokinon bağlanma bölgesidir. Einhellig vd. (1993:374), soyadan izole edilen yaprak disklerinde 10 µM sorgoleon uygulamasının oksijen evrimini %50'den fazla azalttığını bildirmiştir. Aynı çalışmada, izole bezelye kloroplastlarında CO₂ bağımlı oksijen evrimi için belirlenen yaklaşık 0,2 µM'lık I₅₀ değeri, sorgoleonun sentetik herbisitlerle karşılaştırılabilecek düzeyde güçlü bir fotosentez inhibitörü olduğunu göstermiştir.

Bununla birlikte sorgoleonun etkisi yalnızca fotosentezle sınırlı değildir. Rasmussen vd. (1992:205), bileşiğin hem ADP ile uyarılan solunumu (durum 3) hem de bazal solunumu (durum 4) baskıladığını ve elektron taşıma zincirinde özellikle b-c1 kompleksi düzeyinde etkili olduğunu ortaya koymuştur. NADH, süksinat ve malat kullanılan deneylerde belirlenen düşük I₅₀ değerleri, sorgoleonun mitokondriyal enerji üretimini de önemli ölçüde engelleyebildiğini göstermektedir.

Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, sorgoleonun rakip bitkilerde hem fotosentetik enerji kazanımını hem de hücrel solunuma dayalı enerji üretimini baskılayarak çok yönlü bir alelopatik avantaj sağladığı anlaşılmaktadır (Rasmussen vd., 1992:204; Einhellig vd., 1993:373). Bu çift yönlü etki, sorgoleonun doğal bir biyoherbisit olarak yüksek etkinliğinin temel nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir.

3.4. Yabancı Ot Türleri Üzerindeki İnhibitör Etki Profili

Sorgoleonun inhibitör etki profili, yabancı ot türleri arasında belirgin farklılıklar sergilemektedir. Einhellig & Souza (1992:6), biyolojik testlerinde 125 µM sorgoleonun *Eragrostis tef* türünün radikül uzamasını önemli ölçüde azalttığını; 10 günlük uygulamalarda 10 µM sorgoleonun *Abutilon theophrasti*, *Datura stramonium*, *Amaranthus retroflexus*, *Setaria viridis*, *Digitaria sanguinalis* ve *Echinochloa crusgalli* gibi yabancı ot türlerini baskıladığını bildirmiştir.

Bansal vd. (2025:6), sorgoleonun çimsi yabancı otlar üzerinde daha belirgin bir etki gösterdiğini bildirmiştir. *Lolium perenne* ssp. multiflorum %77 büyüme azalmasıyla en duyarlı tür olurken, *Digitaria sanguinalis* %32 büyüme azalması göstermiştir. Buna karşılık geniş yapraklı yabancı otlar olan *Abutilon theophrasti* ve *Senna obtusifolia*'da büyüme azalması

sırasıyla %23 ve %20 ile daha düşük düzeyde kalmıştır. Aynı çalışmada sorgoleon uygulamasının buğday çeşitlerinde ölçülebilir bir etki oluşturmadığı bildirilmiş olup, bu bulgu sorgoleonun bazı hedef dışı kültür bitkilerine karşı sınırlı fitotoksisite gösterebileceğine işaret etmektedir.

Doğal bir allelokimyasal olan sorgoleonun 4,6 WP (ıslatılabilir toz) formülasyonu ile yapılan araştırmalar, ürünün geniş yapraklı yabancı otların çimlenme ve sürgün büyümesini %100'e varan oranlarda engelleyebildiğini göstermiştir (Uddin vd., 2013:15). Ayrıca sera şartlarında yapılan post-emergent (çıkış sonrası) uygulamaların, pre-emergent (çıkış öncesi) uygulamalara oranla %20-25 daha yüksek büyüme baskılaması sağladığı ve ana kültür bitkilerine zarar vermeden yüksek selektivite sunduğu tespit edilmiştir (Uddin vd., 2013). Sorgoleonun çevre dostu bir biyoherbisit olarak taşıdığı bu potansiyel, yalnızca saflaştırılmış formülasyonlarla sınırlı kalmayıp doğrudan sorgum bitki ekstraktlarında da kendini göstermektedir. Farklı sorgum çeşitlerinin (ör. Erdurmuş, Gözde 80, Aldarı) yaprak ve tohumlarından elde edilen su ekstraktlarının; semizotu (*Portulaca oleracea*) ve kırmızı köklü horozibiği (*Amaranthus retroflexus*) gibi sorunlu yabancı ot türlerinin çimlenme, kök ve sürgün gelişimini önemli ölçüde gerilettiği bildirilmiştir (Öten vd., 2022:108).

3.5. Çevresel Faktörlerin Sorgoleon Üretimi Üzerindeki Etkisi

Sorgoleon üretimi, çevresel koşullara karşı belirgin bir duyarlılık sergilemektedir. Dayan (2006:346), optimum üretim sıcaklığının 30°C civarında olduğunu; 25°C'nin altı ve 35°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda üretim ve kök gelişiminin ciddi oranda azaldığını bildirmiştir. Işık spektrumu da sorgoleon seviyelerini etkileyen faktörler arasındadır: özellikle mavi ışık (470 nm) maruziyetinin %50'ye varan azalmaya neden olduğu raporlanmıştır. İlginç bir bulguda, komşu yabancı ot türü olan *Abutilon theophrasti* (velvetleaf) kök ekstraktının sorgoleon üretimini artırdığı gözlenmiş; bu durum bitkinin çevresel rekabet koşullarına yanıt olarak alelopatik kapasitesini yükseltebileceğine işaret etmektedir.

Netzly vd. (1988:441), sorgoleona yapısal olarak benzer p-benzoquinonların ve sorgoleon türevlerinin *Striga asiatica* tohumlarının çimlenmesini güçlü biçimde uyardığını göstermiştir. Araştırmacılar, *Striga*'nın sorgumun savunma amacıyla ürettiği bu bileşikleri konakçıya özgü çimlenme sinyalleri olarak kullandığını belirtmiştir. Bu durum, sorgoleonun yalnızca alelopatik ve savunma işlevleriyle değil, aynı

zamanda parazit-konakçı etkileşimleri açısından da biyolojik önem taşıdığını göstermektedir.

3.6. Toprak Mikrobiyomu ile Etkileşim

Sorgoleonun ekosistem düzeyindeki etkileri, toprak bakteriyel topluluk dinamikleri üzerine de uzanmaktadır. Wang vd.(2021:4), saha ve sera koşullarında gerçekleştirdikleri çalışmada sorgoleonun kök çevresindeki bakteriyel topluluk yapısını şekillendirdiğini ve mikrobiyal ağ oluşumunu geciktirdiğini bildirmiştir.

Genetik olarak sorgoleon salgısı azaltılmış sorgum hatlarıyla karşılaştırıldığında, yabani tip bitkilerin rizosfer ve kök çevresi mikrobiyomlarında β -çeşitlilik bakımından anlamlı farklılıklar gözlenmiştir. Ayrıca nitrifikasyonun saha koşullarında yalnızca belirli dönemlerde baskılanması, sorgoleonun toprak azot döngüsü üzerindeki etkisinin zamana ve çevresel koşullara bağlı olduğunu göstermektedir (Wang vd., 2021:6).

Muratova vd. (2009:1035), sorgum kök salgılarındaki oksidaz, peroksidaz ve tirozinaz enzim aktivitelerinin fenantren gibi poliaromatik hidrokarbonların toprakta dönüşümüne katkı sağlayabileceğini göstermiştir. Buna ek olarak, sorgumun rizosferde hem alelopatik etkileşimleri yönlendirebilen hem de mikrobiyal topluluk yapısını ve azot dönüşüm süreçlerini etkileyebilen fonksiyonel bir tür olduğu anlaşılmaktadır (Wang vd., 2021:11).

3.7. Dhurrin ve Sorgoleon: İkili Savunma Sisteminin Karşılaştırmalı Analizi

Sorgumun savunma sistemi, farklı dokularda görev yapan ve birbirini tamamlayan iki temel sekonder metabolit üzerine kuruludur. Dhurrin, bitkinin toprak üstü organlarında otçullara ve patojenlere karşı siyanogenik savunma sağlarken, sorgoleon kök tüylerinden rizosfere salgılanarak rakip bitkilere ve bazı toprak mikroorganizmalarına karşı alelopatik etki göstermektedir (Gleadow & Møller, 2014:160; Wang vd., 2021:7). Bu iki bileşik, biyosentez kökenleri, etki mekanizmaları, hedef organizmaları ve tarımsal önemleri bakımından belirgin farklılıklar göstermesine rağmen, birlikte değerlendirildiğinde sorgumun çevresel streslere ve biyotik baskılara karşı geliştirdiği bütünsel kimyasal savunma mimarisinin temel bileşenlerini oluşturmaktadır (Gleadow & Møller, 2014:167; Weston & Czarnota, 2001:370; Wang vd., 2021:11). Dhurrin ve sorgoleonun fonksiyonel özelliklerinin karşılaştırmalı özeti Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Sorgumda İkili Savunma Stratejisinin Karşılaştırmalı Analizi: Dhurrrin ve Sorgoleonun Fonksiyonel Özellikleri

Özellik	Dhurrrin	Sorgoleon
Kimyasal	Siyanogenik Glikozit	Lipit-bazlı p-benzoquinon
Temel Bölge	Toprak üstü (Yaprak,	Toprak altı (Kök tüylerinden
Savunma Hedefi	Otçul hayvanlar, böcekler ve patojenler	Rakip bitkiler (yabancı otlar) ve bazı mikroorganizmalar
Etki Mekanizması	Siyanogenez: HCN salınımı ile hücrel	PSII inhibisyonu: Elektron iletiminin blokajı + Mitokondriyal
Sentez Dinamiği	İçsel birikir (phytoanticipin); stres anında	Kök tüylerinden rizosfere sürekli salgılanır (eksudat)
Ekolojik Rolü	Kimyasal savunma ve azot	Alelopati: Doğal biyolojik
İslah	Yem güvenliği için	Yabancı ot direnci için
Öncül	L-Tirozin (Amino asit)	Yağ asitleri ve p-
Tarımsal / Biyoherbisit Potansiyeli ve Yem Güvenliği ve İslah Potansiyeli	Herbivor ve zararlı savunması, azot ekonomisinin düzenlenmesi, hayvan beslemede yem güvenliği (HCN toksisitesi) ve moleküler ıslah hedefi	Geniş yapraklı yabancı ot kontrolü, biyoherbisit formülasyonları ve saha uygulamaları

Kaynak: Gleadow & Möller, (2014); Weston & Czarnota (2001); Cook, 2010; Einhellig vd. (1993).

4. FENİLPROPANOİD METABOLİZMASI VE SAVUNMA BİLEŞİKLERİ

Dhurrrin ve sorgoleon, sorgumun önceden sentezlenmiş savunma bileşikleri arasında yer alırken, bitki biyotik ve abiyotik stres koşullarında ilave savunma metabolitleri de üretmektedir. Bu bileşiklerin önemli bir kısmı fenilpropanoid metabolizması üzerinden sentezlenen fenolik asitler, flavonoidler, fitoaleksiner ve tanenlerden oluşmaktadır. Fenilpropanoid yolağı yalnızca antioksidan koruma sağlamakla kalmamakta; aynı zamanda hücre duvarının güçlendirilmesi, patojenlere karşı direnç ve çevresel streslere tolerans gibi çok sayıda savunma mekanizmasının temelini oluşturmaktadır (Xu vd., 2021; Schumaker vd., 2024).

Bitkisel savunma sistemleri yalnızca savunma bileşiklerinin kimyasal özellikleriyle değil, bu bileşiklerin ne zaman üretildikleriyle de şekillenmektedir. Bu açıdan savunma metabolitleri, önceden sentezlenerek dokularda depolanan bileşikler ile yalnızca bir tehdit algılandığında

retilen indkylenebilir bileikler olmak zere iki temel grupta deęerlendirilmektedir. Sorgum da enerji ve kaynak kullanımını optimize etmek amacıyla her iki stratejiyi birlikte kullanmaktadır. Srekli hazır bulundurulan savunma bileikleri hızlı ve etkili bir koruma saęlarken, patojen enfeksiyonu, bcek saldırısı veya evresel stres koullarında indklenen metabolitler savunma kapasitesini glendirmektedir (Gleadow & Mller, 2014:172; Xu vd., 2021:5).

Bu savunma stratejileri sorgumda iki temel metabolit grubuyla temsil edilmektedir:

Phytoanticipinler (nleyici Savunma Bileikleri): Tehdit varlıęından baęımsız olarak nceden sentezlenip depolanan ve bitkinin ilk savunma hattını oluturan bileiklerdir. Dhurrin, sorgumdaki en iyi tanımlanmış phytoanticipin rneklerinden biridir.

Phytoalexinler (İndkylenebilir Savunma Bileikleri): Normal koullarda dk dzeylerde bulunan veya hi sentezlenmeyen, ancak patojen enfeksiyonu, herbivor saldırısı ya da fiziksel yaralanma gibi uyaranlar sonucunda hızla sentezlenen savunma metabolitleridir.

Bu ayırım, sorgumun savunma metabolizmasının organizasyonunu anlamak aısından temel bir ereve sunmaktadır. Dhurrin ve sorgoleon gibi srekli koruma saęlayan bileiklere ek olarak, fenilpropanoid metabolizmasından treyen ok sayıda bileik stres koullarında devreye girerek savunma yanıtını glendirmektedir. Bu blmde sz konusu savunma bileikleri ve biyolojik ilevleri ele alınmaktadır.

4.1. Fenolik Asitler ve Hcre Duvarı Direncinin Biyokimyasal Esasları

Fenolik asitler, sorgumun biyotik ve abiyotik stres etmenlerine karı gelitirdięi savunma sisteminin nemli bileenleri arasında yer almaktadır. Sorgum tanesi ve vejetatif dokularında yaygın olarak bulunan ferulik asit, gallik asit, vanilik asit ve p-kumarik asit gibi fenolik bileikler hem antioksidan koruma saęlamakta hem de hcre duvarının yapısal dayanıklılıęını artırmaktadır (Xu vd., 2021:2). Bu bileikler, hcrelerde stres koullarında biriken reaktif oksijen trlerini (ROS) ntralize ederek oksidatif hasarın sınırlandırılmasına katkıda bulunur (Xu vd., 2021:3). Bunun yanı sıra fenolik asitler, esterleme reaksiyonları ve diferulat apraz baęları aracılıęıyla hcre duvarındaki arabinoksilan matrisiyle btnlemektedir. zellikle ferulik asit ve p-kumarik asit tarafından

oluşturulan bu çapraz bağlar, hücre duvarının mekanik direncini artırarak fungal patojenlerin dokuya penetrasyonunu zorlaştırmakta ve kuraklık ile yüksek sıcaklık gibi çevresel stres koşullarında hücresel bütünlüğün korunmasına yardımcı olmaktadır (Xu vd., 2021:5). Dolayısıyla fenolik asitler, sorgumda hem kimyasal hem de yapısal savunmanın temel bileşenleri olarak işlev görmektedir.

4.2. Sorguma Özgü İndüklenebilir Fitoaleksinler: 3-Deoksantosiyanidinler (3-DXA)

Sorgumun diğer tahıllara kıyasla en dikkat çekici savunma özelliklerinden biri, 3-deoksantosiyanidin (3-DXA) sınıfı flavonoid fitoaleksinleri sentezleyebilmesidir. Bu grupta yer alan luteolinidin ve apigeninidin, sorgumda tanımlanan başlıca 3-DXA bileşikleridir (Xu vd., 2021:3; Ibraheem vd., 2010:915). Patojen enfeksiyonu, mekanik yaralanma ve yüksek UV-B maruziyeti gibi stres koşullarında flavonoid biyosentez yolu aktive edilmekte ve 3-DXA üretimi hızla artmaktadır (Ibraheem vd., 2010:918; Schumaker vd., 2024:3). Diğer birçok fenolik bileşiğin aksine, 3-DXA'lar stres sonrasında de novo sentezlenen indüklenebilir savunma metabolitleri olarak görev yapmakta ve özellikle enfeksiyon bölgelerinde birikerek mantar gelişimini sınırlandırmakta ve bitkinin savunma yanıtını güçlendirmektedir (Ibraheem vd., 2010:925; Schumaker vd., 2024:15).

4.3. Flavonoid Biyosentezi ve Transkripsiyonel Regülasyon

Flavonoidler, fenilpropanoid yolağtan türeyen ve bitkinin stres toleransı ile savunma yanıtlarında önemli görevler üstlenen geniş bir sekonder metabolit grubudur. Bu bileşiklerin biyosentezi, başta kalkon sentaz (CHS) ve kalkon izomeraz (CHI) olmak üzere çeşitli anahtar enzimler tarafından yürütülmektedir. Sorgumda gerçekleştirilen transkriptomik çalışmalar, flavonoid biyosentezinden sorumlu genlerin stres koşullarında MYB, WRKY, NAC ve bHLH gibi transkripsiyon faktörleri tarafından düzenlendiğini göstermektedir (Schumaker vd., 2024:10).

Flavonoid üretiminin bu şekilde sıkı bir genetik kontrol altında olması, bitkinin çevresel koşullara hızlı uyum sağlamasına olanak vermektedir. Özellikle patojen enfeksiyonu, UV-B ışınımı ve oksidatif stres gibi durumlarda flavonoid biyosentezinin artması, savunma kapasitesinin güçlendirilmesine katkı sağlamaktadır (Schumaker vd., 2024:10). Flavonoidler epidermal dokularda birikerek UV ışınlarını absorbe etmekte ve reaktif oksijen türlerinin oluşumunu sınırlandırmaktadır. Böylece

fotosentetik dokular UV kaynaklı oksidatif hasara karşı korunmakta ve hücrel bütünlüğün sürdürülmesine katkı sağlanmaktadır (Falcone Ferreyra vd., 2012:5).

Bu yönüyle flavonoidler, sorgumda yalnızca yapısal fenolik bileşiklerin değil, aynı zamanda indüklenabilir savunma yanıtlarının da önemli bir bileşeni olarak görev yapmaktadır.

4.4. Kondanse Tanenlerin Biyosentezi, Genetik Kontrolü ve Savunma İşlevleri

Sorgumdaki tanenlerin büyük çoğunluğu, flavonoid biyosentez yolunun son ürünleri arasında yer alan kondanse tanenlerden (proantosiyanidinler) oluşmaktadır. Flavan-3-ol birimlerinin polimerizasyonu sonucu meydana gelen bu bileşikler, özellikle dane testa tabakasında birikmekte ve bitkinin biyotik stres etmenlerine karşı savunmasında önemli rol oynamaktadır (Dykes ve Rooney, 2006:237-238). Sorgumda hidrolize olabilir tanenler bulunmamakta olup, tanen profili büyük ölçüde kondanse tanenlerden oluşmaktadır. Bu bileşiklerin birikimi genetik olarak kontrol edilmekte ve baskın B1 ile B2 lokusları pigmente testa oluşumu ve buna bağlı olarak kondanse tanen varlığını belirleyen temel genetik faktörler olarak kabul edilmektedir (Dykes ve Rooney, 2006:237).

Kondanse tanenlerin biyolojik önemi, bitkiye sağladıkları çok yönlü savunma işlevlerinden kaynaklanmaktadır. Güçlü protein bağlama özellikleri sayesinde bitki dokularının sindirilebilirliğini azaltmakta ve böylece herbivorların beslenmesini sınırlandırmaktadır (Schofield vd., 2001:23). Ayrıca tükürük proteinleri ile etkileşerek buruk ve acı bir tat oluşturmakta, bu durum özellikle kuşların taneleri tüketme eğilimini azaltan doğal bir caydırıcılık mekanizması oluşturmaktadır (Dykes ve Rooney, 2006:240).

Bunun yanı sıra kondanse tanenler, polifenolik yapıları sayesinde çeşitli fungal patojenlerin büyümesini ve enfeksiyon gelişimini baskılayabilmekte, mikrobiyal enzim aktivitelerini sınırlandırarak bitkinin savunma kapasitesine katkıda bulunmaktadır. Proteinler ve sindirim enzimleriyle oluşturdukları kompleksler ise herbivor böcekler ve memeliler açısından bitki dokularının besin değerini düşürerek ek bir koruma sağlamaktadır (Schofield vd., 2001:34).

Dolayısıyla kondanse tanenler, sorgumun önceden oluşturulmuş kimyasal savunma sisteminin önemli bileşenleri arasında yer almakta; kuşlar, herbivorlar ve patojenlere karşı eş zamanlı koruma sağlayarak bitkinin ekolojik uyumuna ve tarımsal performansına önemli katkılar sunmaktadır.

5. ÇEVRESEL STRES ETKİLEŞİMLERİ VE METABOLİK DÜZENLEME

Kuraklık stresi, sorgumda büyüme ve fotosentezi sınırlandırmanın yanı sıra siyanogenik metabolizmayı da doğrudan düzenlemektedir. Su kısıtı altında dhurrin düzeyleri ve hidrojen siyanür potansiyeli (HCNp) genel olarak artış gösterse de bu yanıt genotipe göre belirgin farklılıklar sergilemektedir (Wang vd., 2024:7; Sohail vd., 2022:6; Ouma vd., 2023:266). Bu süreçteki metabolik yeniden yapılanma, primer metabolizma ile sekonder savunma yolları arasındaki kaynak dağılımını değiştirerek dhurrin biyosentez genlerinin (*CYP79A1*, *CYP71E1*, *UGT85B1*) transkript düzeylerini modüle etmektedir (Wang vd., 2024:5; Katamreddy vd., 2025:15; bkz. Bölüm 2.1). Bununla birlikte, kuraklığın tetiklediği reaktif oksijen türleri (ROS) hücrel stresle yol açarken, dhurrin birikimi tek başına doğrudan bir antioksidan mekanizma olarak işlev görmemektedir (Sohail vd., 2022:90). Nitekim siyanogenez riskini belirleyen ana unsur transkripsiyonel artıştan ziyade membran bütünlüğünün korunmasıdır (bkz. Bölüm 2.3); kuraklığa duyarlı genotiplerde membran hasarı depolanmış dhurrinin enzimlerle temasını kolaylaştırarak HCN salınımını artırırken, toleranslı genotiplerde korunan membran yapısı kontrolsüz parçalanmayı ve HCN birikimini sınırlandırmaktadır (Katamreddy vd., 2025:17).

5.1. Stres Altında Dhurrin Akümüasyonu ve Transkriptomik Yanıt

Kuraklık stresi, kültür sorgumlarında dhurrin birikimini artırabilmektedir. Ananda vd. (2022:14), su stresi altında kültür sorgumu (*Sorghum bicolor*) ile yabani sorgum türü (*Sorghum macrospermum*) arasında dhurrin metabolizmasının farklı şekilde düzenlendiğini ve *CYP79A1*, *CYP71E1* ile *UGT85B1* genlerinin *S. bicolor*'da daha yüksek düzeylerde ifade edildiğini göstermiştir. Aynı çalışmada, kültür sorgumunda dhurrin içeriğinin stres koşullarında arttığı, buna karşılık yabani sorgum türlerinde düşük düzeylerde kaldığı bildirilmiştir. Benzer şekilde O'Donnell vd. (2013:5), azot mevcudiyeti ve yüksek sıcaklıkla

birleşen su stresinin dhurbin birikimini sinerjik olarak artırdığını göstermiştir. Bu artışın yabancı sorgum türlerinde (*Sorghum laxiflorum*) daha sınırlı kalması, kültür formlarının stres koşullarında savunma metabolizmasına daha fazla kaynak ayırdığını düşündürmektedir.

Kuraklık altında dhurbin birikiminin işlevi uzun süre antioksidan savunma ile ilişkilendirilmiş olsa da, güncel bulgular bu görüşü tam olarak desteklememektedir. Sohail vd. (2022:10), kuraklık sırasında artan reaktif oksijen türleri (ROS) ile dhurbin birikimi arasındaki ilişkiyi incelemiş ve yaprak dhurbin düzeyleri yükselmesine rağmen ROS birikiminin hem yabancı tip bitkilerde hem de dhurbin eksik mutantlarda arttığını göstermiştir. Araştırmacılar, dhurbin artışının oksidatif stresi azaltmadığı ve ROS temizleyici bir antioksidan mekanizma olarak işlev görmediği sonucuna varmıştır. Bu bulgular, kuraklık koşullarında gözlenen dhurbin birikiminin doğrudan bir antioksidan yanıt olmaktan ziyade, savunma metabolizması, azot ekonomisi ve stres adaptasyonu arasındaki karmaşık ilişkilerin sonucu olduğunu düşündürmektedir.

5.2. Membran Stabilitesi: Siyanogenezin "Kilidi"

Katamreddy vd. (2025), kuraklık altında HCN oluşumunun yalnızca dhurbin biyosentezindeki değişimlerle açıklanamayacağını, membran bütünlüğünün korunmasının da siyanogenezin düzenlenmesinde belirleyici bir faktör olduğunu göstermiştir (Katamreddy vd., 2025:17). Çalışmada kuraklığa toleranslı ICSV 93046 genotipinde HCN potansiyelinin kuraklık altında daha düşük düzeylerde kaldığı, buna karşılık kuraklığa duyarlı ICSR 14001 genotipinde belirgin biçimde arttığı belirlenmiştir (Katamreddy vd., 2025:5). Araştırmacılar, bu farklılığın membran hasarı, dhurbin metabolizması ve stres yanıtlarıyla ilişkili transkriptomik değişikliklerle bağlantılı olduğunu bildirmiştir (Katamreddy vd., 2025:15).

Dhurbin kaynaklı toksisitenin ortaya çıkması yalnızca dhurbin miktarına değil, aynı zamanda bu bileşiğin hücre içerisinde uygun kompartımanlarda tutulabilmesine de bağlıdır. Sorgumda dhurbin biyosentezi endoplazmik retikulum ile ilişkili enzim sistemleri tarafından gerçekleştirilmekte, ardından özel taşıma mekanizmaları aracılığıyla vakuole aktarılıp burada depolanmaktadır (Darbani vd., 2016:2). Saunders & Conn (1978), izole vakuoller üzerinde yaptıkları çalışmada dhurbinin sorgum hücrelerinde başlıca vakuollerde biriktiğini ve protoplastlardaki dhurbin miktarının vakuollerde ölçülen miktarla büyük ölçüde örtüştüğünü göstermiştir (s.

156). Vakuoler depolama, dhurrinin sitoplazmadaki potansiyel öz toksik etkilerini sınırlandıran temel koruyucu mekanizmalardan biridir (Saunders & Conn, 1978:156; Darbani vd., 2016: 5).

Bitki hücrelerinde dhurrin ile onu hidrolize eden β -glukosidaz (dhurrinaz) enziminin normal koşullarda farklı hücresel kompartımanlarda bulunması, kontrolsüz hidrojen siyanür (HCN) oluşumunu engellemektedir (Saunders & Conn, 1978:156). Hücresel bütünlüğün korunması, bu mekânsal ayrışmanın sürdürülebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Doku hasarı, mekanik yaralanma veya çevresel stres koşullarında kompartımanlaşmanın bozulması, dhurrin ile hidrolitik enzimlerin temasını artırarak siyanogenezin tetiklenmesine neden olabilmektedir (Rosati vd., 2019:2).

Kuraklık stresi, membran lipidlerinin peroksidasyonu ve zar bütünlüğünün bozulması yoluyla bu koruyucu kompartımanlaşmayı olumsuz etkileyebilen önemli bir abiyotik stres faktörüdür. Katamreddy vd. (2025), kuraklığa duyarlı genotiplerde stres kaynaklı membran hasarının vakuollerde depolanan dhurrinin sitoplazmaya sızmasına olanak sağlayarak HCN oluşumunu artırabileceğini, buna karşılık kuraklığa toleranslı genotiplerde membran koruma ve yeniden yapılanma mekanizmalarının bu süreci sınırlandırdığını ileri sürmüştür (Katamreddy vd., 2025:16). Bu nedenle membran stabilitesinin korunması yalnızca hücresel su dengesinin sürdürülmesi açısından değil, aynı zamanda dhurrinin güvenli biçimde vakuollerde tutulması ve kontrolsüz HCN oluşumunun sınırlandırılması açısından da önem taşımaktadır. Tonoplasta lokalize SbMATE2 taşıyıcısının dhurrinin vakuoler sekestrasyonunda görev yaptığı gösterilmiş olup, bu durum vakuoler depolamanın sorgumda siyanogenik metabolizmanın düzenlenmesinde merkezi bir rol oynadığını ortaya koymaktadır (Darbani vd., 2016:5).

Katamreddy vd. (2025) tarafından elde edilen transkriptomik ve WGCNA bulguları, membran koruma ile ilişkili genlerin kuraklığa toleranslı genotiplerde daha etkin çalıştığını göstermektedir (Katamreddy vd., 2025:12). Bu bulgular, membran hasarının sınırlandırılmasının dhurrinin sitoplazmaya salınmasını azaltarak HCN oluşumunu baskılayabileceğini ve membran stabilitesinin kuraklık koşullarında siyanogenik toksisiteyi etkileyen önemli fizyolojik bileşenlerden biri olduğunu ortaya koymaktadır (Katamreddy vd., 2025:17). Dolayısıyla kuraklık altında HCN oluşumunu belirleyen temel unsur yalnızca dhurrin

miktarı değil, aynı zamanda dhurrin ile hidrolitik enzimler arasındaki hücrel ayrışmanın korunabilmesidir.

5.3. Stres Altında Azotun Dinamik Yeniden Dağılımı ve Dhurrin Döngüsü

Dhurrin, yapısında yaklaşık %14 oranında azot barındıran ve sentezi önemli ölçüde enerji gerektiren bir siyanogenik glikozittir (Møller, 2010:339). Bu nedenle dhurrin, yalnızca bir savunma metaboliti olarak değil, aynı zamanda bitkinin azot ekonomisinde görev alan dinamik bir rezervuar olarak da değerlendirilmektedir (Gleadow & Møller, 2014:167). Kuraklık stresi şiddetlendiğinde bitki, mevcut kaynaklarını yeniden düzenleyerek dhurrinin geri dönüşümünü artırabilmektedir. Kuraklık koşullarında glutatyon transferaz (GSTL1) ve nitrilaz (NITB2) aktivitelerindeki artış, dhurrinin parçalanmasıyla açığa çıkan azotun yeniden metabolizmaya kazandırıldığını göstermektedir (Bjarnholt vd., 2018:1117; Gleadow & Møller, 2014:341). Bu süreç sonucunda oluşan amonyak, kuraklık toleransında görev alan osmoprotektanların (ör. prolin) ve çeşitli stres proteinlerinin sentezinde kullanılabilir. Dhurrin döngüsüne katılan glutatyon transferazlar (GST'ler) ve nitrilazlar, siyanogenik glikozitlerin yalnızca savunma amacıyla sentezlenmediğini, aynı zamanda etkili bir azot geri dönüşüm mekanizmasının parçası olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle GST aracılı geri dönüşüm yolunun aktif olduğu dönemlerde dhurrinden elde edilen azotun amino asit sentezi, büyüme ve gelişme süreçlerinde yeniden kullanıldığı gösterilmiştir (Bjarnholt vd., 2018:1119). Bu bulgular, dhurrinin kuraklık koşullarında yalnızca siyanogenik savunmada görev almadığını, aynı zamanda bitkinin sınırlı azot kaynaklarını korumasına ve stres altında metabolik esnekliğini sürdürmesine katkı sağlayan önemli bir azot rezervuarı olarak işlev gördüğünü ortaya koymaktadır.

5.4. Çevresel Faktörlerin Sinerjik Etkisi

Kuraklık ve su kısıtı, sorgumda dhurrin metabolizmasını önemli ölçüde etkilemektedir. Çeşitli çalışmalar, su stresi altında sürgün dokularındaki dhurrin konsantrasyonunun artabildiğini ve bitki azotunun daha büyük bir bölümünün bu siyanogenik glikozide tahsis edildiğini göstermiştir (O'Donnell vd., 2013:89; Rosati vd., 2019:2). Dhurrinin yalnızca savunma işlevi görmediği, aynı zamanda yeniden kullanılabilir bir azot deposu olarak görev yaptığı ve stres koşullarında bitkinin azot ekonomisine katkıda bulunabileceği düşünülmektedir (Gleadow & Møller, 2014:176;

Rosati vd., 2019:9). Kuraklık koşullarında dhurrin düzeylerindeki değişimlerin büyüklüğü, çevresel koşulların ve bitkinin fizyolojik durumunun etkisiyle değişebilmektedir. Özellikle azot mevcudiyeti, gelişim dönemi ve stresin şiddeti gibi faktörlerin dhurrin birikimini etkilediği bildirilmektedir (Gleadow & Møller, 2014:172; O'Donnell vd., 2013:89). Ayrıca dhurrin sentezinin çevresel koşullara duyarlı olduğu ve kuraklık altında siyanogenik metabolizmanın yeniden düzenlenebildiği gösterilmiştir (O'Donnell vd., 2013:83; Rosati vd., 2019:2). Bu nedenle kuraklık koşullarında dhurrin düzeylerinde gözlenen değişimler yalnızca savunma yanıtlarının bir sonucu olarak değil, aynı zamanda bitkinin azot kullanımı, kaynak tahsisi ve stres adaptasyonu ile ilişkili metabolik düzenlemelerin bir parçası olarak değerlendirilmelidir (Gleadow & Møller, 2014:174; Rosati vd., 2019:10).

5.5. Sekonder Metabolitler Arasında Karbon ve Azot Akışının Koordinasyonu

Sorgumun sekonder metabolitleri birbirinden bağımsız biyokimyasal sistemler olarak değil, ortak karbon ve azot kaynaklarını paylaşan bütünsel metabolik ağlar olarak değerlendirilmektedir. Bu ağ içerisinde özellikle dhurrin metabolizması, bitkinin azot ekonomisinde önemli bir görev üstlenmektedir. Dhurrin yalnızca bir savunma molekülü değil, aynı zamanda gelişimsel süreçlerde yeniden kullanılabilen bir azot deposu olarak da işlev görmektedir (Møller, 2010:340; Bjarnholt vd., 2018:1111; Gleadow & Møller, 2014:165).

Yapılan çalışmalar, büyümenin ilerleyen dönemlerinde dhurrinin kontrollü biçimde parçalanarak azotun yeniden bitki metabolizmasına kazandırıldığını göstermektedir. Dhurrin döngüsüne katılan glutatyon transferazlar (GST'ler) ve nitrilazlar, siyanogenik glikozitlerin yalnızca savunma amacıyla sentezlenmediğini, aynı zamanda azot geri dönüşüm mekanizmasının bir bileşeni olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle GST aracılı geri dönüşüm yolunun aktif olduğu dönemlerde dhurrinden elde edilen azotun amino asit sentezi, büyüme ve gelişme süreçlerinde yeniden kullanıldığı gösterilmiştir (Bjarnholt vd., 2018:1115).

Fenilpropanoid metabolizması ile dhurrin biyosentezi arasındaki ilişki de sekonder metabolitler arası kaynak paylaşımının önemli bir örneğini oluşturmaktadır. Haskins ve Gorz (1986:287), yüksek leukoantosiyanın birikimine sahip sorgum genotiplerinde dhurrin miktarının daha düşük olduğunu bildirmiştir. Bu gözlem, savunma metabolitleri arasında ortak

öncüllerin paylaşılması nedeniyle kaynak tahsisinde bir denge bulunduğunu düşündürmektedir. Bununla birlikte bu ilişkinin moleküler mekanizması henüz tam olarak açıklığa kavuşmamıştır ve konu güncel araştırmaların odak noktalarından biridir (Haskins & Gorz, 1986:288).

Kuraklık gibi stres koşullarında bitki kaynak kullanımını yeniden düzenlemektedir. Dhurrin metabolizmasının parçalanma ürünlerinden elde edilen azotun stres proteinleri ve osmoregülatör bileşiklerin sentezinde kullanılabildiği bildirilmektedir. Bu nedenle dhurrin, savunma işlevinin yanı sıra değişken çevresel koşullarda metabolik esnekliği destekleyen bir azot rezervuarı olarak değerlendirilmektedir (Bjarnholt vd., 2018:1117; Gleadow & Möller, 2014:167).

Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde sorgumun sekonder metabolizmasının yalnızca toksisite veya savunma perspektifinden değil, aynı zamanda karbon ve azot ekonomisini yöneten entegre bir adaptasyon sistemi olarak ele alınması gerektiği anlaşılmaktadır. Gelecekte gerçekleştirilecek metabolomik ve sistem biyolojisi çalışmaları, dhurrin, fenilpropanoidler, tanenler ve sorgoleon arasındaki metabolik bağlantıların daha ayrıntılı biçimde ortaya konulmasına katkı sağlayacaktır (Gleadow & Möller, 2014:170).

Genel olarak değerlendirildiğinde sorgumun sekonder metabolizması, birbirinden bağımsız savunma yollarından oluşan bir yapı değil; karbon ve azot kaynaklarının gelişimsel gereksinimler ile çevresel koşullara göre yeniden dağıtıldığı bütünlük bir adaptasyon ağıdır. Dhurrin, fenilpropanoidler, tanenler ve sorgoleon arasındaki ilişkilerin daha ayrıntılı olarak ortaya konulması, gelecekteki metabolomik ve sistem biyolojisi çalışmalarının önemli araştırma alanlarından birini oluşturmaktadır (Gleadow & Möller, 2014:170).

6. BESLENME VE YEM GÜVENLİĞİ: TANENLERİN SİNDİRİM VE HCN'İN TOKSİSİTE ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Sorgumun bir yem bitkisi olarak besin değeri yalnızca içerdiği ham protein ve karbonhidrat miktarına değil, aynı zamanda bu besin maddelerinin biyoyararlanımını etkileyen antinütrisyonel bileşiklerin düzeyine de bağlıdır. Hayvan besleme açısından sorgum sekonder metabolitleri iki temel risk grubu oluşturmaktadır. Siyanogenik glikozitler, özellikle dhurrin, bitki dokularının zarar görmesiyle hızla parçalanarak hidrojen siyanür (HCN) açığa çıkarmakta ve ruminantlarda akut

toksositeye, hatta ölümcül zehirlenmelere neden olabilmektedir (Ouma vd., 2023:260; Wang vd., 2024:11; Giantin vd., 2024:3). Buna karşılık kondanse tanenler, proteinler ve sindirim enzimleriyle kompleks oluşturarak protein ve diğer besin maddelerinin sindirilebilirliğini azaltmakta, yemden yararlanmayı düşürmekte ve hayvansal performansı olumsuz etkileyebilmektedir (Kaufman vd., 2012:9; Mahmood vd., 2014:220).

Sorgum kaynaklı siyanür zehirlenmesi riskinin değerlendirilmesinde kullanılan temel ölçüt, bitki dokusunda depolanan toplam siyanogenik kapasiteyi ifade eden Hidrojen Siyanür Potansiyelidir (HCNp). HCNp değerleri, yem materyalinin hayvan sağlığı açısından oluşturduğu riski derecelendirmek ve otlatma/yemleme kararlarını yönlendirmek amacıyla belirli güvenlik eşikleri üzerinden sınıflandırılmaktadır (Vetter, 2000:23; Gruss vd., 2023:2). HCNp yalnızca genotipe bağlı bir özellik olmayıp bitkinin gelişim dönemiyle de önemli ölçüde değişmektedir. Farklı sorgum çeşitlerinde gerçekleştirilen araştırmalarda HCN düzeylerinin genç büyüme evrelerinde daha yüksek olduğu, bitki boyu arttıkça ise belirgin biçimde azaldığı gösterilmiştir (Öten, 2017:214). Bu nedenle sorgumun yem olarak kullanımında yalnızca genotip seçimi değil, hasat zamanı ve bitkinin gelişme dönemi de siyanür riskinin yönetilmesinde kritik öneme sahiptir. Literatürde yaygın kabul gören HCNp risk sınıflandırması ve buna bağlı yemleme önerileri Tablo 3'te özetlenmiştir.

HCNp değerleri, sorgum materyalinin potansiyel siyanür riski hakkında önemli bilgiler sağlamakla birlikte, gerçek toksisite düzeyi yalnızca toplam siyanogenik kapasiteye bağlı değildir. Siyanogenik glikozit düzeyleri; bitkinin gelişim dönemi, bitki dokusu, genotipi ve çeşitli çevresel koşullardan etkilenebilmektedir (Vetter, 2000:25). Ayrıca bitki yaşı, kuraklık stresi, don olayları ve azotlu gübreleme gibi faktörler dhurrin içeriğini ve buna bağlı olarak HCN riskini değiştirebilmektedir (Gruss vd., 2022:3). Bunun yanında otlatma, kuru ot, yeşil yem veya silaj şeklindeki kullanım yöntemleri de siyanür toksisitesi riskinin ortaya çıkmasında etkili olabilmektedir (Gruss vd., 2022:4). Bu nedenle HCNp sınıflandırmaları, yem güvenliği değerlendirmelerinde potansiyel riski öngörmek amacıyla kullanılan pratik bir araç olarak kabul edilmekte ve uygun risk yönetimi stratejilerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır (Gruss vd., 2022:5; Vetter, 2000:31).

Tablo 3. Sorgumda Hidrojen Siyanür Potansiyeline (HCNp) Göre Yem Güvenliği Sınıflandırması ve Yönetim Önerileri

HCNp	Güvenlik Durumu	Uygulama Önerisi
0-200	Güvenli	Her türlü hayvan beslemede sınırsız kullanılabilir.
200-500	Şüpheli / Dikkatli	Aç hayvanlara verilmemeli, diğer yemlerle karıştırılmalıdır.
500-750	Tehlikeli (Kritik Eşik)	Akut zehirlenme riski yüksektir; otlatma yapılmamalıdır.
> 750	Çok Yüksek Risk	Öldürücü düzeyde toksiktir; yeşil ot olarak kesinlikle tüketirilmemeli, soldurma değerlendirilmelidir değerlendirilmelidir.

Kaynak: Vetter (2000) ve Gruss vd. (2023) esas alınarak yazar tarafından uyarlanmıştır.

6.1. Dhurrin Stabilitesi ve Rumen Ortamındaki Dinamikleri

Hasat edilen veya kurutulan sorgum dokularında siyanür riskinin tamamen ortadan kalktığı yönündeki yaygın algı güncel bulgularla sorgulanmaktadır. Gruss vd. (2023:1) tarafından yürütülen stabilite deneyleri, dhurrinin kurutulmuş sorgum dokularında en az 60 gün boyunca stabil kaldığını göstermiştir. Ayrıca araştırmacılar, kurutulmuş dokuların yeniden hidrasyonu sonrasında HCN'nin yeniden açığa çıkabildiğini ortaya koymuşlardır. Bu bulgular, kuru ot olarak depolanan sorgum materyalinin dahi potansiyel bir siyanür kaynağı olmaya devam edebileceğini göstermektedir (Gruss vd., 2023:4).

Dhurrinaz enzimi bitki dokusu kurduğunda inaktif hale gelse de, hayvanın tüketimi sırasında tükürük ve rumen sıvısı ile temas ettiğinde saniyeler içinde yeniden aktive olmaktadır. Rumen fizyolojisini taklit eden ortamlarda gerçekleştirilen analizlerde, dhurrin içeren kuru dokuların nemlenmesini takiben HCN salınımının ilk 15-30 dakika içerisinde zirve (pik) yaptığı saptanmıştır. Örneğin Katamreddy (2024:6) tarafından ölçülen 512 ppm'lik HCNp değeri, emniyetli kabul edilen 200 ppm eşiğinin yaklaşık 2,5 katı olup akut rumen zehirlenmeleri için ciddi bir potansiyel taşımaktadır.

6.2. Tanenlerin Protein ve Nişasta Sindirilebilirliği Üzerindeki İnhibitör Etkisi

Sorgum tanesinin perikarp ve testa dokularında biriken kondanse tanenler (proantosiyanidinler), hayvan beslemede önemli antinütrisyonel faktörler arasında yer almaktadır (Dykes & Rooney, 2006:242). Tanenlerin

sindirim üzerindeki olumsuz etkileri temel olarak iki mekanizma ile açıklanmaktadır.

Protein bağlama ve çöktürme: Kondanse tanenler, proteinlerle hidrojen bağları ve hidrofobik etkileşimler yoluyla kompleksler oluşturabilmektedir (Adetunji vd., 2015:226). Bu komplekslerin oluşumu, proteinlerin sindirim enzimleri tarafından parçalanmasını güçleştirmekte ve sonuç olarak protein sindirilebilirliğini azaltmaktadır. Ayrıca tanenlerin protein, karbonhidrat ve minerallerle bağlanabilmesi besin maddelerinin biyoyararlanımını olumsuz etkileyebilmektedir (Dykes & Rooney, 2006:246).

Enzim inhibisyonu: Kondanse tanenler sindirimde görev alan enzimlerle etkileşime girerek özellikle α -amilaz aktivitesini baskılayabilmektedir. Yüksek tanenli sorgumlarda α -amilaz inhibisyonunun belirgin düzeyde arttığı ve buna bağlı olarak nişasta parçalanmasının sınırlandığı gösterilmiştir (Adetunji vd., 2015:227). Bu durum nişasta sindirilebilirliğinin azalmasına, enerji kullanım etkinliğinin düşmesine ve yemden yararlanmanın olumsuz etkilenmesine neden olabilmektedir (Dykes & Rooney, 2006:245; Adetunji vd., 2015:228).

Sonuç olarak yüksek tanen içeriği, protein ve enerji kullanım etkinliğini azaltarak yem değerlendirme değerinin düşmesine ve hayvansal performansın olumsuz etkilenmesine yol açabilmektedir (Dykes & Rooney, 2006:247).

6.3. Biyosentetik Rekabet: Dhurrin ve Leukoantosiyanidin (LAC) Etkileşimi

Sorgum ıslahında sekonder metabolitler arasındaki ilişkilerin birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Leukoantosiyanidin (LAC), kondanse tanen biyosentezinin ara ürünlerinden biri olup genotipler arasında önemli düzeyde farklılık gösterebilmektedir. Haskins ve Gorz (1986), sorgum yapraklarında LAC içeriğinin genetik olarak kontrol edildiğini ve farklı populasyonlarda geniş varyasyon gösterdiğini bildirmiştir. Ayrıca yüksek LAC düzeylerinin tanen birikimiyle ilişkili olduğu belirtilmektedir (Haskins & Gorz, 1986:288).

Bununla birlikte yüksek tanen içeriği her zaman üstün yem kalitesi anlamına gelmemektedir. Kondanse tanenler proteinler, karbonhidratlar ve minerallerle etkileşime girerek bu besin maddelerinin sindirilebilirliğini azaltabilmekte ve yemden yararlanma düzeyini olumsuz

etkileyebilmektedir (Dykes & Rooney, 2006:246). Ayrıca tanenlerin α -amilaz gibi sindirim enzimlerinin aktivitesini baskılayarak nişasta kullanımını sınırlandırabildiği gösterilmiştir (Adetunji vd., 2015:228).

Bu nedenle sorgum ıslahında yalnızca düşük hidrojen siyanür potansiyeline (HCNp) sahip genotiplerin seçilmesi yeterli değildir. Siyanogenik potansiyel ile tanen içeriğinin birlikte değerlendirilmesi, hem yem güvenliği hem de besin maddelerinden yararlanma açısından daha dengeli genotiplerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu nedenle sorgum kaynaklı siyanür toksisitesi yalnızca bitkideki dhurrin miktarına değil, dhurrinin serbest HCN'ye dönüşme potansiyeline ve hayvanın maruziyet koşullarına da bağlıdır.

6.4. Yem Yönetim Stratejileri ve Toksisiteyi Azaltma Yöntemleri

Sorgumun yem olarak kullanımında ortaya çıkan riskler yalnızca bitkinin genotipik yapısına değil; yetiştirme koşullarına, hasat evresine ve yem işleme tekniklerine de bağlıdır. Uygun yönetim stratejileri ile hem HCN toksisitesi hem de tanenlerin antinütrisyonel etkileri azaltılabilmektedir.

Dengeli Rasyon Karışımı ve PEG Kullanımı: Tanenlerin protein bağlama etkisini azaltmak amacıyla rasyonlara polietilen glikol (PEG) gibi tanen bağlayıcı ajanlar eklenebilmektedir. PEG'nin tanenlere proteinlerden daha yüksek afinite gösterdiği, oluşmuş tanen-protein komplekslerini parçalayabildiği veya yeni kompleks oluşumunu engelleyebildiği bildirilmiştir. Bu nedenle PEG uygulaması, yüksek tanenli yemlerde besin maddelerinin yararlanılabilirliğini artırabilmektedir (Makkar, 2003:252).

Hasat Zamanlamasının İdeal Ayarlanması: Dhurrin biyosentezinden sorumlu genlerin özellikle genç ve aktif büyüyen dokularda yüksek düzeyde ifade edildiği, bitki olgunlaştıkça ise bu genlerin ekspresyonunun azaldığı belirlenmiştir (Gleadow vd., 2021:15). Buna karşılık çiçeklenme sonrasında dhurrin geri dönüşümü ve azotun yeniden mobilizasyonu ile ilişkili genlerin ekspresyonunda artış gözlenmektedir (Gleadow vd., 2021:17). Bu nedenle çiçeklenme sonrası dönem, siyanogenik riskin azaldığı ve yem amaçlı kullanım açısından daha uygun hasat dönemlerinden biri olarak değerlendirilmektedir (Gleadow vd., 2021:18).

Hasat Sonrası İşleme ve Siyanür Riskinin Azaltılması: Bitki dokusunun parçalanmasıyla normal koşullarda ayrı kompartımanlarda bulunan dhurrin ve hidroliz enzimleri temas etmekte, bunun sonucunda hidrojen

siyanür (HCN) açığa çıkmaktadır (Saunders & Conn, 1978:157; Gleadow & Møller, 2014:162). Hasat edilen materyalin soldurulması ve silaj yapılması, siyanogenik potansiyeli düşürmek amacıyla yaygın uygulanan yönetim stratejileridir. Bununla birlikte Gruss vd. (2023:1-2), kurutulmuş dokularda dhurrinin en az 60 gün boyunca kimyasal stabilitesini koruduğunu ve materyalin rehidrasyonu (ıslanması/yeniden nemlenmesi) durumunda β -glukozidaz aktivitesinin tekrar tetiklenerek masif HCN salınımına yol açtığını saptamıştır. Bu durum, soldurma ve ensileme süreçlerinde sadece kurutmanın yeterli olmadığını, yem güvenliğinin sağlanması için nem kontrolünün de kritik bir parametre olduğunu göstermektedir.

6.5. Tanenlerin Çift Yönlü Yapısı: Ekolojik Savunma vs. Besleme Değeri

Tanenler hayvan besleme açısından yüksek düzeylerde bulunduklarında protein sindirilebilirliğini azaltan antinütrisyonel bileşikler olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, düşük ve orta düzeylerde bulunan kondanse tanenlerin rumende protein parçalanmasını sınırlandırarak proteinlerin ince bağırsağa ulaşmasına katkı sağlayabildiği bildirilmektedir. Buna karşılık bitkinin doğal ortamındaki başarısı açısından tanenler; herbivorlara, kuşlara ve çeşitli patojenlere karşı önemli bir savunma mekanizması oluşturmaktadır. Bu nedenle kondanse tanenler, sorgumda hem besleme değerini etkileyen hem de ekolojik adaptasyonu güçlendiren çift yönlü sekonder metabolitler olarak değerlendirilmektedir (Dykes & Rooney, 2006:246).

Tanenlerin ekolojik savunma açısından sağladığı başlıca avantajlar aşağıda özetlenmiştir:

Zararlı ve Kuş Caydırıcılığı: Kondanse tanen içeren sorgum genotipleri kuş zararına karşı daha yüksek dayanıklılık göstermektedir. Özellikle yüksek tanen içeren Tip III sorgumların kuşlar tarafından daha az tercih edildiği ve tanenlerin sorgumda doğal bir savunma mekanizması olarak işlev gördüğü bildirilmektedir (Dykes & Rooney, 2006:237).

Patojen ve Dane Küfü Direnci: Yüksek proantosiyanidin ve diğer fenolik bileşik içeriklerine sahip sorgum genotipleri dane küfü (grain mold), fungal enfeksiyonlar ve diğer biyotik streslere karşı daha yüksek dayanıklılık gösterebilmektedir. Ayrıca biyotik streslere dirençli sorgum çeşitlerinde proantosiyanidin düzeylerinin daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Dicko vd., 2005:2673). Bunun yanında yüksek tanen içeren

sorgumların dane küfö ve dane bozulmasına karşı daha dayanıklı olduđu belirtilmektedir (Dykes & Rooney, 2006:240).

Antioksidan Etki: Kondanse tanenler güçlü antioksidan özellik göstermekte olup, tanenli sorgum genotipleri diğeri sorgum tiplerine göre daha yüksek antioksidan aktiviteye sahiptir. Tanelerde bulunan proantosiyanidinler ve diğeri fenolik bileşikler serbest radikallerin etkisini azaltabilmekte ve bitkinin çevresel streslere karşı dayanıklılığına katkı sağlayabilmektedir (Dykes & Rooney, 2006:246; Xu vd., 2021:5).

Bu durum, sorgum ıslahında ve üretim sistemlerinde "sıfır tanen" hedeflemek yerine, ekolojik koruma ile hayvan besleme gereksinimleri arasında denge kuran optimum tanen düzeyine sahip genotiplerin geliştirilmesinin daha uygun bir yaklaşım olduğunu göstermektedir (Dykes & Rooney, 2006:247).

Dhurrin, sorgoleon ve fenilpropanoid kökenli bileşikler sorgumun çevresel koşullara uyumunda önemli avantajlar sağlamakla birlikte, bu metabolitlerin yüksek düzeylerde birikimi yem kalitesi ve hayvan sağlığı açısından çeşitli sınırlamalar oluşturabilmektedir. Bu nedenle modern sorgum ıslahında temel hedef, savunma kapasitesini korurken yem güvenliği ve besleme değerini olumsuz etkileyen metabolit düzeylerini optimize etmektir.

7. BİYOTEKNOLOJİK YAKLAŞIMLAR VE GENOM DÜZENLEME STRATEJİLERİ

Sorgumda dhurrin, bitkinin stres savunmasında anahtar rol oynarken, hayvan beslemede siyanür toksisitesi riski yaratan temel bir kalite kısıtıdır (Gleadow & Möller, 2014:157). Geleneksel ıslah çalışmaları düşük HCN potansiyelli çeşitlerin geliştirilmesinde kısmi başarı sağlasa da dhurrin birikiminin çevresel koşullardan güçlü düzeyde etkilenmesi bu yaklaşımı sınırlandırmaktadır (Emendack vd., 2025:2). Son yıllarda gelişen genom düzenleme ve moleküler ıslah yaklaşımları, dhurrin biyosentez yolağının ve metabolon kompleksinin (bkz. Bölüm 2.1) doğrudan hedeflenerek daha güvenli yem materyallerinin geliştirilmesine olanak tanımıştır (Gleadow & Möller, 2014:160; Obata, 2019:12). Bununla birlikte dhurrin, yalnızca toksisiteyle ilişkili bir bileşik olmayıp azot metabolizması ve savunma ağlarında da işlev üstlendiğinden, uygulanacak genetik müdahalelerin bitki büyümesi, verim ve stres toleransı üzerindeki olası maliyetleri dikkatle değerlendirilmelidir (Gleadow & Möller, 2014:170; Emendack vd., 2025:3).

7.1. Antisens RNA Teknolojisi ve CYP79A1 Geninin Susturulması

Pandey vd. (2019) tarafından yürütülen çalışmada, dhurrim biyosentezinin ilk basamağında görev yapan CYP79A1 geninin antisens RNA yaklaşımıyla baskılanması sonucunda transgenik sorgum hatlarında hidrojen siyanür düzeyinin yabani tipe göre önemli ölçüde azaltıldığı gösterilmiştir. T3 generasyonunda transgenik hatlarda HCN düzeyleri 62.9-76.2 µg/g arasında değişirken, kontrol bitkilerinde bu değer 221.4 µg/g olarak belirlenmiş ve yaklaşık %65-72 düzeyinde bir azalma sağlanmıştır (Pandey vd., 2019:8). Önemli olarak, HCN düzeyindeki bu azalmaya rağmen yem ve tane verimi bileşenleri açısından belirgin agronomik olumsuzluklar gözlenmemiştir (Pandey vd., 2019:10). Antisens yöntemiyle elde edilen bu sonuçlar, sorgumda siyanogenik potansiyelin azaltılmasının mümkün olduğunu göstermekte ve CRISPR/Cas9 gibi yeni nesil genom düzenleme teknolojilerinin bu amaçla kullanılabileceğine işaret etmektedir (Yin vd., 2017:5; Katamreddy vd., 2025:18).

7.2. Dhurrim-İçermeyen (tcd) Mutantlar ve "Azot Bedeli" Analizi

Emendack vd. (2025) ve Kumari vd. (2025), dhurrimless (*dhurrimless*) mutant hatlarda yolağın kapatılmasının bitkide belirgin bir "azot bedeli" yarattığını ve primer metabolizmada geniş çaplı bir yeniden programlanmaya (*metabolic reprogramming*) yol açtığını saptamıştır. Dhurrim sadece bir savunma molekülü değil, aynı zamanda dinamik bir azot depolama havuzu olduğundan; sentezlenemediği durumlarda serbest amino asit dengeleri değişmekte ve azot metabolizması olumsuz etkilenmektedir.

Dhurrim biyosentez yolunda görev alan genlerde oluşturulan mutasyonlar, sorgumda siyanogenik potansiyelin azaltılmasına yönelik biyoteknolojik yaklaşımların sonuçlarını değerlendirme olanağı sağlamıştır. Bu kapsamda Blomstedt vd. (2011) tarafından geliştirilen tcd1 (totally cyanide deficient 1) mutantında, dhurrim biyosentezinin ilk basamağında görev yapan CYP79A1 genindeki P414L mutasyonu nedeniyle dhurrim sentezi tamamen ortadan kaldırılmış ve bitkiler acyanogenik hale getirilmiştir. Buna rağmen mutant bitkiler genel olarak normal gelişim göstermiş, yalnızca erken fide döneminde hafif büyüme geriliği gözlenmiştir (Blomstedt vd., 2011:6).

Bu mutantlar, dhurrimin yalnızca siyanür kaynağı olarak değil, aynı zamanda bitki metabolizmasında işlev gören çok yönlü bir bileşik olduğunu ortaya koymuştur. Dhurrimin parçalanması sırasında amonyak ve

4-hidroksifenilasetik asit gibi büyüme ile ilişkili bileşiklerin oluştuğu ve bu metabolitlerin özellikle erken gelişme dönemlerinde rol oynayabileceği belirtilmiştir (Blomstedt vd., 2011:8).

Daha yakın tarihli çalışmalar, dhurrinin azot geri kazanımındaki işlevine yönelik kanıtları güçlendirmiştir. Emendack vd. (2025), azot yetersizliği koşullarında dhurrinin içsel bir azot kaynağı olarak kullanılabilirliğini ve yüksek dhurrin düzeyine sahip genotiplerin daha fazla fide biyokütlesi oluşturduğunu bildirmiştir. Araştırmacılar ayrıca, dhurrinin tamamen ortadan kaldırılmasının özellikle düşük azotlu koşullarda çimlenme ve fide gelişimi açısından dezavantaj oluşturabileceğini vurgulamıştır (Emendack vd., 2025:15).

Bu bulgular, sorgumda siyanür riskini azaltmaya yönelik biyoteknolojik stratejilerin yalnızca dhurrinin tamamen ortadan kaldırılmasına odaklanmaması gerektiğini göstermektedir. Günümüzde genom düzenleme yaklaşımlarında hedef, dhurrin biyosentezini tümüyle durdurmak yerine, bitkinin savunma ve azot metabolizmasındaki işlevlerini koruyacak şekilde güvenli düzeylere indirmektir. Bu nedenle tcd mutantları, düşük siyanürlü yeni sorgum genotiplerinin geliştirilmesinde önemli deneysel modeller olarak değerlendirilmektedir.

7.3. Yabani Germplazmın Genetik Potansiyeli ve CRISPR/Cas9 Perspektifi

Ananda vd. (2022), kültür sorgumu (*Sorghum bicolor*) ile Avustralya kökenli yabani *Sorghum macrospermum* türünü karşılaştırdıkları çalışmada, yabani türün yapraklarındaki dhurrin düzeyinin kültür sorgumuna kıyasla yaklaşık 1000 kat daha düşük olduğunu saptamıştır. Bu belirgin farkın, dhurrin biyosentez genlerinin (bkz. Bölüm 2.1) yabani türdeki oldukça düşük ekspresyon düzeyinden kaynaklandığı bildirilmiştir. Elde edilen bulgular, yabani sorgum akrabalarının düşük siyanojenik potansiyelli çeşitlerin geliştirilmesinde kritik birer genetik kaynak olabileceğini ortaya koymaktadır (Ananda vd., 2022:9).

Araştırmacılar ayrıca *S. macrospermum*'un kültür sorgumuyla yakın akraba olduğunu ve yararlı özelliklerin ıslah programlarına aktarılabilirliğini belirtmişlerdir. Bu nedenle yabani sorgum germplazmı, düşük dhurrin düzeyine sahip yeni sorgum genotiplerinin geliştirilmesi için doğal bir gen kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Ananda vd., 2022:16)

CRISPR/Cas9 teknolojisi ise sorgum genomunda hedef genlerin hassas biçimde düzenlenmesine olanak sağlayarak kalite, verim, biyotik ve abiyotik stres toleransı gibi özelliklerin geliştirilmesinde yeni fırsatlar sunmaktadır. Bu teknoloji; gen fonksiyonlarının araştırılması, gen ekspresyonunun düzenlenmesi, çoklu gen düzenleme uygulamaları ve yeni genetik varyasyonların oluşturulması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır (Weldemichael vd., 2024:7).

Bu nedenle yabani sorgum türlerinde doğal olarak bulunan düşük dhurrin özelliğinin moleküler temellerinin belirlenmesi ve bu bilgilerin CRISPR/Cas9 tabanlı genom düzenleme stratejileriyle birleştirilmesi, gelecekte düşük siyanogenik potansiyele sahip ve tarımsal performansı korunmuş yeni sorgum çeşitlerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Bu yaklaşım, dhurrinin tamamen ortadan kaldırılmasından ziyade biyosentezinin kontrollü şekilde düzenlenmesine dayanan yeni nesil biyoteknolojik ıslah stratejileriyle uyumludur.

7.4. Metabolik Yeniden Programlanma ve Savunma Sistemlerinin Bütüncül Yönetimi

Dhurrinsiz mutantlarda gözlenen azot dengesizlikleri (bkz. Bölüm 7.2; Emendack vd., 2025), biyotik streslere karşı hassasiyet ve potansiyel biyokütle kayıpları gibi fizyolojik maliyetleri (*trade-off*) beraberinde getirmektedir. Bununla birlikte, dhurrin biyosentezinin baskılanması yalnızca siyanogenik potansiyelin azaltılmasıyla sınırlı kalmayıp sorgum metabolizmasında kapsamlı bir dönüşümü de tetiklemektedir. Siyanogenik potansiyeli olmayan (*prussic acid-free* - PF) sorgum genotiplerinde gerçekleştirilen metabolomik analizler, tirozin ve fenilalanin kökenli metabolik akışın siyanogenik yoldan saparak fenilpropanoid ve flavonoid biyosentez yollarına yönlendirildiğini göstermiştir (Kumari vd., 2025:9). Bu durum, dhurrining ortadan kaldırılmasının pasif bir kayıp olmadığını, aksine savunma metabolizmasının yeniden örgütlenmesiyle sonuçlanan aktif bir süreç olduğunu ortaya koymaktadır.

Fenilpropanoid ve Flavonoid Yollarının Aktivasyonu: Dhurrin biyosentezinin baskılanması sonrasında 4-coumarat, ferulik asit, sinapik asit, koniferin ve çeşitli flavonoid türevlerinin birikiminde artış gözlenmiştir. Bu bileşiklerin antioksidan aktivite, hücre duvarı güçlendirilmesi, UV koruması ve stres toleransında görev aldığı bilinmektedir. Dolayısıyla dhurrin yolunun baskılanmasıyla ortaya çıkan

metabolik akış deęiřimi, bitkinin alternatif savunma mekanizmalarını güçlendirebilmektedir (Kumari vd., 2025:10).

Jasmonat Aracılı Savunma Sinyallerinin Güçlenmesi: Dhurrinsiz sorgum genotiplerinde linolenik asit metabolizması ve jasmonat biyosentezi ile iliřkili metabolitlerde de artış saptanmıřtır. Jasmonik asit, bitkilerde yaralanma, herbivor saldırıları ve çevresel streslere karřı savunma tepkilerinin düzenlenmesinde merkezi rol oynayan bir sinyal molekülüdür. Kumari vd. (2025), dhuririn eksiklięinin jasmonat temelli savunma yollarının aktivasyonu ile kısmen telafi edilebildięini ileri sürmektedir (Kumari vd., 2025:10).

Sorgoleon ve Alternatif Savunma Metabolitleri: Sorgoleon, sorgum kök tüylerinde sentezlenen ve rizosfere salgılanan güçlü bir allelokimyasal olup yabancı ot gelişimini baskılayabilen önemli bir savunma metabolitidir. Sorgoleon biyosentezinin kök dokularında gerçekteřmesi ve bitkinin allelopatik kapasitesinde önemli rol oynaması nedeniyle, düşük dhuririnli genotiplerde bu metabolik yolun korunması veya desteklenmesi bitkinin toplam savunma kapasitesinin sürdürülmesine katkı sağlayabilir (Dayan vd., 2010:1035). Bu yaklaşım henüz doğrudan deneysel olarak test edilmemiř olmakla birlikte, farklı savunma metabolitlerinin birlikte deęerlendirilmesine dayalı yeni nesil biyoteknolojik stratejiler ağıısından dikkat çekici bir perspektif sunmaktadır.

Dokuya Özgü Genom Düzenleme Stratejileri: Dhuririnin yalnızca savunma metaboliti olmadığı; aynı zamanda azot depolanması, geri kazanımı ve stres fizyolojisinde de rol oynadığı bildirilmektedir (Wang vd., 2024:4). Bu nedenle gelecekteki genom düzenleme çalışmalarında dhuririn biyosentezinin tamamen ortadan kaldırılması yerine, hayvanlar tarafından tüketilen üst aksamda siyanogenik potansiyelin azaltılması ve buna karřılık köklerdeki savunma işlevlerinin korunması daha dengeli bir yaklaşım olarak deęerlendirilebilir. Gen ekspresyonunun dokuya özgü biçimde düzenlenmesine olanak sağlayan yeni genom düzenleme teknolojileri, bu tür hedefe yönelik uygulamalar için önemli fırsatlar sunmaktadır.

Sonuç olarak, sorgumda düşük siyanürlü yeni genotiplerin geliştirilmesinde amaç yalnızca dhuririn biyosentezini ortadan kaldırmak olmamalıdır. Daha sürdürülebilir bir yaklaşım, dhuririn, fenilpropanoidler, flavonoidler, jasmonat sinyalleme ve sorgoleon gibi savunma metabolitlerini birlikte deęerlendiren bütüncül bir metabolik ağıı optimize

edilmesidir. Sekonder metabolitlerin biyotik ve abiyotik stres toleransında birlikte işlev gördüğü ve gelecekteki biyoteknolojik müdahalelerin bu metabolik ağın tamamını dikkate alması gerektiği bildirilmektedir (Mishra vd., 2025:22). Dhurrinsiz sorgumlarda gözlenen metabolik yeniden programlanma, gelecekteki biyoteknolojik ıslah çalışmalarının tek bir metaboliti değil, savunma sisteminin tamamını hedefleyen stratejilere yönelmesi gerektiğini göstermektedir (Kumari vd., 2025:10).

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu kapsamlı inceleme sonucunda, sorgumun başarısının tek bir savunma mekanizmasına değil; dhurrim, sorgoleon ve fenilpropanoid kökenli metabolitlerin birlikte oluşturduğu çok katmanlı bir kimyasal savunma sistemine dayandığı ortaya konulmuştur. Bu sistem yalnızca herbivorlara, patojenlere ve rakip bitkilere karşı koruma sağlamakla kalmamakta; aynı zamanda azot kullanım etkinliği, stres toleransı, yem güvenliği ve çevresel adaptasyon süreçlerini de şekillendirmektedir. Güncel moleküler ve biyoteknolojik çalışmalar, sorgum sekonder metabolizmasının birbirinden bağımsız yolaklardan değil, dinamik ve bütünlük bir metabolik ağdan oluştuğunu göstermektedir. Bu nedenle gelecekteki ıslah ve yönetim stratejilerinin de tek bir metaboliti hedeflemek yerine bu ağın tamamını dikkate alan bütüncül yaklaşımlar üzerine kurulması gerekmektedir. Bu çerçevede elde edilen bulgular dört temel sonuç ve öneri başlığı altında özetlenebilir.

8.1. Moleküler Islahın Geleceği ve Genotipik Standartlar

CYP79A1 gen ekspresyon düzeyleri, sorgumda hidrojen siyanür potansiyelinin (HCNp) öngörülmesinde ve düşük siyanogenik genotiplerin eldesinde güçlü bir moleküler belirteç işlevi görmektedir (Katamreddy vd., 2025:15). Son dönemde öne çıkan CRISPR/Cas9 ve benzeri genom düzenleme teknolojileri, biyosentez yolağındaki bu kilit genleri doğrudan hedefleyerek düşük HCNp'ye sahip hatların geliştirilmesinde önemli olanaklar sunmaktadır.

Bununla birlikte dhurrim; yalnızca toksisite kaynağı olmayıp savunma, azot geri kazanımı ve stres adaptasyonu gibi hayati süreçlerde rol oynayan çok işlevli bir metabolittir (Gleadow & Møller, 2014:170; Emendack vd., 2025:13). Yolağın tam blokajı neticesinde ortaya çıkan azot bedeli ile ikincil metabolit akışının fenilpropanoid ve flavonoid yollarına kayması gibi pleiotropik aksaklıklar (bkz. Bölüm 7.2; Kumari vd., 2025:10), geni

tamamen nakavt etmenin fizyolojik risklerini net şekilde ortaya koymaktadır (Blomstedt vd., 2012:66).

Bu doğrultuda, gelecekteki moleküler ıslah çalışmalarında dhurrin biyosentezini tamamen ortadan kaldırmak yerine, gen ifadesini hassas düzeyde ayarlayan (fine-tuning) ve dokuya özgü kontrol sağlayan yaklaşımlar tercih edilmelidir. Özellikle hayvanlarca tüketilen üst aksamda siyanogenik potansiyeli düşüren, buna karşılık kök dokularında ve kritik gelişim evrelerinde savunma işlevlerini koruyan dokuya özgü promotör tabanlı uygulamalar; yem güvenliği, stres toleransı ve agronomik verimlilik arasında optimal bir denge vaat etmektedir (Rosati vd., 2019:9; Weldemichael vd., 2024:10; Emendack vd., 2025:14-15).

8.2. İklim Değişikliği ve Stres Yönetimi

Kuraklık stresi altında hücresel zararların dayanıklılığını yansıtan membran stabilitesi parametreleri, kuraklık direncinin yanı sıra siyanogenez ve HCN oluşum riskinin değerlendirilmesinde de önemli bir fizyolojik gösterge olarak öne çıkmaktadır. Katamreddy vd. (2025), kuraklığa toleranslı sorgum genotiplerinde membran bütünlüğünün daha iyi korunduğunu ve düşük HCN potansiyeli ile ilişkili olduğunu bildirmiştir (Katamreddy vd., 2025:5). Bu bulgular, artan sıcaklık ve kuraklık olaylarının sorgum verimi ve yem kalitesi üzerindeki etkileri dikkate alındığında, stres toleransı ile yem güvenliğini birlikte optimize eden çeşitlerin geliştirilmesinin gelecekteki ıslah programlarının temel hedeflerinden biri olması gerektiğini ortaya koymaktadır (Prasad vd., 2021:8; Mishra vd., 2025:20).

Bununla birlikte, dhurrinin kuraklık koşullarındaki işlevinin yalnızca antioksidan savunmayla açıklanamayacağı anlaşılmaktadır. Sohail vd. (2022), kuraklık altında dhurrin düzeyleri yükselmesine rağmen reaktif oksijen türlerinin (ROS) hem yabancı tip bitkilerde hem de dhurrin eksik mutantlarda arttığını göstermiş ve dhurrinin doğrudan bir ROS temizleyici olarak görev yaptığı görüşünü desteklememiştir (Sohail vd., 2022:13). Bu nedenle kuraklık koşullarında gözlenen dhurrin birikiminin yönetimi, yalnızca siyanogenik riskin azaltılması açısından değil, aynı zamanda bitkinin azot ekonomisinin korunması ve metabolik kaynakların daha verimli kullanılması açısından da önem taşımaktadır. Gelecekte genom düzenleme, hassas fenotipleme ve metabolomik yaklaşımların birlikte kullanılması, stres toleransını korurken güvenli HCN seviyelerine sahip

yeni sorgum genotiplerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır (Weldemichael vd., 2024:4; Rosati vd., 2019:11)

8.3. Hayvan Beslemede Risk Yönetimi ve Yem Güvenliği Projeksiyonu

Hasat ve kurutma sonrasında ortaya çıkan dhurrin stabilitesi kaynaklı toksisite riskleri (Gruss vd., 2023; bkz. Bölüm 6.1), moleküler ıslah çalışmalarında yalnızca canlı bitki dokularındaki HCNp düzeylerine değil, depolanmış yem materyallerinin güvenliğine de odaklanılması gerektiğini göstermektedir.

Hayvanlara sunulmadan önce kurutulmuş sorgum materyalinde, özellikle rehidrasyon (nemlendirme) sonrasında açığa çıkabilecek HCN düzeylerinin kontrol edilmesi önem taşımaktadır. Bunun yanında uygun hasat zamanı, kontrollü soldurma ve ensileme uygulamaları, siyanogenik riskin azaltılmasında etkili yönetim araçları olarak değerlendirilebilir. Bu uygulamalar, yem güvenliğinin sağlanmasında genetik iyileştirme stratejilerini tamamlayan önemli süreçlerdir.

Sorgumun yemlik kalitesi yalnızca düşük hidrojen siyanür potansiyeline değil, aynı zamanda tanen düzeyine de bağlıdır. Bu nedenle gelecekteki ıslah ve yem yönetim programlarında hedef, düşük HCN potansiyeli ile uygun tanen düzeyini birlikte sağlayan genotiplerin geliştirilmesi olmalıdır. Böyle bir yaklaşım, hem toksisite riskinin azaltılmasına hem de yemden yararlanma etkinliğinin artırılmasına katkı sağlayacaktır (Dykes ve Rooney, 2006:247; Gruss vd., 2023:4).

8.4. Akademik ve Sektörel Öneriler

Sorgumun ikincil metabolit profili yalnızca bitki savunması açısından değil; yem güvenliği, stres toleransı ve sürdürülebilir tarımsal üretim açısından da kritik bir role sahiptir. Dhurrin, sorgoleon, tanenler ve diğer savunma bileşenleri arasındaki karmaşık etkileşimler, gelecekteki araştırmaların tek bir metabolik özelliğe odaklanmak yerine moleküler biyoloji, bitki ıslahı, hassas tarım ve yem güvenliğini birleştiren bütüncül bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Elde edilen bulgular doğrultusunda öne çıkan akademik ve sektörel öncelikler şunlardır:

Entegre Multigenik Islah Programları: Dhurrin, tanen, flavonoid ve fenilpropanoid metabolizmasını eş zamanlı modüle eden ve birden fazla geni hedefleyen moleküler müdahale modelleri geliştirilmelidir.

Hızlı Saha Tanı Kitleri: Üreticilerin ve işletmelerin tarlada HCN potansiyelini (HCNp) dakikalar içinde belirleyebileceği kâğıt bazlı kolorimetrik sensörlerin yaygınlaştırılması, akut toksisite risklerini saha ölçeğinde önleyecektir.

Azot ve Metabolik Verimlilik Yönetimi: Dhurrin yolağının baskılanmasıyla ortaya çıkan "azot bedeli" kısıtları dikkate alınarak (bkz. Bölüm 7.2), dikey geri dönüşüm kapasitesi yüksek varyetelerin geliştirilmesiyle daha az sentetik gübre kullanımı ve güvenli yem üretimi hedeflenmelidir.

Hassas Fenotipleme ve Metabolomik Entegrasyonu: Islah hatlarının taranmasında sadece toplam HCNp düzeyine değil, ikincil metabolitlerin dokusal dağılımı ve metabolik akış kaymalarına odaklanan yüksek çözünürlüklü fenotipleme platformları kurulmalıdır.

Sorgumun hem hayvan besleme güvenliğini hem de tarladaki rekabet gücünü belirleyen temel unsur; dhurrin ve sorgoleon ekseninde şekillenen, fenilpropanoidler ve tanenlerle desteklenen metabolik ağın koordineli yönetimidir. Bu doğrultuda dhurrini düşürmeye yönelik biyoteknolojik girişimler, yalnızca siyanür toksisitesinin engellenmesine değil; azot kullanım etkinliği, nitrat birikimi ve stres toleransının korunmasına da odaklanmalıdır (Rosati vd., 2019:11). Gelecekte genom düzenleme, fonksiyonel genomik, hassas fenotipleme ve metabolomik yaklaşımların entegrasyonu ile stres toleransından ödün vermeyen, güvenli HCNp düzeylerine sahip yeni sorgum genotiplerinin geliştirilmesi mümkün olacaktır (Weldemichael vd., 2024:7). Bu stratejilerin hayata geçirilmesi, sorgumun yüksek iklim direnci ve biyokütle üretim potansiyeliyle sürdürülebilir tarım sistemlerindeki stratejik konumunu pekiştirecektir.

KAYNAKÇA

- Adetunji, A. I., Duodu, K. G., & Taylor, J. R. N. (2015). Inactivation of tannins in milled sorghum grain through steeping in dilute NaOH solution. *Food Chemistry*, 175, 225-232. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.102>
- Ananda, G. K. S., Myrans, H., Norton, S. L., Gleadow, R., Furtado, A., & Henry, R. J. (2022). *Transcript profiles of wild and domesticated sorghum under water-stressed conditions and the differential impact on dhurrin metabolism*. *Planta*, 255:51. DOI: 10.1007/s00425-022-03831-4.
- Bansal, M. K., Besançon, T. E., Polli, E. G., Burton, J. D., & Everman, W. J. (2025). Evaluating Sorgoleone Herbicidal Activity on Weed Species and Wheat (*Triticum aestivum*). *Weed Science*.
- Barbosa, L. C. D. A., Ferreira, M. L., Demuner, A. J., Silva, A. A. D., & Pereira, R. D. C. (2001). Preparation and phytotoxicity of sorgoleone analogues. *Química Nova*. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422001000600008>
- Bjarnholt, N., Elizabeth H. J. Neilson, Christoph Crocoll, Kirsten Jørgensen, Mohammed Saddik Motawia, Carl Erik Olsen, David P. Dixon, Robert Edwards, & Birger Lindberg Møller. (2018). *Glutathione transferases catalyze recycling of auto-toxic cyanogenic glucosides in sorghum*. *The Plant Journal*, 94(6), 1109-1125. <https://doi.org/10.1111/tjp.13923>
- Blomstedt, C. K., Gleadow, R. M., O'Donnell, N., Naur, P., Jensen, K., Laursen, T., Olsen, C. E., Stuart, P., Hamill, J. D., Møller, B. L., & Neale, A. D. (2012). *A combined biochemical screen and TILLING approach identifies mutations in Sorghum bicolor L. Moench resulting in acyanogenic forage production*. *Plant Biotechnology Journal*, 10(1), 54-66. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2011.00646.x>
- Choi, S. C., Chung, Y. S., Lee, Y. G., Kang, Y., Park, Y. J., Park, S. U., & Kim, C. (2020). *Prediction of dhurrin metabolism by transcriptome and metabolome analyses in sorghum*. *Plants*, 9(10), 1390. <https://doi.org/10.3390/plants9101390>
- Conn, E. E. (1979). *Biosynthesis of cyanogenic glycosides*. *Naturwissenschaften*, 66(1), 28-34.
- Cook, D., Rimando, A. M., Clemente, T. E., Schröder, J., Dayan, F. E., Nanayakkara, N. P. D., Pan, Z., Noonan, B. P., Fishbein, M., Abe, I., Duke, S. O., & Baerson, S. R. (2010). *Alkylresorcinol synthases expressed in Sorghum bicolor root hairs play an essential role in the biosynthesis of the allelopathic benzoquinone sorgoleone*. *The Plant Cell*, 22(3), 867-887. <https://doi.org/10.1105/tpc.109.072397>
- Czarnota, M. A., Paul, R. N., Weston, L. A., & Duke, S. O. (2003). Anatomy of sorgoleone-secreting root hairs of *Sorghum* species. *International Journal of Plant Sciences*, 164(6), 861-866. <https://doi.org/10.1086/378661>
- Darbani, B., Motawia, M. S., Olsen, C. E., Nour-Eldin, H. H., Møller, B. L., & Rook, F. (2016). The biosynthetic gene cluster for the cyanogenic glucoside dhurrin in *Sorghum bicolor* contains its co-expressed vacuolar MATE transporter. *Scientific Reports*, 6, 37079. <https://doi.org/10.1038/srep37079>
- Dayan, F. E. (2006). *Factors modulating the levels of the allelochemical sorgoleone in Sorghum bicolor*. *Planta*, 224(2), 339-346. <https://doi.org/10.1007/s00425-005-0217-5>
- Dayan, F. E., Rimando, A. M., Pan, Z., Baerson, S. R., Gimsing, A. L., & Duke, S. O. (2010). *Sorgoleone*. *Phytochemistry*, 71, 1032-1039.
- Dicko, M. H., Gruppen, H., Barro, C., Traore, A. S., van Berkel, W. J. H., & Voragen, A. G. J. (2005). Impact of phenolic compounds and related enzymes in sorghum varieties for resistance and susceptibility to biotic and abiotic stresses. *Journal of Chemical Ecology*, 31(11), 2671-2688. <https://doi.org/10.1007/s10886-005-7619-5>
- Dykes, L., & Rooney, L. W. (2006). Sorghum and millet phenols and antioxidants. *Journal of Cereal Science*, 44(3), 236-251. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.06.007>

- Einhellig, F. A., & Souza, I. F. (1992). Phytotoxicity of sorgoleone found in grain Sorghum root exudates. *Journal of Chemical Ecology*. <https://doi.org/10.1007/bf00997160>
- Einhellig, F. A., Rasmussen, J. A., Hejl, A. M., & Souza, I. F. (1993). Effects of root exudate sorgoleone on photosynthesis. *Journal of Chemical Ecology*. <https://doi.org/10.1007/bf00993702>
- Emendack, Y., Sanchez, J., & Laza, H. (2025). *Dhurrin: A potential endogenous nitrogen turnover source for early seedling growth in sorghum*. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1558712. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1558712>.
- Falcone Ferreyra, M. L., Rius, S. P., & Casati, P. (2012). *Flavonoids: Biosynthesis, biological functions, and biotechnological applications*. *Frontiers in Plant Science*, 3, 222. <https://doi.org/10.3389/fpls.2012.00222>
- Giantin, S., Franzin, A., Brusa, F., Montemurro, V., Bozzetta, E., Caprai, E., Fedrizzi, G., Girolami, F., & Nebbia, C. (2024). *Overview of cyanide poisoning in cattle from Sorghum halepense and S. bicolor cultivars in Northwest Italy*. *Animals*, 14(5), 743. <https://doi.org/10.3390/ani14050743>
- Gleadow, R. M., McKinley, B. A., Blomstedt, C. K., Lamb, A. C., Møller, B. L., & Mullet, J. E. (2021). Regulation of dhurrin pathway gene expression during Sorghum bicolor development. *Planta*, 254(6), Article 119. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03774-2>
- Gleadow, R. M., & Møller, B. L. (2014). Cyanogenic glycosides: synthesis, functions and expression of variation. *Annual Review of Plant Biology*, 65, 155-185.
- Gruss, S. M., Johnson, K. D., Ghaste, M., Widhalm, J. R., Johnson, S. K., Holman, J. D., Obour, A., Aiken, R. M., & Tuinstra, M. R. (2023). Dhurrin stability and hydrogen cyanide release in dried sorghum samples. *Field Crops Research*, 291, 108764. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108764>
- Gruss, S. M., Johnson, K. D., Johnson, S. K., Holman, J. D., Obour, A., Aiken, R. A., & Tuinstra, M. R. (2022). *Managing the prussic acid hazard in sorghum (AY-378-W)*. Purdue University Extension.
- Halkier, B. A., & Møller, B. L. (1989). Biosynthesis of the Cyanogenic Glucoside Dhurrin in Seedlings of *Sorghum bicolor* (L.) Moench and Partial Purification of the Enzyme System Involved Plant Physiology, 90(4), 1552-1559.
- Haskins, F. A., & Gorz, H. J. (1986). Relationship between contents of leucoanthocyanidin and dhurrin in sorghum leaves. *Theoretical and Applied Genetics*, 73(1), 2-3. <https://doi.org/10.1007/BF00273709>
- Ibraheem, F., Gaffoor, I., & Chopra, S. (2010). *Flavonoid phytoalexin-dependent resistance to anthracnose leaf blight requires a functional yellow seed1 in Sorghum bicolor*. *Genetics*, 184(3), 915-926. <https://doi.org/10.1534/genetics.109.111831>
- Katamreddy, S. C., Jose, J., Reddy, B. P., Sivasakthi, K., Sanivarapu, H., Dube, N., Gaddameedi, A., Kodukula V. S. V., Yogendra, K., Govindaraj, M., Kholova, J., Roy Choudhury, S., Kshor, P. B., Varijakshapanicker, P., Bhatnagar-Mathur, P., Are, A. K., & Reddy, P. S. (2025). *Drought-induced cyanogenesis in sorghum (Sorghum bicolor L.): Genotypic variation in dhurrin biosynthesis and stress response*. *Plant, Cell & Environment*, 48. <https://doi.org/10.1111/pce.15536>
- Kaufman, R. C., Herald, T. J., Bean, S. R., Wilson, J. D., & Tuinstra, M. R. (2012). Variability in tannin content, chemistry and activity in a diverse group of tannin-containing sorghum cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(5), 1233-1241. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5890>
- Kumari, A., Cruz, A., Dhiman, P., Impa, S. M., Tuinstra, M. R., Patil, G. B., & Jagadish, S. V. K. (2025). Phenylpropanoid derived flavonoid biosynthesis pathway compensates for abiotic and biotic stress tolerance in dhurrin-free forage sorghum. *Environmental and Experimental Botany*, 238, 106230.

- Laursen, T., Borch, J., Knudsen, C., Bavishi, K., Torta, F., Martens, H., Silvestro, D., Hadzakis, N., Wenk, M., Dafforn, T., Olsen, C. E., Motawia, M., Hamberger, B., Moller, B., & Bassard, J.-E. (2016). Characterization of a dynamic metabolon producing the defence compound dhurrin in sorghum. *Science*, 354(6314), 890-893. <https://doi.org/10.1126/science.aag2347>
- Mahmood, S., Ali, H., Ahmad, F., & Iqbal, Z. (2014). Estimation of tannins in different sorghum varieties and their effects on nutrient digestibility and absorption of some minerals in caged White Leghorn layers. *International Journal of Agriculture & Biology*, 16(1), 217-221.
- Makkar, H. P. S. (2003). Effects and fate of tannins in ruminant animals, adaptation to tannins, and strategies to overcome detrimental effects of feeding tannin-rich feeds. *Small Ruminant Research*, 49(3), 241-256. [https://doi.org/10.1016/S0921-4488\(03\)00142-1](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(03)00142-1)
- Mishra, U. N., Chauhan, J., Singhal, R. K., Anuragi, H., Dey, P., Lal, D., Pandey, S., Gupta, N. K., Nayak, J. K., Tripathi, A., Singh, M., Yadav, M., & Sajeevan, R. S. (2025). Abiotic stress responses in forage crops and grasses: The role of secondary metabolites and biotechnological interventions. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1542519. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1542519>
- Møller, B. L. (2010). Functional diversifications of cyanogenic glucosides. *Current Opinion in Plant Biology*, 13(3), 338-347.
- Muratova, A., Pozdnyakova, N., Golubev, S., Wittenmayer, L., Makarov, O., Merbach, W., & Turkovskaya, O. (2009). Oxidoreductase activity of sorghum root exudates in a phenanthrene-contaminated environment. *Chemosphere*, 74(8), 1031-1036. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.011>
- Nielsen, K. A., Tattersall, D. B., Jones, P. R., & Møller, B. L. (2008). *Metabolon formation in dhurrin biosynthesis*. *Phytochemistry*, 69(1), 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2007.06.033>
- Netzly, D. H., Riopel, J. L., Ejeta, G., & Butler, L. G. (1988). Germination Stimulants of Witchweed (*Striga asiatica*) from Hydrophobic Root Exudate of Sorghum (*Sorghum bicolor*). *Weed Science*.
- Obata, T. (2019). Metabolons in plant primary and secondary metabolism. *Phytochemistry Reviews*, 19(1), 1-25. <https://doi.org/10.1007/s11101-019-09619-x>
- O'Donnell, N. H., Møller, B. L., Neale, A. D., Hamill, J. D., Blomstedt, C. K., & Gleadow, R. M. (2013). *Effects of PEG-induced osmotic stress on growth and dhurrin levels of forage sorghum*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 73, 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.09.001>
- Ouma, L. A., Cheruiyot, E. K., & Ogendo, J. O. (2023). *Biosynthesis and role of dhurrin in forage sorghum*. *Reviews in Agricultural Science*, 11, 259-270. https://doi.org/10.7831/ras.11.0_259
- Öten, M., Şin, B., & Kiremitci, S. (2022). *Sorghum (Sorghum bicolor L.) bitkisinin tohum ve yapraklarından elde edilen ekstraktların bazı bitkilerin çimlenme parametreleri üzerine etkilerinin belirlenmesi*. *Journal of Agricultural Biotechnology (JOINABT)*, 3(1), 40-52.
- Öten, M. (2017). *The effects of different sowing time and harvesting height on hydrocyanic acid content in some silage sorghum (Sorghum bicolor L.) varieties*. *Turkish Journal of Field Crops*, 22(2), 211-217. <https://doi.org/10.17557/tjfc.356224>
- Pandey, A. K., Madhu, P., & Bhat, B. V. (2019). Down-regulation of CYP79A1 gene through antisense approach reduced the cyanogenic glycoside dhurrin in *Sorghum bicolor* (L.) Moench to improve fodder quality. *Frontiers in Nutrition*, 6, Article 122. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00122>
- Prasad, V. B. R., Govindaraj, M., Djanaguiraman, M., Djalovic, I., Shailani, A., Rawat, N., Singla-Pareek, S. L., Pareek, A., & Prasad, P. V. V. (2021). *Drought and high temperature stress in sorghum: Physiological, genetic, and molecular insights and breeding approaches*.

- International Journal of Molecular Sciences*, 22(18), 9826.
<https://doi.org/10.3390/ijms22189826>
- Rasmussen, J. A., Hejl, A. M., Einhellig, F. A., & Thomas, J. A. (1992). *Sorgoleone from root exudate inhibits mitochondrial functions*. *Journal of Chemical Ecology*, 18(2), 197-207.
<https://doi.org/10.1007/BF00993605>
- Rosati, V. C., Blomstedt, C. K., Möller, B. L., Garnett, T., & Gleadow, R. (2019). *The interplay between water limitation, dhurrin, and nitrate in the low-cyanogenic sorghum mutant adult cyanide deficient class 1*. *Frontiers in Plant Science*, 10, Article 1458.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01458>
- Saunders, J. A., & Conn, E. E. (1978). Presence of the cyanogenic glucoside dhurrin in isolated vacuoles from Sorghum. *Plant Physiology*, 61(2), 154-157.
- Schumaker, B., Mortensen, L., Klein, R. R., Mandal, S., Dykes, L., Gladman, N., Rooney, W. L., Burson, B., & Klein, P. E. (2024). UV-induced reactive oxygen species and transcriptional control of 3-deoxyanthocyanidin biosynthesis in black sorghum pericarp. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1451215. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1451215>
- Sohail, M. N., Quinn, A. A., Blomstedt, C. K., & Gleadow, R. M. (2022). Dhurrin increases but does not mitigate oxidative stress in droughted Sorghum bicolor. *Planta*, 255(4), Article 74.
<https://doi.org/10.1007/s00425-022-03844-z>
- Surai, P. F. (2014). Polyphenol compounds in the chicken/animal diet: From the past to the future. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 98(1), 19-31.
<https://doi.org/10.1111/jpn.12070>
- Uddin, M. R., Park, K. W., Kim, Y. K., Park, S. U., & Pyon, J. Y. (2010). Enhancing Sorgoleone Levels in Grain Sorghum Root Exudates. *Journal of Chemical Ecology*.
- Uddin, M. R., Park, S. U., Dayan, F. E., & Pyon, J. Y. (2013). Herbicidal activity of formulated sorgoleone, a natural product of sorghum root exudate. *Pest Management Science*.
- Vetter, J. (2000). Plant cyanogenic glycosides. *Toxicon*, 38(1), 11-36.
- Wang, P., Chai, Y. N., Roston, R., Dayan, F. E., & Schachtman, D. P. (2021). The Sorghum bicolor Root Exudate Sorgoleone Shapes Bacterial Communities and Delays Network Formation. *mSystems*.
- Wang, Y., Li, J., & Zhang, H. (2024). Morpho-physiological adaptations of sorghum to extreme climate conditions: A review. *Agricultural Water Management*, 290, 108542.
- Weldemichael, M. Y., Gebremedhn, H. M., & Teklu, T. H. (2024). Advances in genome editing and future prospects for Sorghum improvement: A review. *Plant Gene*, 39, 100464.
<https://doi.org/10.1016/j.plgene.2024.100464>
- Weston, L. A., & Czarnota, M. A. (2001). Activity and persistence of sorgoleone, a long-chain hydroquinone produced by Sorghum bicolor. *Journal of Crop Production*, 4(2), 363-377.
- Xu, J., Wang, W., & Zhao, Y. (2021). Phenolic compounds in whole grain sorghum and their health benefits. *Foods*, 10(8), 1921. <https://doi.org/10.3390/foods10081921>
- Yang, X., Owens, T. G., Scheffler, B. E., & Weston, L. A. (2004). Manipulation of Root Hair Development and Sorgoleone Production in Sorghum Seedlings. *Journal of Chemical Ecology*.
- Yin, K., Gao, C., & Qiu, J.-L. (2017). *Progress and prospects in plant genome editing*. *Nature Plants*, 3, Article 17107. <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.107>

SICAK İKLİM ÇİM BİTKİLERİ

Ertuğrul Balekoğlu*, Ali Salman**

GİRİŞ

Çim alanlar, kullanım amaçlarına ve bulundukları çevresel koşullara bağlı olarak farklı bitki türlerinden tesis edilmektedir. Bu türlerin seçiminde estetik özellikler, basılma toleransı, bakım gereksinimleri ve kullanım yoğunluğu kadar bölgenin iklim özellikleri de belirleyici rol oynamaktadır. Özellikle sıcaklık, çim bitkilerinin büyüme hızı, fotosentez etkinliği, su tüketimi ve yıl boyunca yeşil kalma süresi üzerinde doğrudan etkili olan en önemli çevresel faktörlerden biridir. Bu nedenle çim bitkileri, sıcaklık isteklerine göre genel olarak serin iklim (C3) ve sıcak iklim (C4) çim bitkileri olmak üzere iki temel grupta değerlendirilmektedir.

Sıcak iklim çim bitkileri, tropikal ve subtropikal bölgelerde doğal olarak yayılan ve yüksek sıcaklık koşullarına fizyolojik olarak uyum sağlamış bitkilerdir. Bu türler, hava sıcaklığının yaklaşık 25-35 °C arasında olduğu dönemlerde en yüksek büyüme hızına ulaşmaktadır. Buna karşılık sıcaklıkların düşmesiyle birlikte metabolik aktivitelerini yavaşlatarak, büyümelerini durdururlar. Ayrıca kış dormansisine girdikleri için bu dönemde yapraklarda sararma görülmektedir.

Bu bölümde, çim alan tesisi ve yönetiminde yaygın olarak kullanılan sıcak iklim çim türlerinin morfolojik özellikleri, ekolojik istekleri, kullanım alanları ve bakım esasları ayrıntılı olarak incelenecektir. Sıcaklık, kuraklık ve diğer çevresel stres faktörlere karşı gösterdikleri tepkiler açıklanacaktır.

Sıcak iklim çim bitkileri, serin iklim çim bitkilerine kıyasla daha fazla sayıda cinsi bünyesinde barındırmakla birlikte, bu cinslerin birçoğu çim alan tesisi için uygun olan sınırlı sayıda türe sahiptir. Başlıca sıcak iklim çim türleri arasında bermuda çimi (*Cynodon spp.*), zoysia çimleri (*Zoysia*

* Öğr. Gör. Dr., Ege Üniversitesi, Bayındır Meslek Yüksekokulu, Çim Alan Tesisi ve Yönetimi Programı, Bayındır/İzmir, ertugrul.balekoglu@ege.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-6060-4709>

** Doç. Dr., Ege Üniversitesi, Bayındır Meslek Yüksekokulu, Çim Alan Tesisi ve Yönetimi Programı, Bayındır/İzmir, ali.salman@ege.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-2623-9573>

spp.), yengeç otu çimi (*Stenotaphrum secundatum*), tuzcul yalancıları (*Paspalum vaginatum*), bahia çimi (*Paspalum notatum*), kikuyu çimi (*Pennisetum clandestinum*), kırkayak çimi (*Eremochloa ophiuroides*), halı çimi (*Axonopus* spp.) ve manda otu çimi (*Buchloë dactyloides*, syn: *Bouteloua dactyloides*) yer almaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Farklı Sıcak İklim Çim Türlerine Ait Parsellerin Görünümü

1. Bermuda Çimi (*Cynodon* spp. [L.] Rich.)

Bermuda çimi, hem toprak altında gelişen güçlü rizomları hem de toprak üstünde hızla yayılan stolonları (Şekil 2) ile son derece agresif yayılma yeteneğine sahip çok yıllık bir sıcak iklim çim bitkisidir. Vernasyon katlanmış yapıda olup, yakacık tüylerden oluşmaktadır. Yaprak dokusu, türe ve çeşide bağlı olarak kabadan çok inceye kadar değişiklik göstermektedir (Christians vd., 2016: 75-76).



Şekil 2. Bermuda Çim Bitkisinde Rizom (Sol) ve Stolon (Sağ)

Afrika kökenli olan bu tür, günümüzde yeryüzünde 45° Kuzey ve 45° Güney enlemleri arasındaki tropikal ve subtropikal iklim kuşaklarında en yaygın kullanılan sıcak iklim çim bitkisidir (Hanna vd., 2013: 547).

Basılma ve ezilmeye olan yüksek dayanımı, sık dokulu çim alan oluşturma yeteneği (Şekil 3) ve çok düşük biçim yüksekliklerine toleransı sayesinde spor sahaları, golf sahaları, parklar, yol kenarları ve erozyon kontrol alanlarında öncelikli tercihtir (Kır vd., 2018; Kır vd., 2019). Özellikle düşük biçime gösterdiği yüksek tolerans, türün ıslah edilmiş bazı özel çeşitlerinin golf sahalarının green bölgelerinde başarıyla kullanılabilmesini sağlamaktadır (Avcıoğlu, 2014: 103).



Şekil 3. Hibrit Bermuda Çeşitleri: Tahoma 31 (Sol), TifSport (Orta) ve Tifway-419 (Sağ)

Cynodon cinsi bünyesinde tanımlanmış dokuz farklı tür bulunmakla birlikte, ticari olarak en yaygın kullanılanı bermuda çimi (veya köpek dişi ayrığı) olarak da bilinen *Cynodon dactylon*'dur. Sık biçim, düzenli sulama ve dengeli gübreleme altında çok yüksek görsel kalite sunan bu tür, geçmişte kaba dokusu nedeniyle sınırlı kullanım alanına sahipken, ince dokulu çeşitlerin geliştirilmesiyle kalitesini daha da artırmıştır. Spor sahaları gibi üst düzey bakım ve estetik gerektiren alanlarda ise tetraploid veya heksaploid *C. dactylon* ile diploid Uganda çiminin (*Cynodon transvaalensis*) melezlenmesiyle elde edilen hibrit çeşitler tercih edilmektedir. Hibrit çeşitlerin tohumları kısır olduğu için yalnızca vejetatif yöntemlerle (stolon, rizom veya hazır rulo) tesis edilebilmektedir (Kenna, 2024).



Şekil 4. Tohumla (Sol 3 Sıra) ve Çelikle (Sağ 3 Sıra) Tesis Edilen Farklı Bermuda Çim Çeşitlerine Ait Parsellerin Yaz Dönemi Görünümü

Bu hibrit çeşitlerden “Tif” ön eki (Tifway-419, Tifsport, Tiftuf) bulunan çeşitler Georgia Üniversitesi Coastal Plain Tarımsal Araştırma İstasyonu’nun (Tifton, Georgia) ıslah programlarında geliştirilmiştir. Benzer şekilde “Mid” ön ekiyle başlayan çeşitler (Midiron, Midlawn, Midfield vb.), Kansas ve Oklahoma Tarımsal Araştırma İstasyonlarının ortak çalışmasının ürünüdür (Christians vd., 2016: 77; Kenna, 2024). Türkiye’de de yerel çevre koşullarına uyum sağlamış çeşitlerin geliştirilmesi amacıyla önemli adımlar atılmaktadır. Bu doğrultuda, Akdeniz Üniversitesi bünyesinde yürütülen ıslah programları kapsamında Türkiye koşullarına adapte olmuş 'Survivor' isimli yerli bermuda çimi çeşidi geliştirilmiştir (Mutlu, 2019).

Ayrıca, golf sahalarının green alanlarında kullanılmak üzere geliştirilen 'TifEagle' ve 'Champion' gibi aşırı cüce (ultradwarf) hibrit çeşitler de bulunmaktadır (Şekil 5). Son derece sık, pürüzsüz ve yoğun sürgün yapısıyla green kalitesini artırarak top yuvarlanma mesafesini artırır. Ancak bu cüce çeşitler, sık kök sistemleri nedeniyle soğuğa, kuraklığa ve gölgeye karşı oldukça hassastır (Walton vd., 2025: 3).

Bermuda çimi, sıcaklık ve ışık istekleri bakımından oldukça hassas limitlere sahiptir. Toprak sıcaklığı 10 °C'nin altına düştüğünde klorofil sentezini durdurarak kış dormansisine girer ve saman sarısı renk alır (Şekil 6). En aktif kök ve rizom gelişimini ise 24-31 °C toprak sıcaklıklarında gerçekleştirir. Kış soğuklarına karşı dayanıklılığı japon çimi gibi diğer sıcak iklim türlerine kıyasla daha zayıf olup, geçiş bölgelerinde ciddi kış zararlarına ve yüksek yenileme maliyetlerine yol açabilmektedir. Bu sınırlandırmayı aşmak adına yürütülen ıslah çalışmaları da mevcuttur (Dunne vd., 2019). Nitekim bu çalışmalar sonucunda geliştirilen ve ülkemizde de bulunan 'Tahoma 31' çeşidi, standart çeşitlere kıyasla çok

daha şiddetli don olaylarında bile hayatta kalabilmekte ve ilkbaharda hızla yeşererek kendini toparlayabilmektedir (Gopinath vd., 2021). Bu çeşidin geçiş ikliminin daha soğuk kısımlarında denenmesi büyük önem taşımaktadır.



Şekil 5. Hibrit Bermuda Çeşidi ile Tesis Edilmiş Golf Sahasının Görünümü

Bermuda çimi genel olarak gölge toleransı oldukça zayıf bir bitkidir (Huang vd., 2019: 218). Özellikle dipten biçimlerde bu zayıflık daha da belirginleşmektedir. Green alanlarında kullanılan hibrit bermuda çeşitlerinin günlük ışık ihtiyacı, gölge toleransı yüksek olan çim türlerine kıyasla çok daha yüksektir ve yetersiz güneş ışığı alan bölgelerde çim örtüsünde hızlı kayıplar yaşanmaktadır (Walton vd., 2025: 8). Bununla birlikte, 'Celebration' ve 'TifGrand' gibi görece daha geniş yapraklı modern çeşitlerin gölgeye karşı kısmi dayanıklılık gösterdiği bilinmektedir (Chen vd., 2021: 2842; Hanna vd., 2013: 550).

Bermuda çimi kısıtlı sulamaya en iyi uyum sağlayan sıcak iklim çimlerinden biridir. Kısıtlı sulama koşulları altında, sıcak iklim çimlerinin genel su tüketimi belirgin şekilde düşer. Bermuda çimi, derin kök sistemi ve kuraklık döneminde hayatta kalma yeteneği sayesinde, standart su ihtiyacının çok altındaki sulama seviyelerinde bile kalitesini koruyabilmektedir (Colmer ve Barton, 2017). Akdeniz ikliminde yürütülen çalışmalarda, kuraklık esnasında yaprak kuruması oranının en düşük, sulama sonrası kendini yenileme hızının ise en yüksek olduğu türlerden biri olduğu belirlenmiştir (Mutlu vd., 2011: 730).



Şekil 6. Kış Dormansisine Girmiş Bermuda Çeşitlerinin Görünümü

Tüm bunlara ek olarak, bermuda çimi basılma ve ezilme (trafik) stresine karşı en yüksek dayanıklılığa sahip sıcak iklim çim türüdür. Çeşitlerin trafik toleransı; yüksek sürgün yoğunluğu, ince yaprak dokusu ve yapraklardaki yüksek lignin içeriği ile doğrudan ilişkilidir (Huang vd., 2019: 221). Özellikle düşük biçim yüksekliklerinde kardeşlenmenin teşvik edilmesi, sürgün yoğunluğunu artırarak basılma direncini daha da yükseltmektedir. Yoğun kullanımdan sonra yıpranan alanların kendini kapatma hızı ise stolon ve rizomlarında depoladığı nişasta rezervlerine bağlıdır. Yüksek basılma-ezilme toleransı ve hızlı toparlanma kabiliyetiyle spor alanları için başarılı bir çim alan oluşturmaktadır (Pornaro vd., 2019: 662; Sancar vd., 2023: 5).

2. Zoysia Çimleri (*Zoysia* spp. Willd.)

Zoysia çimleri, hem toprak altında gelişen rizomları hem de toprak üstünde yayılan stolonları ile yayılarak son derece yoğun çim örtüsü oluşturabilen, çok yıllık sıcak iklim çim bitkisidir (Şekil 7). Kıvrık vernasyona sahiptir. Stolon ve rizom boğum araları genellikle tekdüze uzunluğa sahiptir ve stolon boğumları saman rengine, kın benzeri bir kılıfla örtülüdür. Yakacak tüylüdür ve yaprak ayasının üzerinde türe veya çeşide bağlı olarak değişken miktarda ince, uzun tüyler bulunur (Şekil 8). Yaprak ayalarındaki yüksek silis içeriği, yapraklara ezilmeye karşı yüksek mekanik direnç kazandırır (Christians vd., 2016: 78).



Şekil 7. *Zoysia* Cinsi Çim Fidelerinde Stolon ve Rizomların Görünümü



Şekil 8. Japon Çiminde Stolon Görünümü

Zoysia cinsi içinde on farklı türü barındırır. Asya kökenlidir ve adını 18. yüzyıl Avusturyalı botanikçi Karl von Zois'ten alır. Özellikle Doğu Asya'da (Japonya ve Kore) yüzyıllardır park, bahçe, at yarışı pistleri ve golf sahalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır (Hanna vd., 2013: 547). Tür, Doğu Asya'da çok köklü kültürel geçmişe sahiptir. Kore'de Silla Krallığı dönemine (M.S. 100-400) ait kraliyet anıt mezarlarının üzeri, dormant dönemde altın sarısı renk alması amacıyla japon çimi dikilmiştir ve bu durum türün bin yılı aşkın süredir kültürel yetiştiriciliğinin yapıldığını göstermektedir (Şekil 9) (Loch vd., 2017: 11).

Zoysia çimlerinin bakımı geçmişte bermuda çiminin bakım standartlarında yapılmış ve bu yanlış uygulamalar türün zayıf yönlerini ön plana çıkarmıştır. Oysa *Zoysia* çimlerinin en büyük avantajı, yavaş büyüme hızı sayesinde biçim sıklığını azaltması ve azot gereksiniminin oldukça düşük olmasıdır. Tür, en yüksek rekabet gücünü ve yabancı ot bastırma yeteneğini tam olarak bu düşük su, azot ve pestisit girdisi altında (kısıtlı bakımda) göstermektedir; yüksek girdi seviyeleri ise keçe tabakası birikimini ve hastalık hassasiyetini artırmaktadır (Loch vd., 2017: 12). Bununla birlikte, yavaş gelişmesi nedeniyle alanın ilk tesisi ve hasar sonrası kendini toparlama süresi bermuda çimine kıyasla oldukça uzundur. Tohumlarının çimlenme gücü zayıf ve dormansisi yüksek olduğundan vejetatif yöntemlerle tesis edilmektedir (Şekil 10).



Şekil 9. Kış Dormansisi Döneminde Japon Çiminin Görünümü



Şekil 10. Japon Çimi Fidesi ile Yeşil Alan Tesisi Aşamalarının Görünümü

Abiyotik streslere karşı gösterdiği geniş tolerans sınırları ile tanınan bu tür, sıcak iklim çimleri arasında en iyi gölge toleransına sahip türlerden biridir (Şekil 11). Ancak çok düşük biçim yüksekliklerinde gölgede seyrekleşme eğilimi gösterebilir. Yapraklarındaki yüksek silis birikiminden kaynaklanan sertlik, çimin ezilmeye karşı mekanik direncini artırsa da biçilmesini zorlaştırır. Bu nedenle *Zoysia* çim alanlarında her

zaman biçim bıçaklarının keskin olmasına dikkat edilmelidir (Loch vd., 2017: 19). Kuraklık dönemlerinde yaprakları hızla rulo halini alır ve yeşil örtüsünü kısmen kaybedip dormansiye girerek su stresinden kaçınabilir. Bermuda çimine kıyasla kök sisteminin daha sığ olması nedeniyle kuraklıkta yaprakların kuruması daha erken başlasa da, erken dönemdeki stoma kontrolü ve düşük evapotranspirasyon oranı sayesinde *Zoysia* çimleri topraktaki suyu çok daha az kullanarak sulama yapılmayan kurak dönemleri daha iyi geçirebilmektedir (Patton vd., 2017: 51; White vd., 2001: 133).

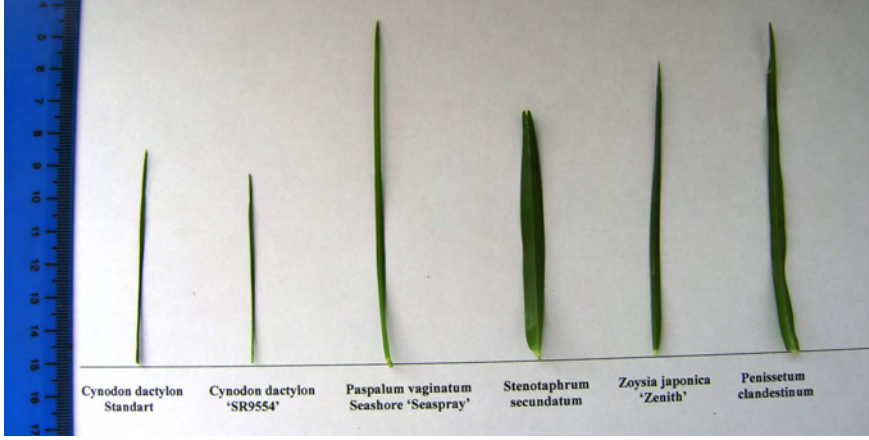


Şekil 11. Gölgelek Alanda Japon Çiminin Görünümü

Zoysia çimleri, yüksek sürgün ve kök yoğunluğu sayesinde yabancı bitkilere karşı direnç gösterir. Yapraklarının dik ve sert yapısı, dormansi döneminde bile topun çim üzerinde dik durmasını sağlayarak golf sahalarının fairway ve tee bölgelerinde üstün bir oyun yüzeyi sunar (Hanna vd., 2013: 549). Çimin basılma ve aşınmaya karşı gösterdiği yüksek direnç; dokularındaki yüksek lif, hemiselüloz ve lignin içeriği ile doğrudan ilişkilidir (Patton vd., 2017: 52). *Zoysia* alanları ilk basılma anında yüksek sürgün ve kardeşlenme yoğunluğuyla kalitesini korusa da, ağır yıpranma meydana geldikten sonra yavaş büyüme hızı nedeniyle kendini yenileme süresi oldukça uzundur. Hastalık ve zararlılara karşı genel olarak dirençli olmakla birlikte; pas, yaprak lekesi ve kış uykusundan çıkış dönemlerinde görülen "büyük yama" (large patch - *Rhizoctonia solani*) hastalıkları, özellikle yoğun bakımlı alanlarda en büyük zarara yol açan birincil fungal sorunlardır (Patton vd., 2017: 56).

Zoysia cinsinde çim alan tesisinde kullanılan üç ana tür şunlardır:

2.1. Japon Çimi (*Zoysia japonica* Steud.)



Şekil 12. Farklı Sıcak İklim Çim Türlerine Ait Yaprak Dokularının Görünümü

Japon çimi (veya Kore çimi), *Zoysia* cinsinin yeryüzünde en yaygın kullanılan türüdür. Kış soğuklarına karşı en dayanıklı sıcak iklim çim bitkisidir (Patton vd., 2017: 44). Yaprak genişliği 2.5 mm ile 5 mm arasında değişen kaba yapılı dokuya sahiptir (Şekil 12). Diğer *zoysia* türlerine kıyasla stolonları daha hızlı yayılır ve alanı daha kısa sürede kaplar (Patton vd., 2017: 44). Soğuk toleransı oldukça yüksektir. Çeşitler arasında hayatta kalma sınırı -8.4 ile -11.5°C arasında değişmektedir ve 'Meyer' gibi bazı çeşitleri çok soğuk bölgelerde dahi kış zararından korunabilmektedir (Hanna vd., 2013: 555). Buna karşın dormansiye ilk girip sararan sıcak iklim çim bitkisidir. 'Zenith' ve 'Compadre' gibi çeşitleri tohumla da başarıyla tesis edilebilen bu tür; ev bahçeleri, parklar, yol kenarları, havaalanları ve golf sahalarının fairway ile rough bölgelerinde birincil tercih konumundadır (Patton vd., 2017: 44). Son yıllarda Ülkemizde Akdeniz Üniversitesinin de katkılarıyla 'Anazoy' ve 'MG Türkzoy' isimli çeşitler geliştirilmiştir.

2.2. Manila Çimi (*Zoysia matrella* [L.] Merr.)

Manila çimi, japon çimine kıyasla çok daha ince yaprak dokusuna (1.5-2.5 mm) ve son derece sık sürgün yapısına sahiptir (Şekil 13). Ekolojik olarak gölgeye ve yüksek toprak tuzluluğuna toleransı japon çiminden daha üstündür. Yapraklarında bulunan özel tuz bezleri vasıtasıyla fazla tuzu dışarı atabilmektedir. Nitekim Manila çimi genotiplerinin, tuzluluk toleransında bermuda çimi çeşitlerinin tamamını geride bıraktığı ve deniz

suyuna en dayanıklı tür olan paspalum çimi (*Paspalum vaginatum*) seviyesine yaklaştığı belirlenmiştir (Loch vd., 2017:17). Akdeniz iklim kuşağındaki kış gözlemlerinde Manila çimi kış aylarında rengini japon çimine kıyasla daha geç kaybeder ve yeşil rengini uzun süre korur (Magni vd., 2017: 396).



Şekil 13. Manila Çiminin Görünümü

Zoysia spp. türleri arasında Manila çiminin, basılmaya, aşınmaya ve parça kopmasına (divot) karşı çok daha üstün mekanik direnç gösterdiği belirlenmiştir (Patton vd., 2017). Bu durum, Manila çimi çeşitlerinin dokularındaki daha yüksek lignin birikimi sayesinde yaprak, stolon ve rizom organlarının kopma mukavemetinin ve doku direncinin çok daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır (Magni vd., 2017: 399). Manila çiminin en büyük dezavantajı ise kış soğuklarına karşı zayıf olmasıdır; bu nedenle geçiş kuşağının soğuk kısımlarından ziyade sıcak ve nemli subtropikal/tropikal iklimlerde tercih edilir. 'Zeon', 'Zorro' ve 'Cavalier' gibi popüler çeşitleri bulunan bu tür, özellikle üst düzey golf sahalarının fairway ve tee alanlarında, Asya ülkelerinde ise tavus otu ve hibrit bermuda çimlerine alternatif olarak düşük bakımlı golf green alanlarında kullanılmaktadır (Hanna vd., 2013: 557).

2.3. Maskeren Çimi / Kadife Çim (*Zoysia pacifica* [Goudswaard] M. Hotta & Kuroki / *Z. tenuifolia* Willd.)

Eski literatürde *Zoysia tenuifolia* adıyla bilinen maskeren çimi, *Zoysia* cinsinin en ince yaprak dokusuna (<0.5 mm) ve en yüksek sürgün yoğunluğuna sahip üyesidir (Şekil 14) (Patton vd., 2017: 44). Oluşturduğu örtü adeta bir kadife halıyı andırır ve kadife çim (velvet grass) olarak adlandırılır (Avcıoğlu, 2014: 115).



Şekil 14. Maskeren Çiminin Görünümü

Gölge toleransı son derece yüksek olan bu tür, kış soğuklarına karşı hiç dayanıklı değildir. Don olaylarının görüldüğü iklimlerde hayatta kalamadığı için dağılımı yalnızca tropikal ve sıcak subtropikal bölgelerle sınırlıdır. Büyüme hızı son derece yavaştır ve biçilmeden kendi haline bırakıldığında zamanla minik tepecikler oluşturan düzensiz bir yapıya bürünür. Hassas yapısı nedeniyle nadiren tek başına kullanılır. Ancak ıslah programlarında japon çiminin soğuk toleransı ile maskeren çiminin ince dokusunu birleştirmek amacıyla melezleme çalışmalarında kullanılmaktadır (örneğin 'Emerald' çeşidi) (Hanna vd., 2013: 555).

3. Yengeç Otu Çimi (*Stenotaphrum secundatum* [Walt.] Kuntze)

Yengeç otu çimi, morfolojik olarak taban kısmında belirgin şekilde daralmış kulakçığa sahiptir. Kolayca tanınabilen, kaba dokulu yaprakları olan çok yıllık sıcak iklim çim bitkisidir. Geniş yaprak ayası, bu dar kulakçık bölgesinde yaprak kınına yaklaşık 90 derecelik dik açı yapmaktadır. Yakacık kısa tüylerden oluşur. Toprak altında rizom oluşturmeyen bu tür, toprak yüzeyinde metrelerce uzayabilen güçlü ve kalın stolonlara sahiptir (Hanna vd., 2013: 559; Christians vd., 2016: 81). Yaprak ucu küt veya yuvarlaktır. Kaba yapısı ve geniş yaprak kınları nedeniyle diğer sıcak iklim çimlerine kıyasla daha seyrek çim örtüsü oluşturma eğilimindedir. Stolon boğumlarından genellikle çift sürgün çıkması türün karakteristik özelliğidir (Şekil 15) (Trenholm vd., 2011: 1).



Şekil 15. Yengeç Otu Çiminin Görünümü

Meksika Körfezi'nin yanı sıra Akdeniz Havzası'nın kıyı bölgelerinin yerlisi olduğu düşünülen bu tür, özellikle nemli subtropikal ve tropikal bölgelerde çok yaygın kullanılan birincil yeşil alan bitkilerinden biridir. Çok farklı yapıda topraklarda ve geniş pH aralığında başarıyla gelişebilir (Trenholm vd., 2011: 1). Sık bir çim örtüsü oluşturmaya karşın son derece kaba dokuya sahiptir. Bu kaba yapısı nedeniyle golf sahalarının fairway, tee veya green gibi oyun alanlarında kullanıma uygun değildir. Ancak bazı sahaların rough bölgelerinde ve özellikle gölgeli park-bahçe

çimlerinde yaygın olarak tercih edilir. Sıcak iklim çimleri arasında en yüksek gölge toleransına ve nispeten yüksek tuz toleransına sahip türlerden biridir (Trenholm vd., 2011: 1). Buna karşılık, kış soğuklarına karşı son derece hassastır ve geçiş iklim kuşağında ciddi kış zararı görebilmektedir. Sonbaharda sıcaklıkların düşmesiyle hızla dormansi dönemine giren bitki (Şekil 16), ilkbaharda toprak sıcaklığı 13-15°C seviyelerine ulaşana kadar aktif büyümeye geçemez (Christians vd., 2016: 81). Basılma ve ezilme toleransı ise oldukça zayıftır; yoğun yaya veya araç trafiğine maruz kalan alanlarda varlığını sürdüremez (Trenholm vd., 2011: 1).



Şekil 16. Kış Dormansisine Girmiş Yengeç Otu Çiminin Görünümü

Yengeç otu çim çeşitleri, biçim yüksekliklerine ve ploidi düzeylerine göre iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Standart çeşitler genellikle 6.5 cm'nin üzerindeki biçim yüksekliklerinde biçilirken; daha sık dokulu, ince yapılı ve düşük biçime toleranslı olan cüce çeşitler (Amerishade, Captiva, Delmar, Sapphire, Seville) 5.0 cm'nin altında biçilebilmektedir (Trenholm vd., 2011: 2). Ploidi düzeyleri bakımından ticari çeşitlerin çoğu diploid ($2n=2x=18$) yapıdayken, 'Bitterblue' triploid ($2n=3x=27$), en yaygın kullanılan çeşit olan 'Floritam' ise anöploidtir ($2n=32$) (Christians vd., 2016: 82). Islah çalışmalarında diploid çeşitler, poliploid çeşitlere kıyasla daha parlak yeşil renkli, daha ince yapraklı ve stolonlarda daha yoğun sürgün oluşturma özelliğine sahip olmaları nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Ancak bu yoğun sürgün yapısı keçe tabakası oluşumu potansiyelini de artırmaktadır (Hanna vd., 2013: 560).

Tohum veriminin düşük olması ve tohumla tesisin pratik olmaması nedeniyle yalnızca hazır rulo, fide veya stolonlama gibi vejetatif yöntemlerle çoğaltılmaktadır (Şekil 17).



Şekil 17. Yengeç Otu Çimi Fidesi (Sol) ve Stolonlarla Üretimi (Sağ)

Uygun sulama ve gübreleme programıyla 30-60 cm aralıklarla dikilen fideler bir yıl içinde alanı tamamen kapatabilmektedir (Hanna vd., 2013: 561). Bu dönemde doğru biçim yüksekliği bitki sağlığı için kritiktir. Standart çeşitlerin 9-10 cm aralığında yüksek biçilmesi derin kök gelişimini teşvik eder ve böcek hassasiyetini azaltır. Alçak biçimler ise bitkiyi strese sokarak kökleri zayıflatmaktadır (Trenholm vd., 2011: 6). Yoğun keçe tabakası oluşturma eğiliminde olan bu türde, verticut ve havalandırma işlemlerinin kalın stolonlara zarar vermemesine dikkat edilmeli, bu işlemlerin ilkbaharda, dormansiden çıkarken yapılması önerilmektedir (Trenholm vd., 2011: 10).

Araştırmalar, yengeç otu çiminin kısıtlı sulamaya yüksek adaptasyon yeteneği gösterdiğini ortaya koymaktadır. Evapotranspirasyonun %40'ı miktarında sulamayla yıl boyunca kabul edilebilir görsel kaliteyi koruyabildiği kanıtlamıştır. Kısıtlı sulama rejiminde sulamanın günlük uygulanması, toprak nem içeriğinin solma noktası olan %20'nin altına düşmesini engelleyerek kurumaları önlemekte ve çim kalitesini korumaktadır (Sierra Augustinus vd., 2026: 11).

Türün en tehlikeli zararlısı, bitki öz suyunu emerek geniş alanlarda saman rengi kurumalara yol açan güney tahtakurusu (*Blissus insularis*) böceğidir. 'Floratam' çeşidi geçmişte bu zararlıya karşı dirençli olsa da zamanla bu direncini kaybetmiştir. Günümüzde ise yalnızca 'Captiva' çeşidinin bu zararlıya karşı direnç gösterdiği belgelenmiştir (Hanna vd., 2013: 560).

4. Tuzcul Yalancıdarı (*Paspalum vaginatum* Swartz)

Son derece sık dokulu ve görsel kalitesi yüksek çim örtüsü oluşturabilen, stolon ve rizomlarıyla yayılan çok yıllık sıcak iklim çim bitkisidir (Şekil 18).

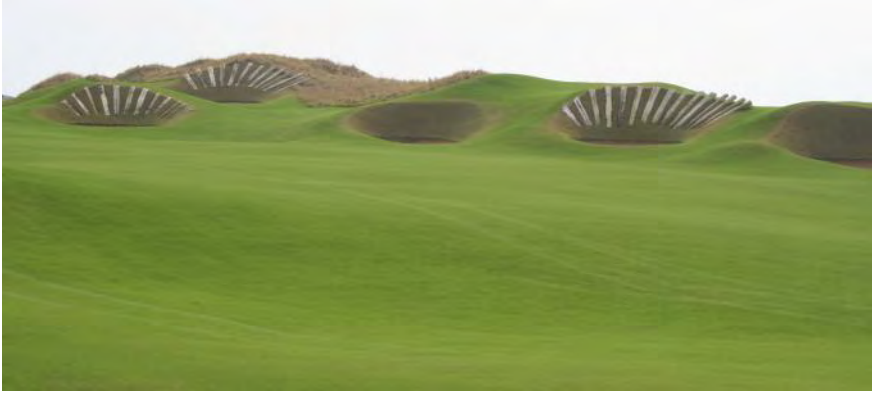


Şekil 18. Tuzcul Yalancıdarı Çiminin Görünümü

Yaprak dokusu, türe ve çeşide bağlı olarak çok kaba dokudan bermuda kadar ince dokuya kadar geniş bir varyasyon gösterir. (Hanna vd., 2013: 563). Stolon ve rizom yapısı, hibrit bermuda çimlerine göre daha kalındır. Katlanmış vernasyona sahiptir. Yaprak uçları sivridir ve yaprakların alt yüzeyi ışığı yansıtan mumsu, parlak bir görünüme sahiptir. Yakacık 1-2 mm uzunluğunda tüylerden oluşur. Stolon boğumları son derece belirgin ve tüylü olup, nemli toprakla temas ettiğinde hızla köklenme yeteneğine sahiptir (URL-1). Genetik olarak kendine uyumsuz ve diploid ($2n=2x=20$) bir türdür (Christians vd., 2016: 84).

Güney Afrika kökenli olan tuzcul yalancıdarı, 18. ve 19. yüzyıllarda köle ticareti yapan gemilerde yataklık malzemesi olarak kullanılmış ve gemilerin limanlara yanaşmasıyla kıyılara atılarak bu bölgelerde doğal olarak yayılış göstermiştir (Hanna vd., 2013: 565). Günümüzde ise 35° Kuzey ve 35° Güney enlemleri arasında, deniz seviyesine yakın tropikal ve subtropikal ekosistemlerde geniş dağılım göstermektedir. Sıcak iklim çimleri arasında en yüksek tuz toleransına sahip olan bu tür, 54 dSm⁻¹ gibi çoğu bitkinin hayatta kalamayacağı aşırı tuzlu topraklarda bile yeşil örtüsünü koruyabilmektedir. Doğrudan deniz suyuyla sulanabilen bu tür; atık suların değerlendirilmesini sağlayarak içme suyu kaynaklarını korunmasına katkıda bulunur (Avcıoğlu, 2014: 110). Geniş toprak pH

aralığına (3.6-10.2) tolerans gösterir. Yoğun yapısı sayesinde yabancı ot rekabetini doğal olarak engeller (Jiang vd., 2004). Çim alan kullanımının yanı sıra (Şekil 19); erozyon kontrolü, sulak alan restorasyonları, petrol/gaz kuyusu sahalarının ıslahı ve hayvan yemi olarak da ekolojik ve ekonomik değer taşımaktadır (URL-1). Bununla birlikte, kış soğuklarına karşı son derece hassastır; bu durum türün kış donlarının görüldüğü daha soğuk iklim kuşaklarında kullanımını sınırlandırmaktadır (Christians vd., 2016: 85).



Şekil 19. Tuzcul Yalancıları 'Seashore' Çeşidi ile Tesis Edilen Golf Sahası Görünümü

Her ne kadar yoğun dokusuyla yabancı otları baskılasa da kimyasal mücadelenin gerektiği durumlarda bu tür içindeki yabancı otların kontrolü oldukça zordur. Çünkü bitki, piyasadaki birçok seçici herbisite karşı aşırı hassastır ve yanlış uygulamalarda ciddi şekilde zarar görebilir (Brosnan ve Deputy, 2008: 4; Trenholm ve Unruh, 2002: 2).

5. Bahia Çimi / Parlak Yalancıları (*Paspalum notatum* Flügge)

Güney Amerika kökenli bir sıcak iklim çim bitkisi olan bahia çimi, özellikle fakir topraklara ve düşük bakım koşullarına sağladığı mükemmel uyumla ön plana çıkmaktadır. Kıvrık bir vernasyona, geniş yaprak ayasına ve kısa, kalın, odunumsu rizom benzeri stolonlara sahiptir. Yakacığı çok kısa ve zarımsı bir yapıdadır. Yaprak kınları ise hafif basık ve seyrek tüylüdür (Şekil 20) (Christians vd., 2016: 83). Bitkinin sahip olduğu kalın rizomlar ve toprağın derinliklerine inebilen gelişmiş kök sistemi bitkiye oldukça yüksek kuraklık toleransı sağlar. Şiddetli ve uzun süreli kuraklık periyotlarında bitki, hayatta kalabilmek dormansiye girerek toprak üstü aksamını kurutur ve kahverengi renk alır. Ancak su kaynaklarına tekrar kavuştuğunda çok kısa sürede yeşererek kendini toparlama yeteneğine sahiptir (Trenholm vd., 2022: 1-4; Hanna vd., 2013: 577-578).



Şekil 20. Bahia Çiminin Genel Görünümü (Sol) ve Gövde Tabanının Görünümü (Sağ)
(URL-2; URL-3)

Bahia çimi, yüksek estetik kalite ve sık doku istenen üst düzey çim alanlarından ziyade, otoyol kenarları, büyük araziler, endüstriyel peyzaj alanları ve meralar gibi fonksiyonelliğin ön planda olduğu alanlar için idealdir. Besin maddesince fakir ve kumlu topraklarda iyi gelişim göstermesi, aşırı keçe tabakası oluşturmaması ve su tüketiminin düşük olması türün en büyük avantajlarıdır. Asidik toprakları tercih eden bu tür, alkali topraklarda yetiştirildiğinde demir noksanlığına bağlı kloroz belirtileri gösterir. Ayrıca gölgeye, yoğun basılmaya ve tuzluluğa karşı toleransı oldukça düşüktür. Bitkinin nispeten seyrek bir büyüme formuna sahip olması, çim örtüsü içinde boşluklar oluşmasına ve yabancı otların bu alanları kolayca işgal etmesine zemin hazırlamaktadır (Hanna vd., 2013: 578).

Türün peyzaj alanlarındaki kullanımını sınırlandıran en büyük faktör, ilkbahardan sonbahara kadar sürekli ve hızlı bir şekilde uzun saplı başaklar üretmesidir. Genellikle iki çatalı yapıya sahip olan bu uzun başaklar, çim alanın görünümünü hızla bozduğu için sık biçim yapılmasını zorunlu kılar. Bahia çiminin başak sapları ve yaprakları sert ve lifli yapıdadır. Bu nedenle, çimi biçerken oldukça keskin biçim bıçaklarının kullanılması şarttır. Kök sisteminin derinlere inmesini teşvik ederek bitkinin stres toleransını artırmak amacıyla, biçim yüksekliğinin 7.5-10 cm civarında tutulması önerilmektedir (Trenholm vd., 2022: 4; Christians vd., 2016: 83).

Zararlılar ve hastalıklar açısından incelendiğinde, bahia çimi genel olarak sorunsuz bir tür olsa da danaburnu bu bitki için en büyük tehdittir. Danaburnu, toprak altında açtığı galerilerle bitkinin derin kök sistemini parçalayarak çimin hızla solmasına ve kurumasına yol açar. Hastalık olarak zaman zaman dolar lekesi görülebilmektedir. Öte yandan, derin ve güçlü kök sistemi sayesinde bitki, topraktaki bitki paraziti nematodlara

karşı diğer birçok çim türüne kıyasla çok daha yüksek toleransa sahiptir (Trenholm vd., 2022: 5).

6. Kikuyu Çimi (*Pennisetum clandestinum* Hochst ex Chiov.)

Doğu Afrika'nın Kenya dağlık bölgelerine özgü sıcak iklim çim bitkisi olan kikuyu çimi, günümüzde dünya genelinde subtropikal ve Akdeniz iklim kuşağındaki birçok bölgede yayılış göstermektedir. Katlanmış vernasyona ve tüylerden oluşan bir yakacığa sahiptir. Türün en ayırt edici morfolojik özelliği, yaprak kınlarının ince tüylerle kaplı olması ve yaka kısmında daha uzun tüylerin bulunmasıdır. Açık veya ıhlamur yeşili rengindeki yaprak ayalarının uçları ise sivridir (Şekil 21). Ayrıca, bitki biçildikten hemen sonra kanopi üzerinde beliren beyaz renkli ve belirgin erkek organlar (anterler) (Şekil 22), çim alana gümüşü bir görünüm kazandırır. Tohumlar ise doğrudan yaprak kınının içinde oluşur (Christians vd., 2016: 89; Gross, 2003: 2).



Şekil 21. Kikuyu Çiminin Genel Görünümü

Kikuyu çiminin çim alan yönetimindeki tarihsel gelişimi oldukça dikkat çekicidir. Sahip olduğu kalın stolonlar ile güçlü rizomlar sayesinde son derecede agresif bir şekilde büyür (Şekil 23). Kontrol altına alınmadığı durumlarda çitleri, ağaç gövdelerini ve çeşitli yapısal unsurları sararak istila edebilme potansiyeline sahiptir. Amerika Birleşik Devletleri'nde uzun yıllar boyunca istilacı ve zararlı bir yabancı ot olarak kabul edilmiştir (Christians vd., 2016: 89-90). Ancak zamanla bitkinin bu güçlü yayılma gücünün ve basılmaya karşı gösterdiği yüksek direncin fark edilmesiyle birlikte türe yönelik agronomik yaklaşım değişmiştir. Günümüzde birçok

golf sahasının fairway ve rough alanlarında yüksek kaliteli bir çim türü olarak yetiştirilmektedir (Gross, 2003: 1-2; Schiavon vd., 2020: 3402).



Şekil 22. Kiyu Çiminde Beyaz Renkli Erkek Organların Görünümü

Kikuyu çimi, ekolojik istek bakımından diğer sıcak iklim çimlerine göre bazı farklılıklar gösterir. En aktif gelişimini 15-32°C arasında gerçekleştirir. Türün en büyük avantajı, soğuk havalarda rengini koruyabilme yeteneğidir. Diğer sıcak iklim çimleri sonbaharda renk kaybedip dormansiye girerken, kikuyu çimi hafif don olaylarında dahi yeşil rengini koruyabilmekte ve Akdeniz iklimi gibi ılıman kışlara sahip bölgelerde kış boyu aktif kalabilmektedir. Dormansiye girdiği bölgelerde ise en son sararan ve ilkbaharda da en geç yeşillenmeye başlayan sıcak iklim çim bitkisidir. (Gross, 2003: 2; Schiavon vd., 2020: 3402).

Bu bitkinin yönetimindeki en büyük zorluk, son derece hızlı büyümesidir. Hızlı büyüme, toprak yüzeyinde çok kısa sürede kalın bir keçe tabakası oluşturur. Aşırı keçe birikimi, çim yüzeyinin süngerimsi ve yumuşak bir hal almasına neden olur. Bu durum golf gibi sporlarda topun yuvarlanma mesafesini düşürürken, çim biçme makinelerinin tekerleklerinin zemine gömülmesine ve bıçakların çimi dipten kazımasına yol açar. Dipten kazınarak zarar görmüş bir kikuyu çiminin kendini toparlaması ise oldukça yavaştır. Bu fiziksel problemleri önlemek, yüzey sertliğini korumak ve top yuvarlanma mesafesini artırmak amacıyla, ilkbahar ve yaz aylarında çim alanın düzenli olarak verticut ve havalandırma işlemine tabi tutulması gerekmektedir (Gross, 2003: 3-4; Schiavon vd., 2020: 3408-3409).

Büyüme hızını ve keçe tabakası oluşumunu kontrol altında tutabilmek için kikuyu çimi yoğun mekanik ve kimyasal bakıma ihtiyaç duyar.

Büyüme sezonu boyunca haftada 3 ila 6 kez, nispeten düşük yüksekliklerde (yaklaşık 11-15 mm) biçilmesi önerilmektedir. Sık biçim, hem estetik kaliteyi artırır hem de dipten kazınma riskini azaltır (Schiavon vd., 2020: 3402-3403).



Şekil 23. Kikuyu Çimi Kullanılan Hazır Çim Üretim Tesisi

7. Halı Çimi (*Axonopus P. Beauv.*)

Halı çimi, özellikle sıcak ve nemli iklim kuşaklarına adapte olmuş, toprak üstünde yayılan stolonlarıyla gelişen bir çim bitkisidir. Katlanmış vernasyon, saçak tüylerden oluşan yakacığa sahiptir. Yaprak ayası geniş, uç kısımları ise küt ve yuvarlaktır. Yaprak kınlarının oldukça basık formda olması ve stolon boğumlarının yoğun tüylerle kaplı olması türün teşhis özelliklerindendir. Toprak altında gelişen rizomlara sahip olmaması ve çoğunlukla seyrek büyüme formu sergilemesi nedeniyle sık dokulu bir çim alan oluşturamaz (Şekil 24) (Christians vd., 2016: 88-89; Hanna vd., 2013: 576).

Axonopus cinsi bünyesinde 114 farklı tür barındırmasına rağmen, bunlardan yalnızca ikisi çim alan tesisinde kullanılmaktadır. Bunlar adi halı çimi (*Axonopus fissifolius* veya *A. affinis*) ve tropikal halı çimidir (*Axonopus compressus*). Adi halı çimi Amerika'nın güney eyaletlerinden Avustralya ve Batı Afrika'ya kadar geniş bir coğrafyada kullanılan temel türdür. Tropikal halı çimi ise adi halı çimine kıyasla daha kaba dokuya, daha açık yeşil renge ve daha yüksek gölge toleransına sahiptir. Ancak soğuğa karşı toleransı son derece zayıf olduğu için kullanımı yalnızca Jamaika ve Güney Çin gibi kesin tropikal iklimlerle sınırlı kalmıştır.

Tropikal halı çiminin ticari olarak üretilen bir çeşidi bulunmamaktadır (Christians vd., 2016: 89; Hanna vd., 2013: 576).



Şekil 24. Halı Çiminin (*Axonopus compressus*) Genel Görünümü (URL-4)

Halı çimi, yüksek estetik kalite beklenen üst düzey peyzaj alanlarından ziyade, fonksiyonelliğin ve sürdürülebilirliğin ön planda olduğu alanlar için tercih edilir. Bitkinin en önemli ekolojik avantajı; yüksek taban suyuna sahip, sürekli ıslak ve kumlu topraklarda yüksek rekabet gücüne sahip olmasıdır. Düşük besin maddesi içeren fakir topraklarda diğer pek çok bitki türünü baskılayarak alanın baskın türü haline gelebilmektedir. Bu nedenle yol kenarları, büyük parklar ve düşük bakım gerektiren erozyon kontrol alanları için ideal bir seçenektir. Ancak kurağa karşı dayanımı zayıf olduğu için kurak bölgelerde kullanımı uygun değildir (Christians vd., 2016: 89; Hanna vd., 2013: 576).

Türün peyzaj alanlarındaki kullanımını ve görsel kalitesini kısıtlayan en büyük dezavantajı, tıpkı bahia çiminde olduğu gibi uzun ve estetiği bozan başak sapları üretmesidir. Genellikle 20 ila 50 cm uzunluğa ulaşabilen, ince bir sap üzerinde iki veya üç dallı salkım şeklinde gelişim gösterirler. Bu durum, istenilen kalitede bir çim alan elde edebilmek için sürekli ve sık biçim yapılmasını zorunlu kılar. Islah çalışmalarında sap üretimini azaltan,

daha kısa boylu çeşitler geliştirilmek istense de, tohum veriminin düşmesi bu çeşitlerin ticari olarak üretilip satılmasını ekonomik açıdan dezavantajlı hale getirmektedir (Hanna vd., 2013: 576-577).

8. Kırkayak Çimi (*Eremochloa ophiuroides* [Munro] Hack.)

Anavatanı Çin'in orta ve güney bölgeleri olan kırkayak çimi, doğada genellikle dağ yamaçları, nehir kenarları ve el değmemiş kayalık alanlar gibi zorlu koşullarda yetişen çok yıllık bir sıcak iklim bitkisidir. Sadece kalın stolonlara sahip olup, rizom bulundurmaz (Islam ve Hirata, 2005: 184). Çok yoğun sürgün gelişimi göstererek sık bir çim örtüsü oluşturur. Bu yüksek doku yoğunluğu, bitkinin özellikle eğimli arazilerde ve yüksek yağış alan bölgelerde erozyon kontrolü amacıyla başarıyla kullanılmasını sağlamaktadır (Islam ve Hirata, 2005: 184-187). Türü teşhis etmede kullanılan en önemli ayırt edici özellik; yakacığın kısa ve zarımsı yapıda olması ve bu zarın hemen üst kısmında kısa tüylerin bulunmasıdır. Ayrıca stolonları genetik yapıya ve hava sıcaklığına bağlı olarak yeşil, sarı-yeşil veya kırmızı renklerde olabilmektedir (Şekil 25) (Christians vd., 2016: 87; Hanna vd., 2013: 570-572).

Kırkayak çimi, ekolojik istekleri bakımından diğer birçok çim türünden ayrılır. En iyi gelişimini besin maddesince fakir, kumlu ve asidik (pH 4.5-6.5) topraklarda gösterir. Gölge toleransı bermuda çiminden daha iyi, ancak yengeç otu ve japon çiminden daha düşüktür. Hava sıcaklığı 15°C'ye ulaştığında ve yeterli neme kavuştuğunda kış dormansisinden çıkmaktadır. Ancak bitkinin taban sıcaklık isteğinin yüksek olması nedeniyle, ilkbahar aylarında aktif büyümeye geçmesi diğer sıcak iklim çimlerine göre daha yavaş gerçekleşir (Hanna vd., 2013: 570; Islam ve Hirata, 2005: 185).

Türün çim alanlarındaki en büyük avantajı, çok düşük bakım ve gübreleme gereksinimidir. Yavaş büyümesi ve minimum gübre isteği nedeniyle çim sektöründe "tembel adam çimi" (lazy man's grass) veya "fakir adam çimi" olarak da anılmaktadır. Ancak bitkiyi daha koyu yeşil görünüm kazandırmak ve büyümesini hızlandırmak amacıyla aşırı gübreleme yapılması, "kırkayak çimi çöküşü" (centipedegrass decline) olarak adlandırılan fizyolojik soruna yol açar. Ancak bitkiye daha koyu yeşil bir görünüm kazandırmak ve büyümesini hızlandırmak amacıyla yapılan aşırı gübreleme, **kırkayak çimi çöküşü** (centipedegrass decline) olarak adlandırılan fizyolojik sorunun ortaya çıkmasını kolaylaştıran önemli etmenlerden biridir. Bununla birlikte, bu sorun yalnızca aşırı azot

uygulamasına bağılı olmayıp; yanlış sulama ve bakım uygulamaları, aşırı keçe oluşumu, nematodlar, zararlılar ve bazı fungal etmenler gibi farklı faktörlerin tek başına veya birlikte etkisiyle de gelişebilmektedir (Islam ve Hirata, 2005: 186; Hanna vd., 2013: 570-571).



Şekil 25. Kırkayak Çiminin Genel Görünümü (Sol) ve Yaprak Yapısının Görünümü (Sağ)
(URL-5)

9. Manda Otu Çimi (*Buchloë dactyloides* [Nutt.] Engelm. / *Bouteloua dactyloides*)

Kuzey Amerika'nın çayırlarına özgü olan ve literatürde sıklıkla bufalo çimi olarak da adlandırılan bu tür, toprak üstü stolonlarıyla yayılan, rizom bulundurmayan çok yıllık bir sıcak iklim çim bitkisidir. Kıvrık vernasyona sahip olup, yakacık tüylerden oluşmaktadır. Türün en belirgin morfolojik özelliği, yaprak ayalarının her iki yüzeyinin de ince tüylerle kaplı olması ve yaprakların hafif kıvrımlı ve bükülü bir yapı sergilemesidir (Şekil 26). Bu tüylü ve kıvrımlı yapı, bitkiye karakteristik gri-yeşil renk kazandırmanın yanı sıra, su kaybını azaltarak bitkinin olağanüstü kuraklık direncine sahip olmasını sağlar (Christians vd., 2016: 85; Shearman vd., 2004: 1004, 1010).

Manda otu çimini diğer birçok çim türünden ayıran en önemli özellik, iki evcikli bir bitki olmasıdır. Yani erkek ve dişi çiçekler tamamen farklı bireyler üzerinde bulunur. Erkek bitkiler, çim yüzeyinin üzerine (5-25 cm) çıkan bayrak benzeri uzun başak sapsarı üretir. Dişi bitkiler, toprak yüzeyine çok yakın, dikenli yapıya sahip kısa tohum keseleri oluşturur. Erkek bitkilerin ürettiği bu uzun ve belirgin tohum sapsarı, çim alanın pürüzsüz görünümünü ve tekdüzeliğini bozduğu için estetik açıdan

istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle yüksek kalite elde etmek amacıyla genellikle tohum yerine vejetatif yöntemlerle üretilmiş sadece dişi klonlardan oluşan çeşitler tercih edilmektedir (Christians vd., 2016: 86; Shearman vd., 2004: 1014).



Şekil 26. Manda Otu Çim Çeşitleri, Cokey (Sol) ve Bowie (Sağ)

Killi ve ağır bünyeli topraklarda optimum gelişim gösterirken, kumlu topraklara uygun değildir. Yıllık yağış miktarının 500 mm'nin altındaki kurak bölgeler için ideal bir türdür. Doğal yaşam alanı gereği hem aşırı sıcaklara hem de kış soğuklarına karşı toleransı oldukça yüksektir. Şiddetli ve uzun süreli kuraklık stresi altında hayatta kalabilmek için yeşil rengini kaybedip yaz dormansisine girer ve saman sarısı renk alır. Ancak sulama yapıldığında veya yağışlar başladığında hızla yeşil dokusuna kavuşur (Shearman vd., 2004: 1003). Gölgeye karşı toleransı zayıf olduğu için daima tam güneş alan bölgelerde kullanılmalıdır.

Günümüzde su kaynaklarının azalması ve çevre bilincinin artması, manda otu çimini peyzaj alanları, golf sahalarının rough kısımları, otoyol kenarları ve erozyon kontrol alanları için düşük girdi gerektiren son derece önemli bir tür haline getirmiştir (Shearman vd., 2004: 1016-1019). Bitki, doğal olarak yavaş büyüme hızına sahip olduğu için biçim ihtiyacı çok düşüktür; bazı alanlarda yılda sadece bir veya iki kez biçilmesi bile yeterli olabilmektedir. Bu bitkinin bakımındaki en kritik kural, aşırı sulama ve aşırı gübrelemeden kaçınmaktır. Manda otu çimi aşırı azotla gübrelendiğinde veya çok sulandığında görsel kalitesinde artış görülmez. Aksine kendi rekabet gücünü kaybederek alanın yabancı otlar tarafından işgal edilmesine zemin hazırlar. Bu nedenle yıllık azot uygulaması çok

düşük (yaklaşık 2.5 – 10 g/m²) seviyelerde tutulmalıdır (Shearman vd., 2004: 1017).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Sıcak iklim çim bitkilerinin yüksek sıcaklıktaki başarısının temelinde C4 fotosentez mekanizması yer almaktadır. Bu mekanizma, yoğun ışık ve yüksek sıcaklıkta fotorespirasyonu sınırlandırarak fotosentetik verimliliği korur, suyun daha etkin kullanılmasını sağlar ve kuraklığa toleransı artırır. Ancak bu üstünlüğün bir de negatif yönü vardır; düşük sıcaklıklarda metabolizma yavaşlar, büyüme durur ve çoğu zaman yapraklar sararır. Bir başka ifadeyle, sıcak iklim çim bitkilerinin ekolojik başarısı ile kullanım alanlarını kısıtlayan sınırlamalar, aynı fizyolojik temele dayanmaktadır.

İklim değişikliği bu dengeyi yeniden tanımlamaktadır. Küresel ölçekte yaz sıcaklıkları artmakta, kuraklık süreleri uzamakta ve su kaynakları azalmaktadır. Bu koşullarda düşük su ihtiyacına sahip sıcak iklim çimleri, sürdürülebilir çim alan yönetiminin giderek daha güçlü bir seçeneği hâline gelmektedir. Üstelik kış sıcaklıklarının yükselmesi, bu türlerin yetişebileceği coğrafi sınırların genişlemesi manasına gelmektedir.

Türkiye, farklı iklim bölgelerini bir arada barındırdığı için bu değişimin net bir şekilde gözlemlenebileceği ülkelerden biridir. Akdeniz, Ege ve Güneydoğu Anadolu'da sıcak iklim çimleri uzun yıllardır başarıyla kullanılmaktadır. Günümüzde odaklanması gereken temel konu ise, İç Anadolu gibi geçiş iklimine sahip bölgelerde bu türlerin kalıcı bir alternatif olup olamayacağıdır. Özellikle toprak sıcaklığının, türlere göre değişen kritik zarar eşiği olan -5 °C ile -12 °C'nin altına düşmediği yerlerde bu ihtimal güçlenmektedir. Bu nedenle soğuğa dayanıklı tür ve çeşitlerin belirlenmesine yönelik uzun süreli adaptasyon çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmalar yalnızca uyum potansiyelini ortaya koymakla kalmayacak; su tüketiminin ve bakım girdilerinin azaltılmasına da zemin hazırlayacaktır.

Sonuç olarak, gelecekte çim alan yönetiminin hedefinin değişmesi kaçınılmazdır. Mevcut iklime uygun türü seçmek artık yeterli olmayıp; asıl hedef, değişen iklim koşullarına uyum sağlayabilecek tür ve çeşitleri önceden belirleyip uzun vadeli çözümler geliştirmektir. Bu yöndeki adaptasyon çalışmaları, Türkiye'nin farklı ekolojik bölgeleri için yapılacak tür seçiminin bilimsel temellere oturmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

Kitap

- Avcıoğlu, R. (2014). *Çim Ekimi, Dikimi ve Bakımı*. İzmir: Ege Üniversitesi.
- Christians, N. E., Patton, A. J. and Law, Q. D. (2016). *Fundamentals of Turfgrass Management* (5. bs.). Hoboken: Wiley.

Kitap Bölümü

- Hanna, W., Raymer, P. and Schwartz, B. (2013). Warm-Season Grasses: Biology and Breeding. İçinde J. C. Stier, B. P. Horgan and S. A. Bonos (Editör), *Turfgrass: Biology, Use, and Management* (s. 543-590). Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- Shearman, R. C., Riordan, T. P. and Johnson, P. G. (2004). Buffalograss. İçinde L. E. Moser, B. L. Burson and L. E. Sollenberger (Editörler), *Agronomy Monographs* (C. 45, s. 1003-1026). Madison: Wiley.

Dergi Makalesi

- Chen, Z., Wherley, B., Reynolds, C., Hejl, R. and Chang, B. (2021). Daily Light Integral Requirements for Bermudagrass and Zoysiagrass Cultivars: Effects of Season and Trinexapac-Ethyl. *Crop Science*, 61, 2837-2847.
- Colmer, T. D. and Barton, L. (2017). A Review of Warm-Season Turfgrass Evapotranspiration, Responses to Deficit Irrigation, and Drought Resistance. *Crop Science*, 57(S1), 1-13.
- Dunne, J. C., Tuong, T. D., Livingston, D. P., Reynolds, W. C. and Milla-Lewis, S. R. (2019). Field and Laboratory Evaluation of Bermudagrass Germplasm for Cold Hardiness and Freezing Tolerance. *Crop Science*, 59(1), 392-399.
- Gopinath, L., Moss, J. Q. and Wu, Y. (2021). Evaluating the Freeze Tolerance of Bermudagrass Genotypes. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 4(2), e20170.
- Gross, P. J. (2003). Looking Kindly at Kikuyugrass. *USGA Green Section Record*, 41(3), 1-6.
- Huang, S., Jiang, S., Liang, J., Chen, M. and Shi, Y. (2019). Current Knowledge of Bermudagrass Responses to Abiotic Stresses. *Breeding Science*, 69(2), 215-226.
- Islam, M. A. and Hirata, M. (2005). Centipedegrass (*Eremochloa ophiuroides* (Munro) Hack.): Growth behavior and Multipurpose Usages. *Grassland Science*, 51(3), 183-190.
- Jiang, Y., Duncan, R. R., and Carrow, R. N. (2004). Assessment of Low Light Tolerance of Seashore Paspalum and Bermudagrass. *Crop Science*, 44(2), 587-594.
- Kır, B., Avcıoğlu, R., Salman, A. ve Özkan, Ş. S. (2019). Turf and Playing Quality Traits of Some New Turfgrass Alternatives in a Mediterranean Environment. *Turkish Journal of Field Crops*, 24(1), 7-11.
- Kır, B., Salman, A., Avcıoğlu, R. ve Özkan, Ş. S. (2018). Bazı Yeni Çim Seçeneklerinin Akdeniz İklim Koşullarında Kalite Özellikleri Üzerine Bir Araştırma. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 55(4), 21-30.
- Loch, D. S., Ebina, M., Choi, J. S. and Han, L. (2017). Ecological Implications of Zoysia Species, Distribution, and Adaptation for Management and Use of Zoysiagrasses. *International Turfgrass Society Research Journal*, 13(1), 11-25.
- Magni, S., Pompeiano, A., Gaetani, M., Caturegli, L., Grossi, N., Minelli, A. and Volterrani, M. (2017). Zoysiagrass (*Zoysia* spp. Willd.) for European Lawns: A Review. *Italian Journal of Agronomy*, 12(4), 395-402.
- Mutlu, S. S., Mutlu, N., Gurbuz, E., Gulsen, O., Hocagil, M., Karaguzel, O., Heng-Moss, T., Shearman, R. C. ve Gaussoin, R. E. (2011). Drought Resistance of Warm-season Turfgrasses Grown in Mediterranean Region of Turkey. *HortTechnology*, 21(6), 726-736.

- Patton, A. J., Schwartz, B. M. and Kenworthy, K. E. (2017). Zoysiagrass (*Zoysia* spp.) History, Utilization, and Improvement in the United States: A Review. *Crop Science*, 57(S1), S-37-S-72.
- Pornaro, C., Macolino, S. ve Richardson, M. D. (2019). Rhizome and Stolon Development of Bermudagrass Cultivars In A Transition-Zone Environment. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 69(8), 657-666.
- Sancar, B., Sever Mutlu, S. ve Kaya Başar, E. (2023). Traffic Tolerance of Bermudagrass (*Cynodon* sp.) as Affected by Cultivar and Mowing Height. *Grass Research*, 3(15).
- Schiavon, M., Mock, T., Stowell, L. J. ve Baird, J. H. (2020). Management Practices for Optimal Kikuyugrass Quality and Playing Conditions. *Agronomy Journal*, 112(5), 3402-3410.
- Sierra Augustinus, I. A., Unruh, J. B., Kenworthy, K., Lindsey, A. J. ve Schiavon, M. (2026). St. Augustinegrass Can Sustain Performance Under Water And Fertilizer Restrictions In Subtropical Environments. *Agronomy Journal*, 118(2), e70325.
- Walton, T. E., McCalla, J. H., Karcher, D. E., Hutchens, W. J., Chandra, A. ve Richardson, M. D. (2025). Shade, height Of Cut, And Plant Growth Regulator Effects On Bermudagrass And Zoysiagrass Putting Greens. *Crop Science*, 65(1), e21394.
- White, R. H., Engelke, M. C., Anderson, S. J., Ruemmele, B. A., Marcum, K. B. ve Taylor II, G. R. (2001). Zoysiagrass Water Relations. *Crop Science*, 41(1), 133-138.

Bildiri

- Mutlu, S. S. (2019). The Performance of Survivor: The First Turkish Hybrid Bermudagrass Cultivar. İçinde M. Zencirkıran (Editör). I. International Ornamental Plants Congress (s.254). Bursa: 09.10.2019.

İnternet Kaynakları

- Brosnan, J. T. and Deputy, J. (2008). Seashore Paspalum (TM-1; Turf Management). Cooperative Extension Service, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawai'i at Mānoa. <https://www.ctahr.hawaii.edu/oc/freepubs/pdf/TM-1.pdf>, (E.T.: 16.07.2026).
- Kenna, M. (2024). A Turfgrass Timeline: The History of Bermudagrass Breeding. USGA. <https://www.usga.org/content/usga/home-page/course-care/green-section-record/62/issue-03/a-turfgrass-timeline-the-history-of-bermudagrass-breeding.html> (E.T.: 11.07.2026).
- Trenholm, L. E. ve Unruh, J. B. (2002). Seashore Paspalum for Florida Lawns (CIR 1244). Environmental Horticulture Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. <https://ufdcimages.uflib.ufl.edu/IR/00/00/17/17/00001/EP05900.pdf>, (E.T.: 21.06.2026).
- Trenholm, L. E., Cisar, J. L. ve Unruh, J. B. (2011). St. Augustinegrass for Florida Lawns. Environmental Horticulture Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. <https://extadmin.ifas.ufl.edu/nwdistrictmedia/ph-gardening/2014/04/St.-Augustinegrass-for-Florida-Lawns.pdf>, (E.T.: 23.07.2026).
- Trenholm, L., Schiavon, M., Unruh, J. B., Shaddox, T. ve Kenworthy, K. E. (2022). Bahiagrass for Florida Lawns (ENH6/LH006, rev. 2/2022). Environmental Horticulture Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. <https://doi.org/10.32473/edis-lh006-2022>, (E.T.: 18.07.2026).
- URL-1., USDA NRCS National Plant Data Center (2002). Seashore Paspalum (*Paspalum vaginatum* Sw.) Plant Guide. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. https://plants.sc.egov.usda.gov/DocumentLibrary/plantguide/pdf/pg_pava.pdf (E.T.: 29.06.2026).

- URL-2: Rose, H. (2025). “Paspalum notatum plant SWR2”,
<https://www.flickr.com/photos/macleaygrassman/54316231523> (E.T.: 12.08.2026).
- URL-3: Rose, H. (2012). “Paspalum notatum stem base3”,
<https://www.flickr.com/photos/macleaygrassman/7391311698> (E.T.: 12.08.2026).
- URL-4: Rose, H. (2012). “Axonopus compressus habit1”,
<https://www.flickr.com/photos/macleaygrassman/6805169698> (E.T.: 12.08.2026).
- URL-5: Dasher, L. (2022). *Eremochloa ophiuroides*, iNaturalist,
<https://www.inaturalist.org/observations/134997962> (E.T.: 12.08.2026).

TARLA TARIMINDA YABANCI OT HASTALIK VE ZARARLILARIN ENTEGRE TESPİTİ İÇİN DERİN ÖĞRENME TABANLI BİR YAKLAŞIM

Lerzan Öztürk*, Bahadır Şin**

GİRİŞ

Artan dünya nüfusunun ihtiyaçlarını karşılayabilmek amacıyla gıda maddelerine olan talep her geçen gün artmaktadır. Bu gıda maddelerinin önemli bir kısmında bitkisel üretimden karşılanmaktadır. Ancak bitkisel üretimde tarımsal ürünler, öngörülemeyen iklim değişiklikleri, biyotik ve abiyotik stres faktörleri gibi çeşitli etmenler tarafından tehdit edilmektedir. Bu tehditler arasında hastalık, zararlı, yabancı ot gibi etmenlerin saldırılarından kaynaklanan biyotik stres önemli bir yere sahiptir. Bitkiler çok sayıda zararlı ve patojenin saldırısına karşı hassastır ve kültür bitkileri aynı anda birden fazla etmenden etkilenebilmektedir. Yapılan çalışmalar, ürün kayıplarının %50'den fazlasının başlıca zararlı ve hastalıklardan kaynaklandığını ve bunun girişimciler, tarıma dayalı sanayi kuruluşları ve özellikle geçimini tamamen tarımdan sağlayan küçük ölçekli çiftçiler üzerinde olumsuz sonuçlar oluşturabileceğini göstermektedir (Harvey ve ark., 2014). Özellikle iklim değişikliğinin yağış düzenini değiştirmesi, hastalık ve zararlı salgınlarını artırabilmesi ve bitkilerin yetiştirme dönemlerini etkilemesi, tarımsal üretimin değişen koşullara uyum sağlayabilecek teknolojik yaklaşımlarla desteklenmesini gerekli hâle getirmektedir (Alahi ve ark., 2023). Artan bu gıda taleplerine karşı verim kayıplarını minimuma indirmek zarara yol açan etmenin tespiti gibi doğru tahminlere duyulan ihtiyacı artırmıştır. Yine sürdürülebilirlikte etmen mücadelesinde kimyasal kullanımının azaltılması, çevresel etkilerin en aza indirilmesi ve kaynak kullanım etkinliğinin artırılması gerekliliğini ön plana çıkaran modern tarımsal uygulamaların önem kazanmıştır (He ve ark., 2025).

* Bağımsız yazar, Tekirdağ, lerzanzoturk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2199-6807>

** Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniv., Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Sakarya, sinbahadir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0109-3662>

Bitkilerde hastalık ve zararlılar, bitkinin farklı organlarında çeşitli belirtiler ve zararlar oluşturarak gelişme, verim ve ürün kalitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Hastalık etmenleri yaprak, meyve, tomurcuk, gövde ve genç dallarda renk değişimi, leke, solgunluk, nekroz ve çürüme gibi belirtilere neden olurken; zararlılar beslenme faaliyetleri sonucunda yaprak kaybı, doku zararı, deformasyon, renk değişimi ve gelişme geriliği gibi belirtiler meydana getirebilmektedir. Çevresel ve mevsimsel koşulların uygun olması, hastalıkların yayılmasını ve zararlı popülasyonlarının artmasını hızlandırarak ekonomik kayıpların büyümesine yol açabilmektedir. Bu nedenle hastalık ve zararlıların erken dönemde belirlenmesi, yayılma ve zarar düzeyleri artmadan gerekli mücadele önlemlerinin alınması açısından büyük önem taşımaktadır. Etkili ve zamanında gerçekleştirilen teşhis ve izleme çalışmaları, ürün kayıplarının azaltılması ve sürdürülebilir bitki koruma uygulamalarının geliştirilmesinde temel bir rol oynamaktadır (Türkoğlu ve Hanbay, 2019).

Bitki koruma kapsamında yabancı otların, zararlı böceklerin, nematodların ve bitki hastalıklarının doğru ve zamanında teşhis edilmesi, etkili mücadele yöntemlerinin belirlenmesi ve ürün kayıplarının azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte, bu etmenlerin teşhisinde kullanılan geleneksel yöntemler çoğunlukla uzman bilgisine, ayrıntılı incelemelere ve bazı durumlarda laboratuvar analizlerine dayanmaktadır. Yabancı otların teşhisinde yaprak şekli ve dizilişi, gövde yapısı, tüylenme, çiçek ve tohum özellikleri gibi morfolojik karakterler değerlendirilmekte; flora kaynakları, teşhis anahtarları ve herbaryum örneklerinden yararlanılmaktadır (Anderson, 1996; Holm ve ark, 1977). Ancak özellikle erken gelişme dönemlerinde birbirine benzeyen türlerin ayrımının güçleşmesi ve morfolojik özelliklerin gelişme dönemine göre değişebilmesi teşhis doğruluğunu etkileyebilmektedir (Zimdahl, 2007). Benzer şekilde zararlı böceklerin geleneksel teşhisi vücut yapısı, anten özellikleri, renk ve desen gibi morfolojik karakterlerin incelenmesine dayanmakta ve özellikle çok sayıda örneğin değerlendirildiği geniş ölçekli izleme çalışmalarında önemli ölçüde zaman, iş gücü ve taksonomik uzmanlık gerektirmektedir. Nematodların teşhisinde ise morfolojik ve morfometrik karakterlerden yararlanılmakta, özellikle ergin dişi bireylerin ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir (Kumari ve Lišková, 2009; Kumari ve ark, 2010). Cins düzeyinde yapılabilecek hatalı bir teşhis, yanlış teşhis anahtarının kullanılmasına ve dolayısıyla tür düzeyindeki tanımlamaların ve buna bağlı mücadele

kararlarının güvenilirliğinin azalmasına neden olabilmektedir. Bitki virüslerinde ise belirtilerin görsel olarak değerlendirilmesinin ardından enfeksiyonun doğrulanması için serolojik ve moleküler yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin Grapevine fanleaf virus (GFLV) teşhisinde kullanılan ELISA ve RT-PCR yöntemleri güvenilir olmakla birlikte zaman, iş gücü ve özel laboratuvar altyapısı gerektirmeleri nedeniyle geniş ölçekli bağ surveylerinde bazı sınırlılıklar taşımaktadır (Maliorka ve ark, 2015; Singh ve Misra, 2017; Vigne ve ark, 2018). Bu sınırlılıklar, bitki koruma etmenlerinin daha hızlı, standart ve geniş alanlarda belirlenmesine yönelik alternatif teknolojilere olan gereksinimi artırmış; son yıllarda yapay zekâ, makine öğrenmesi ve özellikle derin öğrenmeye dayalı görüntü analiz yöntemleri yabancı ot, zararlı böcek, nematod ve hastalık etmenlerinin otomatik olarak tanınması ve sınıflandırılmasında önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir.

Son yıllarda yapay zekâ ve derin öğrenme teknolojilerindeki gelişmeler, bitki hastalık, yabancı ot ve zararlılarının otomatik olarak belirlenmesinde önemli ilerlemeler sağlamıştır. Özellikle Evrişimli Sinir Ağları (CNN), görüntülerdeki ayırt edici özellikleri otomatik olarak öğrenebilmesi sayesinde hastalık belirtilerinin ve zararlıların tespit, sınıflandırma ve segmentasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. VGGNet ve InceptionNet gibi CNN tabanlı mimariler ise farklı büyüklük ve özellikteki hastalık belirtileri ile zararlıların tanınmasında yüksek başarı göstermektedir. Derin öğrenme yöntemlerinin uzaktan algılama verileriyle bütünleştirilmesi, geniş tarım alanlarından elde edilen görüntülerin hızlı ve otomatik biçimde analiz edilmesine ve biyotik streslerin izlenmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu modellerin geliştirilmesinde büyük ve etiketlenmiş veri setlerine ve yüksek hesaplama kapasitesine ihtiyaç duyulması, ayrıca farklı çevre ve arazi koşullarındaki genellenebilirliklerinin sınırlı olabilmesi önemli sorunlar arasında yer almaktadır (Wang ve ark., 2025).

Derin öğrenme

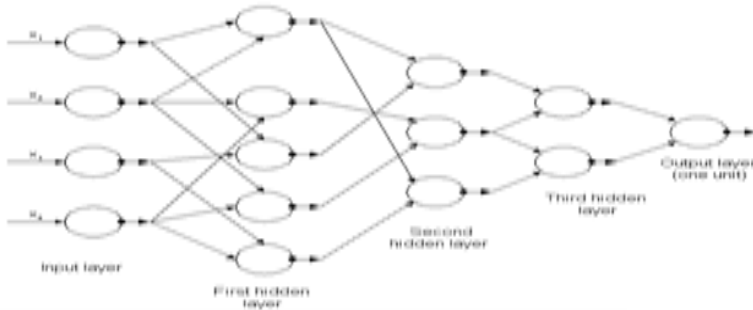
Derin öğrenme, yapay zekâ ve makine öğrenmesi kapsamında yer alan ve çok katmanlı yapay sinir ağları aracılığıyla verilerden öğrenmeyi sağlayan bir yaklaşımdır. “Derin” kavramı, verilerin ağ içerisinde birden fazla katman ve temsil düzeyinden geçirilerek işlenmesini ifade etmektedir. Bu yapı sayesinde derin öğrenme modelleri, büyük ve karmaşık veri kümelerinde bulunan örüntüleri ve ayırt edici özellikleri

otomatik olarak öğrenerek yüksek düzeyli veri temsilleri oluşturabilmekte; sınıflandırma, regresyon ve tahmin gibi farklı görevleri gerçekleştirebilmektedir. Denetimli veya denetimsiz öğrenme yaklaşımlarıyla uygulanabilen derin öğrenme; görüntü, video, zaman serisi, metin ve ses gibi farklı yapıdaki verilerin analizinde kullanılabilen ve özellikle büyük veri kümelerinde yüksek performans gösterebilmektedir (Sarker, 2021; Ateş, 2022). Derin öğrenmede öğrenme süreci, önceden tanımlanmış kurallar yerine eğitim örneklerinden yararlanılarak gerçekleştirilmekte ve modelin ürettiği hata doğrultusunda ağ parametreleri güncellenerek performansın iyileştirilmesi amaçlanmaktadır (Yılmaz ve Kaya, 2022).

Derin öğrenmenin tarihsel gelişimi

Derin öğrenmenin tarihsel gelişimi, yapay sinir ağlarının ortaya çıkışına kadar uzanmaktadır. Bu alandaki ilk önemli adım, 1943 yılında Warren McCulloch ve Walter Pitts tarafından biyolojik nöronların çalışma prensibinden esinlenerek geliştirilen matematiksel nöron modeliyle atılmıştır. 1950’li yıllarda Alan Turing ve Arthur Samuel tarafından gerçekleştirilen çalışmalar, makine zekâsı ve makine öğrenmesi alanlarının gelişimine katkı sağlamıştır. 1965 yılında Alexey Ivakhnenko ve V. G. Lapa, Grup Veri İşleme Yöntemi’ni (Group Method of Data Handling, MDH (Şekil 1) geliştirerek ilk çok katmanlı derin ağ yapılarını ortaya koymuş ve derin öğrenmenin gelişiminde önemli bir dönüm noktası oluşturmuştur (Ivakhnenko ve Lapa, 1965; Tan ve ark, 2021; Akın ve Şahin, 2024; Kuru ve ark., 2025).

Derin öğrenmenin gelişimindeki önemli aşamalardan biri, Kuniyiko Fukushima tarafından 1980 yılında geliştirilen Neocognitron modeli olmuş ve bu yapı sonraki yıllarda görüntü analizinde yaygınlaşan Evrişimli Sinir Ağlarının (CNN) gelişimine önemli katkı sağlamıştır (Fukushima, 1980).



Şekil 1. Ivakhnenko ve Lapa tarafından geliştirilen ilk çok katmanlı derin öğrenme ağı (GMDH) mimarisi.

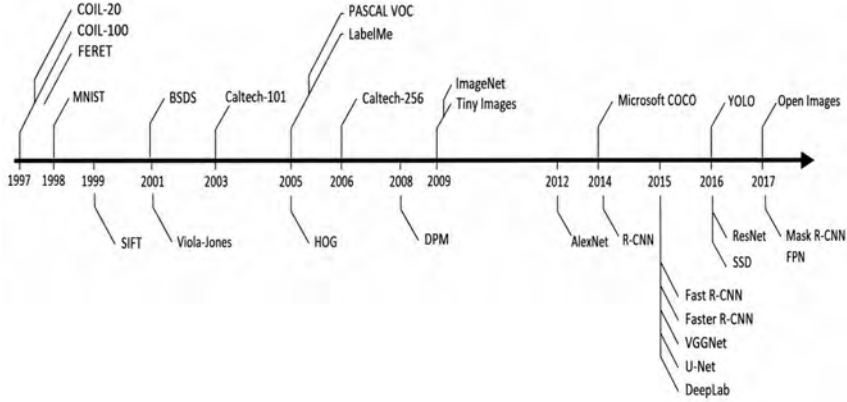
1980’li yıllarda çok katmanlı sinir ağlarının eğitilmesine yönelik çalışmaların hız kazanması ve geri yayılım algoritmasının kullanılması, daha karmaşık örüntülerin öğrenilebilmesine olanak sağlamıştır. Yann LeCun ve çalışma arkadaşları, 1989 yılında evrişimli sinir ağlarını geri yayılım yaklaşımıyla birleştirerek el yazısı rakamların, çeklerin ve posta kodlarının tanınmasında kullanmış ve böylece CNN mimarilerinin görüntü tanıma uygulamalarındaki gelişimine önemli katkıda bulunmuştur (LeCun ve ark, 1989; Tan ve ark, 2021).

1990’lı yıllardan itibaren farklı sinir ağı mimarilerinin geliştirilmesine devam edilmiş; özellikle 1997 yılında Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory, LSTM) modelinin geliştirilmesi, uzun süreli bağımlılıkların öğrenilmesine yönelik önemli bir ilerleme sağlamıştır (Şekil 2). 2000’li yıllarda ise çok katmanlı sinir ağlarının etkili biçimde eğitilmesine yönelik çalışmalarla derin öğrenme yeniden ivme kazanmıştır. Hinton ve çalışma arkadaşlarının derin ağların katman bazlı ön eğitime yönelik çalışmaları, daha derin ağların eğitilebilmesine katkı sağlamış ve derin öğrenmenin yaygınlaşmasında önemli rol oynamıştır (Tan ve ark, 2021).

Derin öğrenmenin hızlı gelişiminde bilgisayarların işlem gücünün artması, grafik işlem birimlerinin (GPU) yaygınlaşması ve büyük miktarda etiketlenmiş verinin erişilebilir hâle gelmesi belirleyici olmuştur. Özellikle 2009 yılında oluşturulan ImageNet, milyonlarca etiketli görüntü içeren geniş ölçekli bir veri kaynağı sağlayarak derin sinir ağlarının büyük görüntü veri setleri üzerinde eğitilmesine önemli katkıda bulunmuştur (Deng ve ark., 2009; Tan ve ark., 2021). Derin öğrenmenin görüntü analizindeki yükselişinin önemli dönüm noktalarından biri ise Krizhevsky ve ark (2012) tarafından geliştirilen CNN tabanlı AlexNet modelinin ImageNet yarışmasında elde ettiği yüksek performans olmuştur. Bu gelişmelerin ardından CNN tabanlı derin öğrenme yaklaşımları görüntü sınıflandırma, nesne tespiti ve görüntü segmentasyonu gibi bilgisayarlı görü görevlerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Derin öğrenme modellerinin önemli özelliklerinden biri, giriş verilerindeki ayırt edici özellikleri öğrenme süreci içerisinde otomatik olarak belirleyebilmesidir. Özellikle CNN’lerde öğrenme hiyerarşik biçimde gerçekleşmekte; ağın farklı katmanlarında görüntüye ait farklı düzeylerde özellikler öğrenilerek sonraki katmanlara aktarılmaktadır. Böylece görüntü analizinde gerekli özelliklerin kullanıcı tarafından

önceden tanımlanmasına olan gereksinim azalmakta ve özellik çıkarımı modelin öğrenme sürecinin bir parçası hâline gelmektedir. CNN tabanlı modeller bu özellikleri sayesinde görüntü sınıflandırma, nesne tanıma ve görüntü segmentasyonu gibi görevlerde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Sarker, 2021; Tan ve ark., 2021).



Şekil 2. Nesne tanıma algoritmaları ve veri setlerinin tarihsel gelişimi (Salari ve ark., 2022).

Derin öğrenme ile nesne tespiti çalışma yapısı

Derin öğrenme modellerinde öğrenme, verilerin ağ içerisindeki birden fazla katmandan geçirilmesiyle gerçekleşmektedir. İlk katmanlarda görüntüdeki kenar, çizgi ve yön gibi basit özellikler öğrenilirken, sonraki katmanlarda bu özellikler birleştirilerek şekiller, nesne parçaları ve nesneler gibi daha karmaşık özellikler belirlenmektedir. Böylece görüntüde hangi özelliklerin önemli olduğunun insanlar tarafından önceden tanımlanmasına gerek kalmadan, model gerekli ayırt edici özellikleri doğrudan eğitim verilerinden öğrenebilmektedir (LeCun ve ark., 2015; Sarker, 2021).

Derin öğrenme modellerinin eğitimi, ileri besleme ve geri yayılım olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. İleri besleme aşamasında girdi verileri ağın katmanları boyunca işlenerek bir çıktı elde edilir. Daha sonra modelin ürettiği çıktı ile gerçek değer arasındaki fark, kayıp fonksiyonu kullanılarak hesaplanır. Geri yayılım aşamasında ise bu hata ağın katmanları boyunca geriye doğru iletilir ve bağlantı ağırlıkları güncellenir. Bu işlem eğitim süresince tekrar edilerek modelin hatasının azaltılması ve verilerdeki karmaşık örüntüleri öğrenmesi sağlanır (Ateş, 2022).

Evrişimsel sinir ağlarında (CNN) görüntülere ait önemli özellikler, çok katmanlı ağ yapısı içinde otomatik olarak öğrenilmektedir. Girdi görüntüsü

ağ boyunca ilerlerken evrişim katmanları kenar, çizgi ve şekil gibi temel görsel özellikleri belirler. Havuzlama katmanları ise özellik haritalarının boyutunu küçülterek hesaplama yükünü azaltır. Ağın daha ileri katmanlarında bu basit özellikler bir araya getirilerek daha karmaşık yapılar ve nesnelere ait özellikler oluşturulur. Son olarak tam bağlı katmanlar ve sınıflandırma katmanları kullanılarak görüntü uygun sınıfa atanır. Bu hiyerarşik özellik öğrenme yeteneği sayesinde CNN'ler görüntü sınıflandırma ve nesne tespiti çalışmalarında yaygın biçimde kullanılmaktadır (Doğan ve Türkoğlu, 2019).

- **Veri setlerinin hazırlanması**

Derin öğrenme modellerinin başarısı, eğitimde kullanılan veri setinin kalitesi, büyüklüğü ve çeşitliliğine bağlıdır. Nesne tespiti çalışmalarında veri setleri genellikle eğitim (training), doğrulama (validation) ve test (test) olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Eğitim verileri modelin öğrenmesi, doğrulama verileri eğitim sırasında model performansının izlenmesi ve en uygun modelin seçilmesi, test verileri ise eğitilen modelin daha önce görmediği görüntüler üzerindeki başarısının değerlendirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. PASCAL VOC, ImageNet, MS COCO ve Open Images, görüntü sınıflandırma ve nesne tespiti çalışmalarında yaygın olarak kullanılan veri setleri arasında yer almaktadır (Tsirtsakis ve ark., 2025).

Nesne tespiti için hazırlanan veri setlerinde, görüntülerde bulunan hedef nesnelerin modele tanıtılması amacıyla anotasyon (etiketleme) işlemi yapılmaktadır. Bu işlemde nesneler genellikle sınırlayıcı kutular (bounding boxes) ile işaretlenmekte ve her nesneye ait sınıf etiketi belirtilmektedir. Böylece model, eğitim sırasında görüntüdeki nesnenin hem hangi sınıfa ait olduğunu hem de görüntü içerisindeki konumunu öğrenmektedir (Tsirtsakis ve ark., 2025).

- **Model performansının değerlendirilmesi**

Derin öğrenme tabanlı nesne tespit modellerinin başarısını değerlendirmek için Intersection over Union (IoU), precision (kesinlik), recall (duyarlılık), Average Precision (AP) ve mean Average Precision (mAP) gibi performans ölçütleri kullanılmaktadır. IoU, model tarafından tahmin edilen sınırlayıcı kutu ile gerçek nesnenin sınırlayıcı kutusunun ne ölçüde örtüştüğünü göstermektedir. Tahmin edilen nesnenin sınıfı doğruysa ve IoU değeri belirlenen eşik değerini karşılıyorsa tahmin True Positive (TP) olarak kabul edilmektedir. Modelin yanlış yaptığı pozitif tahminler False Positive (FP), görüntüde bulunmasına rağmen tespit

edemediği nesneler ise False Negative (FN) olarak değerlendirilmektedir (Padilla ve ark., 2021).

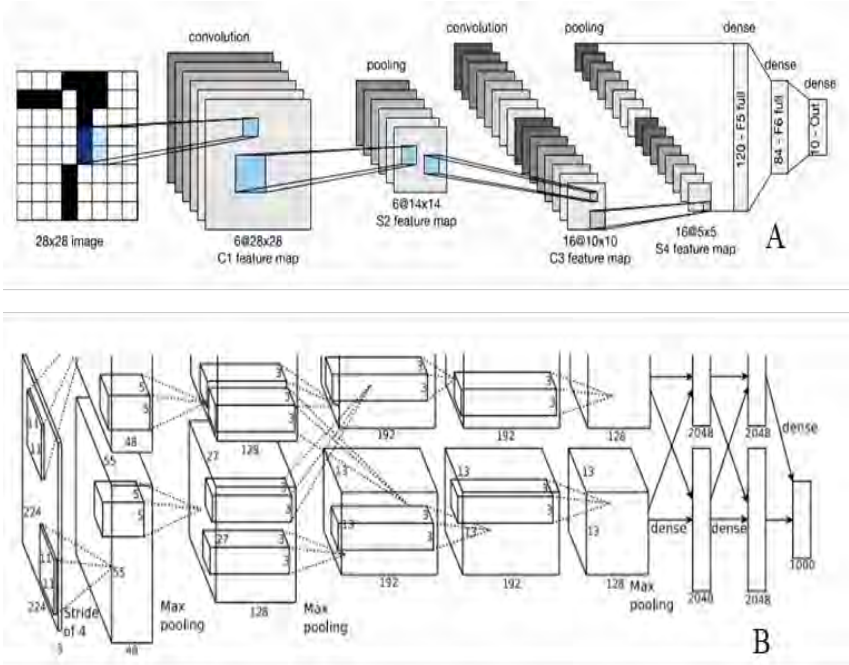
Precision, model tarafından yapılan pozitif tahminlerin ne kadarının doğru olduğunu $[TP/(TP+FP)]$, recall ise görüntüde bulunan gerçek nesnelerin ne kadarının model tarafından doğru şekilde tespit edildiğini $[TP/(TP+FN)]$ göstermektedir. Average Precision (AP), her bir sınıf için precision ve recall değerleri arasındaki ilişkiye göre hesaplanan performansı ifade etmektedir. Mean Average Precision (mAP) ise tüm sınıflar için elde edilen AP değerlerinin ortalamasıdır. Bu nedenle mAP, nesne tespit modellerinin genel başarısının değerlendirilmesi ve farklı modellerin karşılaştırılmasında yaygın olarak kullanılan performans ölçütlerinden biridir (Padilla ve ark., 2021).

Derin öğrenme ile nesne tespitinde kullanılan başlıca mimariler

Derin öğrenme teknikleri, bilgisayarlı görü uygulamalarında görüntü sınıflandırma (image classification), nesne tespiti (object detection) ve semantik segmentasyon (semantic segmentation) gibi farklı görevlerde kullanılmaktadır. Görüntü sınıflandırmada görüntünün tamamı değerlendirilerek hangi sınıfa ait olduğu belirlenirken, nesne tespitinde görüntüde bulunan nesnenin hem sınıfı hem de görüntü içerisindeki konumu belirlenmektedir. Semantik segmentasyonda ise görüntüdeki her piksel bir sınıfa atanarak hedef nesne veya bölgelerin sınırları ayrıntılı olarak ortaya çıkarılmaktadır (Kuru ve ark., 2025).

Derin öğrenmede farklı veri türleri ve öğrenme görevleri için çeşitli ağ mimarileri geliştirilmiştir. Bunlar arasında Evrişimli Sinir Ağları (CNN), Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN), Uzun Kısa Süreli Bellek ağları (LSTM), otomatik kodlayıcılar (AE) ve Çekişmeli Üretici Ağlar (GAN) bulunmaktadır. CNN'ler özellikle görüntülerin analizinde, RNN ve LSTM ağları ardışık ve zamansal verilerin değerlendirilmesinde, otomatik kodlayıcılar özellik çıkarımı ve veri temsiline, GAN'lar ise yeni görüntülerin oluşturulması ve veri artırma gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Sarker, 2021). Bu mimariler içerisinde CNN'ler, görsel verilerin analizinde en yaygın kullanılan yaklaşımlardan biridir (Ateş, 2022). CNN mimarileri zaman içerisinde önemli gelişmeler göstermiştir. İlk CNN modellerinden LeNet (Resim 2A), evrişim ve havuzlama katmanlarını kullanarak sonraki CNN mimarilerinin gelişimine temel oluşturmuştur. AlexNet (Resim 2B), dropout gibi yöntemlerden yararlanarak derin CNN modellerinin görüntü sınıflandırmadaki başarısını

göstermiştir. AlexNet'in geliştirilmiş bir biçimi olan ZFNet ise filtre boyutları ve adım değerlerinde yapılan düzenlemelerle görüntü özelliklerinin daha etkili biçimde çıkarılmasını sağlamıştır. GoogLeNet, farklı büyüklükteki evrişim filtrelerini aynı anda kullanan Inception modülleri sayesinde farklı ölçeklerdeki özelliklerin öğrenilmesine olanak sağlamış; VGG ise küçük evrişim filtrelerinin art arda kullanıldığı derin ve düzenli ağ yapısıyla öne çıkmıştır (Tsirtsakis ve ark., 2025).



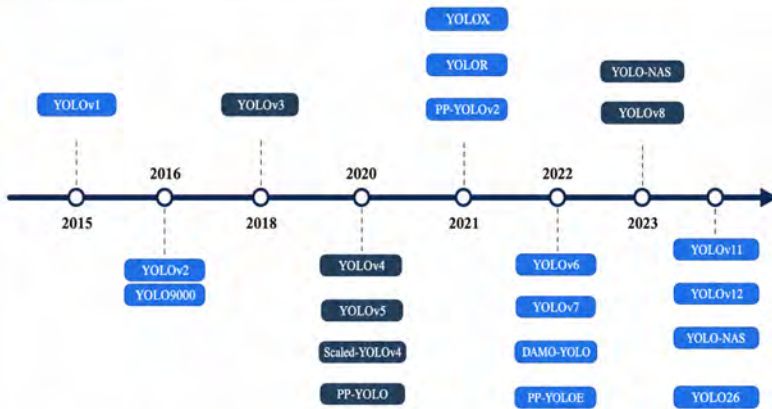
Şekil 3. A. LeNet (Zhang ve ark., 2023) B. AlexNet (Krizhevsky ve ark., 2021) mimarileri

ResNet, artık (residual) bağlantılar sayesinde çok daha derin ağların eğitilebilmesine olanak sağlamıştır (He ve ark., 2016). DarkNet, özellikle YOLO modellerinde özellik çıkarıcı omurga olarak kullanılırken, MobileNet depthwise ve pointwise evrişimlerden yararlanarak hesaplama maliyetini azaltan ve mobil cihazlarda çalışmaya uygun daha hafif bir mimari sunmuştur (Tsirtsakis ve ark., 2025).

Derin öğrenme tabanlı nesne tespit modelleri genel olarak iki aşamalı ve tek aşamalı modeller olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. İki aşamalı modellerin öncülerinden R-CNN, önce görüntüde nesne bulunabilecek aday bölgeleri belirlemekte, ardından bu bölgeleri CNN kullanarak sınıflandırmaktadır. SPPNet, farklı boyutlardaki görüntülerin işlenmesine olanak sağlayan uzamsal piramit havuzlama yaklaşımını geliştirmiştir.

YOLO modelleri, nesneleri görüntü içerisinde hızlı ve doğru bir şekilde tespit etmek amacıyla zaman içerisinde sürekli geliştirilmiştir. İlk model olan YOLOv1, nesne tespitini tek bir sinir ağı üzerinden gerçekleştirerek gerçek zamanlı nesne tespitinin temelini oluşturmuştur. YOLOv2’de batch normalization ve anchor box kullanılarak tespit başarısı artırılmış, YOLOv3’te ise farklı büyüklükteki nesnelerin daha iyi belirlenebilmesi için çok ölçekli tespit yaklaşımı kullanılmıştır. YOLOv4’te CSPDarknet53, SPP ve PANet gibi yapılar ile Mosaic veri artırma yöntemi kullanılarak hız ve doğruluk geliştirilmiştir. YOLOv5 ise farklı model büyüklükleri sunarak kullanım amacına ve donanım kapasitesine göre hız ve doğruluk arasında seçim yapılmasına olanak sağlamıştır. Daha sonraki YOLO sürümlerinde modellerin daha hızlı ve verimli çalışmasına yönelik geliştirmeler yapılmıştır. YOLOv6’da anchor-free yaklaşım, YOLOv7’de özelliklerin daha etkili öğrenilmesini sağlayan E-ELAN, YOLOv8’de ise C2f yapısı ve farklı görevleri destekleyen daha esnek bir mimari kullanılmıştır. YOLOv9’da PGI ve GELAN ile eğitim sırasında bilgi kaybının azaltılması amaçlanırken, YOLOv10’da NMS işlemine ihtiyaç duymayan uçtan uca bir nesne tespit yaklaşımı geliştirilmiştir. YOLOv11’de ise C3k2 ve C2PSA yapıları kullanılarak özellik çıkarımı ve nesne tespit performansının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca yönlendirilmiş sınırlayıcı kutu (OBB) desteği sayesinde farklı açılardaki nesnelerin tespit edilmesine olanak sağlanmıştır. Böylece YOLO modelleri her yeni sürümle birlikte daha hızlı, daha doğru ve daha verimli nesne tespiti yapabilecek şekilde geliştirilmiştir (Murat ve Kıran, 2025).

Bu mimarilerden farklı olarak transformer tabanlı nesne tespit modelleri, CNN tabanlı yaklaşımlara alternatif olarak geliştirilmiştir.



Şekil 5. YOLO modellerinin tarihsel gelişimi 2015-2023 arası veriler Wang et al, 2023, diğerleri ise yazar tarafından güncellenerek eklenmiştir.

Bu modellerden Detection Transformer (DETR), nesne tespitini anchor box kullanımına ihtiyaç duymadan uçtan uca gerçekleştirmekte ve attention mekanizması sayesinde görüntünün farklı bölgeleri arasındaki ilişkileri birlikte değerlendirebilmektedir (Carion ve ark, 2020). Böylece özellikle karmaşık arka planlara ve birden fazla nesneye sahip görüntülerde nesnelerin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. DETR yaklaşımının geliştirilmesiyle daha hızlı ve verimli Transformer tabanlı nesne tespit modelleri ortaya çıkmıştır. Bunlardan RF-DETR, Deformable DETR ve Lightweight DETR yaklaşımlarından yararlanmakta ve özellik çıkarımı için DINOv2 Vision Transformer (ViT) omurgasını kullanmaktadır. Anchor box ve Non-Maximum Suppression (NMS) gerektirmeyen uçtan uca yapısı sayesinde farklı büyüklüklerdeki nesnelerin ve karmaşık görüntü özelliklerinin tespitine olanak sağlamaktadır (Li ve ark., 2026).

DERİN ÖĞRENME İLE HASTALIKLARIN, YABANCI OTLARIN VE ZARARLILARIN TESPİTİ

Tarımda zararlıların ve bitki hastalıklarının doğru ve zamanında belirlenmesi, etkili mücadele kararlarının alınması ve ürün kayıplarının azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Geleneksel teşhis ve izleme yöntemleri çoğunlukla uzman değerlendirmesine, manuel gözlemlere ve bazı durumlarda laboratuvar analizlerine dayanmakta; bu durum zaman ve iş gücü gerektirmektedir. Ayrıca benzer belirti veya morfolojik özelliklere sahip etmenlerin birbirinden ayrılması güç olabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda Evrişimli Sinir Ağları (CNN) başta olmak üzere derin öğrenme yöntemleri, hastalık ve zararlıların görüntülerden otomatik olarak sınıflandırılması, tespit edilmesi ve konumlarının belirlenmesinde önemli bir alternatif hâline gelmiştir.

CNN tabanlı yaklaşımlar, görüntülerde bulunan renk değişimi, leke, doku bozulması, şekil ve diğer ayırt edici görsel özellikleri otomatik olarak öğrenebilmektedir. Derin öğrenme uygulamalarında sınıflandırma, nesne tespiti ve segmentasyon yaklaşımlarından yararlanılmaktadır. Sınıflandırmada görüntünün hangi hastalık veya zararlı sınıfına ait olduğu belirlenirken, nesne tespitinde hedef etmenin veya hastalık belirtisinin görüntü içerisindeki konumu da belirlenmektedir. Segmentasyon yöntemlerinde ise hastalıklı veya zararlıdan etkilenmiş alanlar piksel düzeyinde ortaya çıkarılabilmektedir. Bu amaçlarla VGG, ResNet, DenseNet, EfficientNet ve MobileNet gibi CNN tabanlı mimarilerin yanı

sıra YOLO, Faster R-CNN ve RetinaNet gibi nesne tespit modelleri kullanılmaktadır.

Bununla birlikte, zararlıların küçük boyutlu veya görüntü içerisinde yoğun olarak bulunması, türler arasındaki görsel benzerlikler, hastalık belirtilerinin farklı gelişme dönemlerinde değişiklik göstermesi ve doğal arazi koşullarındaki ışık, arka plan ve görüntü kalitesi farklılıkları model performansını sınırlandırabilmektedir. Bu sorunların azaltılması amacıyla veri artırma, transfer öğrenme, çok ölçekli özellik çıkarımı ve dikkat mekanizmaları gibi yaklaşımlardan yararlanılmaktadır. Özellikle ImageNet gibi büyük veri setlerinde önceden eğitilmiş modellerin kullanıldığı transfer öğrenme yaklaşımı, sınırlı sayıda tarımsal görüntünün bulunduğu durumlarda avantaj sağlayabilmektedir. Ayrıca Pest24 ve AgriPest gibi geniş ölçekli veri setlerinin geliştirilmesi, zararlıların doğal tarla koşullarında tespitine yönelik modellerin geliştirilmesine katkı sağlamıştır (Venkateswara vd., 2025; Mabizella vd., 2025).

Yabancı otların görüntü tabanlı otomatik tespiti genel olarak görüntülerin elde edilmesi, ön işlenmesi, özelliklerin çıkarılması ve yabancı otların tespit edilerek sınıflandırılması aşamalarından oluşmaktadır (Shanmugam ve ark., 2020). Geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerinde yabancı otların belirlenmesi için renk, şekil, doku ve spektral özellikler gibi ayırt edici özelliklerin önceden belirlenmesi ve görüntülerden çıkarılması gerekmektedir. Ancak kültür bitkileri ile yabancı otların benzer görsel özelliklere sahip olması, değişken ışık ve arka plan koşulları, bitkilerin birbirini örtmesi ve farklı gelişme dönemlerinde morfolojik özelliklerin değişmesi bu yöntemlerin başarısını sınırlandırabilmektedir. Bilgisayar teknolojileri, grafik işlem birimleri (GPU) ve gömülü işlemcilerdeki gelişmelerle birlikte makine öğrenmesi ve özellikle derin öğrenme yöntemleri yabancı otların otomatik olarak belirlenmesinde giderek daha yaygın kullanılmaya başlanmıştır (Hasan ve ark., 2021).

Son yıllarda derin öğrenme yöntemlerinin yabancı ot tespitindeki kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Bu çalışmalarda başta Evrişimli Sinir Ağları (CNN) olmak üzere SegNet, GoogLeNet, ResNet, VGGNet, U-Net, DeepLab, YOLO, SSD, Mask R-CNN, MobileNet ve DenseNet gibi farklı mimarilerden yararlanılmaktadır. CNN tabanlı modeller, yabancı ot görüntülerindeki ayırt edici özellikleri manuel olarak tanımlamaya gerek kalmadan eğitim verilerinden otomatik olarak öğrenebilmekte ve böylece

kültür bitkileri ile yabancı otların birbirinden ayrılmasına olanak sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde farklı büyüklük, yönelim, gelişme dönemi ve örtüşme durumlarındaki yabancı otların belirlenmesinde kullanılabilir (Murad ve ark., 2021).

Yabancı otların belirlenmesinde sınıflandırma, nesne tespiti, semantik segmentasyon ve örnek segmentasyonu gibi farklı derin öğrenme yaklaşımlarından yararlanılmaktadır. Sınıflandırma modelleri görüntüde bulunan yabancı otun türünün veya gelişme döneminin belirlenmesini sağlarken, nesne tespit modelleri yabancı otların görüntü içerisindeki konumlarını sınırlayıcı kutularla belirlemektedir. Segmentasyon modellerinde ise yabancı otların kapladığı alanlar piksel düzeyinde ortaya çıkarılabilmektedir. Murad ve ark. (2021), yabancı ot tespitine yönelik çalışmalarda CNN tabanlı modellerin çok sayıda farklı varyantının kullanıldığını; YOLO, U-Net ve AlexNet gibi mimarilerin de yabancı otların belirlenmesinde kullanılan modeller arasında bulunduğunu bildirmiştir.

Yabancı ot tespit çalışmalarında transfer öğrenmeden de yararlanılmakta ve büyük veri setleri üzerinde önceden eğitilmiş CNN modelleri yabancı ot veri setlerine uyarlanabilmektedir. Ayrıca derin öğrenme modellerinin RGB görüntülerin yanı sıra multispektral, hiperspektral ve derinlik görüntüleri gibi farklı veri kaynaklarıyla birlikte kullanılabilmesi, değişken tarla koşullarındaki uygulanabilirliğini artırmaktadır. Bu özellikleri sayesinde derin öğrenme yöntemleri, kültür bitkileri ile yabancı otların ayrılması, yabancı otların gerçek zamanlı olarak tespit edilmesi ve mücadele uygulamalarının yalnızca yabancı ot bulunan alanlara yönlendirilmesi açısından önemli olanaklar sunmaktadır. Böylece derin öğrenme tabanlı yabancı ot tespit sistemleri, hassas tarım ve alana özgü yabancı ot yönetimi uygulamalarının geliştirilmesine katkı sağlayabilmektedir (Zhao ve Wang, 2025).

Farklı tarla bitkilerinde gerçekleştirilen çalışmalar, derin öğrenme yöntemlerinin hastalık, yabancı ot ve zararlıların sınıflandırılması ve tespitinde yüksek başarı sağlayabildiğini göstermektedir (Tablo 1).

Tablo 1. Tarla bitkilerinde hastalık, zararlı ve yabancı otların derin öğrenme modelleri ile tespiti üzerine yapılan bazı çalışmalar

Bitki	Hastalık / Amaç	Kullanılan model / yöntem	Başarı	Referans
Çeltik	Yaprak hastalıklarının sınıflandırılması	CNN modelleri + transfer öğrenme + SVM; en başarılı ResNet50-SVM	F1 = 0,9838	Sethy ve ark (2020)
Mısır	Pas, <i>Cercospora</i> yaprak lekesi ve kuzey yaprak yanıklığının tespiti	Faster R-CNN + ResNet50	%93,5 doğruluk	Kumar ve ark (2022)
Mısır	Yaprak hastalıklarının sınıflandırılması	DenseNet121 + EfficientNetB0	%98,56 doğruluk	Amin ve ark (2022)
Çeltik	Bakteriyel yaprak yanıklığının erken tespiti	SDC-3DCNN + RF ile dalga boyu seçimi	%95,44 doğruluk	Cao ve ark (2022)
Çeltik	Yaprak hastalıklarının sınıflandırılması	CNN modelleri + transfer öğrenme + SVM; en başarılı ResNet50-SVM	F1 = 0,9838	Sethy ve ark (2020)
Mısır	Pas, <i>Cercospora</i> yaprak lekesi ve kuzey yaprak yanıklığının tespiti	Faster R-CNN + ResNet50	%93,5 doğruluk	Kumar ve ark (2022)
Mısır	Yaprak hastalıklarının sınıflandırılması	Transfer öğrenme + EfficientNet	%98,52 doğruluk	Liu ve ark. (2020)
Buğday	Pas hastalıkları	EfficientNet-B4 + transfer öğrenme	%99,35 test doğruluğu	Nigam ve ark. (2023)
Mısır	Yaprak hastalıklarının tanınması	Inception + ResNet tabanlı geliştirilmiş CNN	>%98 doğruluk; P: %95,74; R: %99,41; F1: %97,36	Wenxia ve ark. (2021)

Buğday	Sarı pas, kahverengi pas, külleleme, <i>Septoria</i> yaprak lekesi	MobileNet InceptionV3 VGG16 Xception CerealConv	%91,46, %91,41, %85,16 %89,87 %97,05.	Long ve ark. (2023)
Buğday	Hastalık ve zararlılar	Geliştirilmiş YOLOv8 (Slim- Neck + CBAM + MPDIoU)	mAP: %96,5;	Nie (2025)
Buğday	Külleleme, rastık	MGT-YOLO (YOLOv8 + çok ölçekli kenar geliştirme + C2f GlobalContext + ViT)	Genel mAP@0.5: %89,5; külleleme: %90,0; rastık: %65,5	Zhong ve ark. (2025)
Çeltik	Bakteriyel yaprak yanıklığı giibi hastalıklar	MobileNet-CA- YOLO	mAP@0.5: %93,7; mAP@0.5:0.95: %67,0; FPS: 84,74	Jia ve ark. (2023)
Çeltik	Bakteriyel yaprak yanıklığı giibi hastalıklar	YOLOv7	%94,6 mAP@0.5 %78,14 mAP@0.5:0.95 52,08 FPS	Jia ve ark. (2023)
Çeltik	Çeltik sap kurdu ve diğer zararlılar	Geliştirilmiş YOLOv8 (CBAM + BiFPN)	mAP@0.5: %98,8; mAP@0.5:0.95: %78,6	Xiong ve ark (2024)
Buğday	<i>Aelia</i> spp., <i>Anisoplia</i> spp., <i>Eurygaster</i> spp., <i>Pachytychius</i> <i>hordei</i> , <i>Zabrus</i> spp.	ResNet-18	%98 sınıflandırma	Hayıt ve Köse (2021)
Buğday	Tel kurtları, Cicadellidae	SEInception- ResNet-V3	Doğruluk: %81,50;	Lİ ve ark. (2024)
Buğday	Külleleme, pas gibi hastalıklar, afitler ve diğer zararlılar	MDCVggNet16	Doğruluk: %97.27	Xingxing ve ark., 2026

Mısır	Yaprak yanıklığı, <i>H. maydis</i> , gri yaprak lekesi, pas, sap kurdu	Geliştirilmiş ResNet50	Doğruluk: %96,02	Xu ve ark., 2023
Mısır	Beyaz kurt, danaburnu, tel kurdu ve diğer zararlılar	YOLOv8 YOLOv9	mAP@50: %73,4 mAP@50: %75,2	Mishra ve ark., 2026
Mısır	Hastalıklar ve zararlılar	DenseNet-121, ResNet-50	DenseNet-121 en yüksek doğruluk	Ahmed ve ark. (2025)
Mısır	Mısır kurdu, yeşilkurt/pamuk kurdu	YOLOv7 + Adan optimizer	mAP@0.5:0.95: %96,69	Zhang ve ark. (2023)
Mısır	Zararlılar	YOLOv5	mAP@0.5: %85,6; mAP@0.5:0.95: %51,1	Bibi ve ark. (2022)
Patates	Zararlılar	VGG-16 MobileNetV2 InceptionV3	Doğruluk: %94,44 Doğruluk: %75 Doğruluk: %58	Sohel ve ark. (2024)
Ayçiçeği	Gri küf, mildiyö, yaprak lekesi	ResNet101 SE-ResNet101	Doğruluk: %91,48 %92,55	Ünal ve ark. (2024)
Ayçiçeği	Gri küf, mildiyö, yaprak lekesi	SqueezeNet ShuffleNetV2 MnasNet-A1 MobileNetV3-Small EfficientNetV2-Small	Doğruluk: %84,08 %79,31 %88,59 %84,08 %90,19	Zhang ve Wu (2025)
Ayçiçeği	<i>Alternaria</i> , mildiyö, <i>Phoma</i> , <i>Verticillium</i>	VGG16 + MobileNet	Doğruluk: %89,20	Sirohi ve Malik (2021)
Ayçiçeği	<i>Verticillium</i> , külleme, pas	YOLOv4 + MobileNet	Doğruluk: %84	Chen ve ark. (2021)
Ayçiçeği	Gri küf, mildiyö	EfficientNetB3	Doğruluk: %97,6	Gülzar ve ark. (2023)
Buğday	<i>Sinapis arvensis</i> , <i>Cirsium</i>	YOLOv5s	Sınıflar genelinde ortalama tespit	Güzel ve ark. (2024)

	<i>arvense, Consolida regalis</i>		başarısı >%90; en yüksek %96	
Buğday	<i>L. buriatica, N. pulla, A. scoparia</i>	Mask R-CNN YOLO26s-seg RT-DETR-L	F1: 0,615; 0,655; 0,335 F1: 0,642; 0,568; 0,163 F1: 0,693; 0,647; 0,275	Jarantaibaatar (2026)
Mısır	Yabancı otlar	ECENet (EfficientNetB0 + geliştirilmiş CBAM)	Doğruluk: %99,92	Dheeraj ve Chand (2025).
Susam	Yabancı otlar	R-CNN + CNN- SVM + bounding box regresyonu	Doğruluk: %99,73	Nagaraj ve ark. (2026)
Şeker pancarı	<i>Convolvulus sepium</i>	Geliştirilmiş Tiny YOLOv3	mAP: 0,829; C. sepium AP@0.5: 0,761; şeker pancarı AP@0.5: 0,897	Gao ve ark. (2020)
Patates	Yabancı otlar	MC-YOLOv4 (MobileNetV3 + CBAM)	mAP: %98,52;	

SONUÇ VE ÖNERİLER

Derin öğrenme, görüntülerden ayırt edici özelliklerin otomatik olarak öğrenilmesine olanak sağlamasıyla görüntü sınıflandırma, nesne tespiti ve segmentasyon çalışmalarında önemli bir yaklaşım haline gelmiştir. CNN tabanlı mimarilerden YOLO ve transformer tabanlı DETR modellerine kadar yaşanan gelişmeler, nesne tespitinde hız ve doğruluğun artmasına önemli katkılar sağlamıştır. Tarla bitkilerinde yapılan çalışmalar, bu yöntemlerin hastalık, zararlı ve yabancı otların otomatik olarak belirlenmesinde başarılı şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Gelecekte daha çeşitli ve standart veri setlerinin oluşturulması, modellerin değişken tarla koşullarına uyarlanması ve gerçek zamanlı uygulamaların geliştirilmesiyle derin öğrenmenin hassas tarım ve sürdürülebilir bitki korumadaki kullanımının daha da yaygınlaşacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Ahmed, A. R., Imran, F. and Aziz, M. A. I. (2025). A deep learning approach for detecting pests and diseases in maize crops. In S. Palaiahnakote, R. Palit, M. Saracee, P. K. Atrey, X. Bai ve B. Raman (Ed.), *Data Science, AI and Applications. ICDSALA 2025*. Communications in Computer and Information Science, 2681. Springer. DOI: 10.1007/978-3-032-11335-1_23.
- Akın, E. ve Şahin, M. E. (2024). Derin öğrenme ve yapay sinir ağı modelleri üzerine bir inceleme. *EMO Bilimsel Dergi*, 14(1), 27–38.
- Amin, H., Darwish, A., Hassanien, A. E. and Soliman, M. (2022). End-to-end deep learning model for corn leaf disease classification. *IEEE Access*, 10, 31103–31115.
- Bibi, A., Moetesum, M. and Siddiqi, I. (2022). Deep vision for pest detection in corn fields. *2022 19th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*, 343-348. IEEE.
- Cao, Y., Yuan, P., Xu, H., Martinez-Ortega, J. F., Feng, J. vd. (2022). Detecting asymptomatic infections of rice bacterial leaf blight using hyperspectral imaging and 3-dimensional convolutional neural network with spectral dilated convolution. *Frontiers in Plant Science*, 13, 963170. DOI: 10.3389/fpls.2022.963170.
- Chen, S., Lv, F. and Huo, P. (2021). Improved detection of YOLOv4 sunflower leaf diseases. *2021 2nd International Symposium on Computer Engineering and Intelligent Communications (ISCEIC)*, 56–59. IEEE.
- Das, S., Pattanayak, S. and Behera, P. R. (2022). Application of machine learning: A recent advancement in plant diseases detection. *Journal of Plant Protection Research*, 122–135.
- Deng, L. and Yu, D. (2013). Deep learning: Methods and applications. *Foundations and Trends in Signal Processing*, 197–387. DOI: 10.1561/20000000039.
- Dheeraj, A. and Chand, S. (2025). Deep learning based weed classification in corn using improved attention mechanism empowered by explainable AI techniques. *Crop Protection*, 190, 107058.
- Gao, J., French, A. P., Pound, M. P., He, Y., Pridmore, T. P. and Pieters, J. G. (2020). Deep convolutional neural networks for image-based *Convolvulus sepium* detection in sugar beet fields. *Plant Methods*, 16(1), 29.
- Ghazal, T. M., Munir, S., Abbas, S., Athar, A., Alrababah, H. and Khan, M. A. (2023). Early detection of autism in children using transfer learning. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 36(1), 11–22.
- Gulzar, Y. (2025). Applications of transfer learning in sunflower disease detection: Advances, challenges, and future directions. *Turkish Journal of Biology*, 49(5), 534–549. DOI: 10.55730/1300-0152.2763.
- Guzel, M., Turan, B., Kadioglu, I., Basturk, A., Sin, B. and Sadeghpour, A. (2024). Deep learning for image-based detection of weeds from emergence to maturity in wheat fields. *Smart Agricultural Technology*, 9, 100552.
- Hasan, A. M., Soheli, F., Diepeveen, D., Laga, H. and Jones, M. G. (2021). A survey of deep learning techniques for weed detection from images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 184, 106067.
- Hayti, T. and Köse, S. E. (2023). Investigation of deep learning approaches for identification of important wheat pests in Central Anatolia. *Hittite Journal of Science and Engineering*, 10(3), 249–257. DOI: 10.17350/HJSE19030000314.
- He, K., Zhang, X., Ren, S. and Sun, J. (2016). Identity mappings in deep residual networks. *European Conference on Computer Vision*, 630–645. Springer International Publishing.
- He, T., Li, M. and Jin, D. (2025). Deep learning-based time series prediction for precision field crop protection. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1575796. DOI: 10.3389/fpls.2025.1575796.

- Jarantaibaatar, S., Islam, M. S., Caceres, M. L. L., Diez, Y., Indra, M., Leidemer, T., Bukin, V., Konno, S., Turbat, S., Bayaraa, B., Yokoyama, J., Nakamura, A., Chuluunbat, B., Silvestre, L. H. and Nicola, F. G. (2026). Comparison of deep learning models for weed detection and classification in wheat fields based on UAV imagery. *Applied Sciences*, 16(11), 5367. DOI: 10.3390/app16115367.
- Jia, L., Wang, T., Chen, Y., Zang, Y., Li, X., Shi, H. and Gao, L. (2023). MobileNet-CA-YOLO: An improved YOLOv7 based on the MobileNetV3 and attention mechanism for rice pests and diseases detection. *Agriculture*, 13(7), 1285. DOI: 10.3390/agriculture13071285.
- Krizhevsky, A., Sutskever, I. and Hinton, G. E. (2012). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Pro. Systems*, 1097-1105.
- Kumar, M. S., Ganesh, D., Turukmane, A. V., Batta, U. and Sayyadliyakat, K. K. (2022). Deep convolution neural network based solution for detecting plant diseases. *Journal of Pharmaceutical Negative Results*, 13, 464–471. DOI: 10.47750/pnr.2022.13.S01.57.
- Kuru, İ., Küpeli, H. ve Çevik, K. K. (2025). Derin öğrenme modellerinin testi için ortak platform tasarımı. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 693–709.
- LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y. and Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278–2324.
- Li, C., Chen, S., Ma, Y., Song, M., Tian, X. and Cui, H. (2024). Wheat pest identification based on deep learning techniques. *2024 IEEE 7th International Conference on Big Data and Artificial Intelligence (BDAI)*, 87–91. DOI: 10.1109/BDAI62182.2024.10692889.
- Li, J., Li, X., Hu, J., Liang, M., Jiang, K., Yang, H. and Tian, M. (2026). A transformer-enhanced real-time detection method for young fruits in complex orchard environments. *Smart Agricultural Technology*, 101762.
- Liu, J., Wang, M., Bao, L. and Li, X. (2020). EfficientNet based recognition of maize diseases by leaf image classification. *Journal of Physics: Conference Series*, 1693(1), 012148. IOP Publishing.
- Long, M., Hartley, M., Morris, R. J. and Brown, J. K. M. (2023). Classification of wheat diseases using deep learning networks with field and glasshouse images. *Plant Pathology*, 72(3), 536–547. DOI: 10.1111/ppa.13684.
- Mabizela, X. M., Kgopa, A. T. and Monchusi, B. B. (2025). A systematic literature review on deep learning applications in agricultural pest detection and control. *Proceedings of the 2025 International Conference on Artificial Intelligence and its Applications*, 1–8.
- Mishra, S., Dubey, A. and Kandasamy, V. (2026). A deep learning approach to efficient corn pest detection: Evaluating YOLO models for sustainable agriculture. *2026 IEEE 16th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 600–606. DOI: 10.1109/CCWC67433.2026.11393768.
- Murad, N. Y., Mahmood, T., Forkan, A. R. M., Morshed, A., Jayaraman, P. P. and Siddiqui, M. S. (2023). Weed detection using deep learning: A systematic literature review. *Sensors*, 23(7), 3670. DOI: 10.3390/s23073670.
- Murat, A. A. and Kiran, M. S. (2025). A comprehensive review on YOLO versions for object detection. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 70, 102161.
- Nagaraj, P., Muneeswaran, V., Sudar, K. M. vd. (2026). Deep learning and IoT-based framework for sesame plant identification and weed detection. *Scientific Reports*, 16, 22449. DOI: 10.1038/s41598-026-47961-1.
- Nie, C. (2025). Detection method of common wheat diseases based on improved YOLOv8. *Proceedings of the 2025 6th International Conference on Computer Information and Big Data Applications*, 19–24.
- Nigam, S., Jain, R., Marwaha, S., Arora, A., Haque, M. A., Dheeraj, A. and Singh, V. K. (2023). Deep transfer learning model for disease identification in wheat crop. *Ecological Informatics*, 75, 102068.

- Padilla, R., Passos, W. L., Dias, T. L. B., Netto, S. L. and da Silva, E. A. B. (2021). A comparative analysis of object detection metrics with a companion open-source toolkit. *Electronics*, 10(3), 279. DOI: 10.3390/electronics10030279.
- Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R. and Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 779–788.
- Salari, A., Djavadifar, A., Liu, X. and Najjaran, H. (2022). Object recognition datasets and challenges: A review. *Neurocomputing*, 495, 129–152.
- Sarker, I. H. (2021). Deep learning: A comprehensive overview on techniques, taxonomy, applications and research directions. *SN Computer Science*, 2(6), 420. DOI: 10.1007/s42979-021-00815-1.
- Sethy, P. K., Barpanda, N. K., Rath, A. K. and Behera, S. K. (2020). Deep feature based rice leaf disease identification using support vector machine. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105527. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105527.
- Sirohi, A. and Malik, A. (2021). A hybrid model for the classification of sunflower diseases using deep learning. *Proceedings of the 2021 2nd International Conference on Intelligent Engineering and Management (ICIEM)*, London, UK, 28–30 April 2021.
- Sohel, A., Shakil, M. S., Siddiquee, S. M. T., Al Marouf, A., Rokne, J. G. and Alhajj, R. (2024). Enhanced potato pest identification: A deep learning approach for identifying potato pests. *IEEE Access*, 12, 172149–172161.
- Tan, F. G., Yüksel, A. S., Aydemir, E. and Ersoy, M. (2021). Derin öğrenme teknikleri ile nesne tespiti ve takibi üzerine bir inceleme. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 25, 159–171. DOI: 10.31590/ejosat.878552.
- Türkoğlu, M. and Hanbay, D. (2019). Plant disease and pest detection using deep learning-based features. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 27(3), 1636–1651. DOI: 10.3906/elk-1809-181.
- Ünal, Y. and Dudak, M. N. (2024). Deep learning approaches for sunflower disease classification: A study of convolutional neural networks with squeeze and excitation attention blocks. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(1), 247–258. DOI: 10.17798/bitlisfen.1380995.
- Venkateswara, S. and Padmanabhan, J. (2025). Deep learning based agricultural pest monitoring and classification. *Scientific Reports*, 15, 8684. DOI: 10.1038/s41598-025-92659-5.
- Wang, S., Xu, D., Liang, H., Bai, Y., Li, X., Zhou, J., Su, C. and Wei, W. (2025). Advances in deep learning applications for plant disease and pest detection: A review. *Remote Sensing*, 17(4), 698. DOI: 10.3390/rs17040698.
- Wenxia, B., Xuefeng, H., Gensheng, H. and Dong, L. (2021). Identification of maize leaf diseases using improved convolutional neural network. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 37(6).
- Xingxing, Q., Yanxia, C., Peifan, L., Binjie, H., Bei, T., Yu, Z., Meichen, F., Lujie, X., Wude, Y., Xiaoyan, S. and Meijun, Z. (2026). Research on precise identification of wheat pests and diseases based on an enhanced VggNet16 model and transfer learning. *Smart Agricultural Technology*, 14.
- Xiong, P., Zhang, C., He, L., Zhan, X. and Han, Y. (2024). Deep learning-based rice pest detection research. *PLOS ONE*, 19(11), e0313387.
- Xu, W., Li, W., Wang, L. and Pompelli, M. F. (2023). Enhancing corn pest and disease recognition through deep learning: A comprehensive analysis. *Agronomy*, 13(9), 2242. DOI: 10.3390/agronomy13092242.
- Yılmaz, A. and Kaya, U. (2022). *Derin öğrenme* (4. bs.). Kodlab Yayın Dağıtım Yazılım.
- Zhang, A., Lipton, Z. C., Li, M. and Smola, A. J. (2023). *Dive into deep learning*. Cambridge University Press.

- Zhang, C., Hu, Z., Xu, L. and Zhao, Y. (2023). A YOLOv7 incorporating the Adan optimizer based corn pests identification method. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1174556. DOI: 10.3389/fpls.2023.1174556.
- Zhang, L. and Wu, X. (2025). The lightweight deep learning model in sunflower disease identification: A comparative study. *Applied Sciences*, 15(4), 2104. DOI: 10.3390/app15042104.
- Zhao, J., Tian, G., Qiu, C., Gu, B., Zheng, K. and Liu, Q. (2022). Weed detection in potato fields based on improved YOLOv4: Optimal speed and accuracy of weed detection in potato fields. *Electronics*, 11(22), 3709.
- Zhong, D., Wang, P., Shen, J. and Zhang, D. (2025). Detection of wheat pest and disease in complex backgrounds based on improved YOLOv8 model. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*, 16(3), 1080.

SÜS BİTKİSİ OLARAK KULLANILABİLEN TARLA BİTKİLERİ

Güzella Yılmaz Vural*

GİRİŞ

Nüfus artışı, son yıllarda dünya genelinde büyük bir sorun haline gelmiştir. Nüfus artışı, düzensiz kentleşme, kaynakların bilinçsiz kullanımı, çevre kirliliği vb. birçok sorunu beraberinde getirmektedir. İnsanların sağlıklı bir yaşam için ihtiyaç duyduğu çevre her geçen gün zarar görmektedir. Ortaya çıkan sorunlar, insanlar üzerinde fiziksel ve psikolojik olarak olumsuz etkiler yaratmaktadır. Çevresel sorunlar sadece insanların fiziksel sağlığı için ihtiyaç duyduğu ortama zarar vermez, aynı zamanda ruhsal olarak ihtiyaç duyduğu yeşil alanlara, dolayısıyla insan psikolojisine de zarar verir.

Sağlıklı bir yaşam ortamı için, kentsel alanlarda yeşil alan miktarının yeterli düzeyde olması gerekmektedir. Yeşil alanlar kentsel alanlar için temiz hava ihtiyacını karşılama, mikroklimatik ortam sağlama, rüzgâr perdesi oluşturma, gürültü azaltma, erozyon önleme, kirli havayı absorbe etme, sınırlayıcı olarak kullanılma, trafik güvenliği vb. birçok fonksiyonel özellik taşır. Bu özelliklerin yanı sıra, yeşil alanlar, betonlaşmanın artmasıyla kasvetli hale gelen kentsel alanları yumuşatma ve insanların ihtiyaç duyduğu ruhsal gereksinimleri karşılayacak alanlar oluşturma görevi üstlenmektedir.

Artan nüfusa paralel olarak artan düzensiz kentleşme sonucu kentsel alanlarda yeşil alanların miktarı azalmıştır. Kentsel alanlarda yeşil alanların miktarının azalması sonucu ortaya çıkan sorunlar bu alanların öneminin anlaşılmasına neden olmuştur. Özellikle insanların bilinç düzeyindeki artış yeşil alanlara verilen önemi önemli ölçüde artırmıştır.

* Dr. Öğr. Üyesi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, <https://orcid.org/0000-0002-9284-9698>, e-posta adresi: guzella.yilmaz@gop.edu.tr

Yeşil alanların önem kazanması, bu alanlarda kullanılan süs bitkilerinin değerini de artırmıştır. Süs bitkileri dünya genelinde her geçen gün daha büyük bir pazar haline gelmektedir. Özellikle 2. Dünya Savaşı'ndan sonra süs bitkileri uluslararası ticarete yüksek değere sahip ürün grupları arasında yer almaktadır (Ay, 2009). Süs bitkilerinin önem kazanması, süs bitkilerine duyulan ihtiyacı önemli ölçüde artırmıştır. Dünya'da birçok ülkede olduğu gibi Türkiye'de de süs bitkileri üretimi ihtiyacı karşılayacak seviyede değildir. İhtiyacın üretimden fazla olması, bu ürünlerin ithal edilmesine neden olur. Süs bitkilerini temin etmek için de yüksek maliyetler gerekmektedir. Örneğin; süs bitkileri ithalatı için 2018 ve 2019 yıllarında süs bitkileri ithalatı için ayrılan bütçe sırasıyla 60 milyon \$ ve 43 milyon \$'dır. (Anonim(a) 2020; Anonim(b), 2020).

Süs bitkileri, sahip oldukları estetik özellikler nedeniyle iç ve dış mekânların görsel kalitesini artırmak amacıyla yetiştirilen, aynı zamanda çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan önemli katkılar sağlayan bitki türleridir. Bu bitkiler, çiçek, yaprak, gövde, meyve, renk, doku, form ve koku gibi dekoratif özellikleri sayesinde peyzaj düzenlemelerinde, park ve bahçelerde, rekreasyon alanlarında, kentsel yeşil alanlarda ve iç mekân tasarımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Estetik değerlerinin yanı sıra, hava kalitesinin iyileştirilmesi, mikroklimanın düzenlenmesi, biyolojik çeşitliliğin desteklenmesi ve insan psikolojisi üzerinde olumlu etkiler yaratması gibi önemli ekosistem hizmetleri de sunmaktadır (Ulus,1993; Yılmaz Vural, 2023).

Süs bitkilerinin olumlu özelliklerinin yanında ticari değerlerinin yüksek olması, bu bitkilerin kullanımını sınırlamaktadır. Bu sorun, süs bitkisi yerine kullanılabilecek ekonomik bitkilerin kullanılabilirliğini akla getirmektedir. Ayrıca artan çevre sorunlarına karşılık sürdürülebilir peyzaj yaklaşımları, iklim değişikliğine karşı yüksek toleranslı, su tüketimi düşük ve bakımı kolay bitki türlerinin kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Tarla bitkileri bu özellikleri taşıyan alternatif bitkileri kapsar. Bu yüzden, son yıllarda tarla bitkilerinin süs bitkisi olarak kullanılması giderek yaygınlaşmıştır (Acquaah, 2017).

Tarla bitkileri arasında yer alan birçok bitki türü, süs bitkilerine kıyasla çok hızlı bir gelişim göstermektedir. Ayrıca, bu bitkilerin yüksek adaptasyon özellikleri ve mevsimsel olarak yüksek görsel etkiye sahip olmaları, süs bitkisi olarak kullanılmalarında etkili unsurlardır. Tarla bitkileri, kentsel alanlar ile kırsal alanlar arasında kalan geçiş alanlarında,

özellikle bakım isteklerinin az olması nedeniyle peyzaj amaçlı kullanılabilen ideal bitki gruplarından biridir. Bu amaç doğrultusunda bitki seçimi yapılırken, bitkilerin çevresel stres toleransı, fenolojik gelişim özellikleri, estetik görünümün kalıcılık süresi gibi diğer özellikleri de dikkate alınmalıdır.

SÜS BİTKİLERİ İLE TARLA BİTKİLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİ

Bitkiler daha çok kullanım amaçlarına göre sınıflara ayrılır. Süs bitkileri ve tarla bitkilerinin kullanım amaçları her ne kadar farklılıklar gösterse de, bazı tarla bitkileri süs bitkilerinin kullanım amaçlarını karşılayan özellikler taşır. Dolayısıyla bazı bitki türleri hem tarla bitkisi hem de süs bitkisi olarak gruplandırılabilir. Örneğin, ayçiçeği tarla bitkisi olarak yağ üretim amacıyla ön plana çıkarken, süs bitkisi olarak kesme çiçek sektöründe kullanımı yaygın bir türdür (Armitage, 2011). Benzer olarak, bazı sorgum çeşitleri ve süs darısı, tarla bitkileri arasında tahıl olma amacıyla yetiştirilirken, estetik görünümünün ön planda olmasıyla süs bitkisi olarak da yetiştirilir.

Tarla bitkileri arasında süs bitkisi olarak kullanılan türlerin her ne kadar öncelikle estetik özelliklerine bakılsa da, bu bitkilerin süs bitkisi olarak kullanımı sürdürülebilir peyzaj yaklaşımı için birçok avantaj sağlar. Bu avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Tarla bitkileri genel olarak çevresel stres koşullarına dayanıklı türlerdir.
- Bakım istekleri oldukça düşüktür.
- Su tüketimleri düşüktür.
- Süs bitkisi olarak tarla bitkilerinin kullanılıyor olması biyolojik çeşitliliği destekler niteliktedir.
- Düşük bakım isteği maliyet ve sürdürülebilirlik açısından pozitif etki gösterir.

SÜS BİTKİSİ OLARAK KULLANILABİLEN TARLA BİTKİLERİ

Bu başlık altında, süs bitkisi olarak kullanımı yaygın olan tarla bitkileri ele alınmıştır. İncelenen literatürlerde, bu bitkilerin yalnızca estetik özellikleri ile değil, aynı zamanda düşük bakım istekleri, yüksek

adaptasyon yetenekleri ve ekolojiye pozitif katkıda bulunma özellikleri ile de ön plana çıktıkları belirlenmiştir.

Ayçiçeği (*Helianthus annuus*)



Şekil 1. Ayçiçeği (*Helianthus annuus*) (Wikimedia Commons (a))

Ayçiçeği dünya genelinde en çok yağ bitkisi olma özelliğiyle ön plana çıkar. Dolayısıyla, bu bitki ilk kullanım amacı düşünüldüğünde tarla bitkileri arasında yer alır. Fakat büyük çiçek boyutu ve çiçeğin estetik görüntüsünün etkileyici olması, bu bitkinin süs bitkisi olarak değerlendirilebilmesini mümkün kılar. Ay çiçeği, süs bitkisi olarak farklı renklerde ve boyutlarda yetiştirilebilmektedir. Çiçek aranjmanlarında kesme çiçek olarak kullanılabilen bu çiçekler, park ve bahçelerde dikkat çekme özellikleri nedeniyle odak noktalarında da kullanılabilir. Yaz aylarında çiçeklerin uzun süre estetik görünümünü koruması, bitkinin peyzaj değerini artıran bir özellik olarak değerlendirilebilir. Ayçiçeklerinin bakım istekleri düşüktür, kuraklığa dayanıklı bitkiler arasında yer alır ve hava kirliliğine dayanımları yüksektir. Bu çiçekler özellikle kırsal peyzaj tasarımlarında sıklıkla boy göstermektedir (Acquaah, 2017).

Sorgum (*Sorghum bicolor*)



Şekil 2. Sorgum (*Sorghum bicolor*) (Wikimedia Commons (b))

Sorgum bitkisinin bazı çeşitleri, bronz, kırmızı ve mor yaprakları sayesinde estetik bir değere sahip olup süs bitkisi olarak kullanılır. Sürdürülebilir peyzaj yaklaşımı doğrultusunda ön plana çıkan bu bitki, yarı kurak ve kurak alanlarda düşük su isteği sayesinde rahatlıkla kullanılabilir. Bakım istekleri düşük olan bu bitki gösterişli salkım yapısına sahip olduğu için arka plan bitkisi olarak tercih edilir (Hartmann ve ark., 2018).

Süs Darısı (*Pennisetum glaucum*)



Şekil 3. Süs Darısı (*Pennisetum glaucum*) (Wikimedia Commons (c))

Süs darısı, süs bitkisi olarak kullanımı yaygın olan tarla bitkileri arasında yer alır. Dik gelişme özelliğine sahip olan bu bitkiler, gösterişli mor çiçeklere sahiptir. Vurgu bitkisi olarak kullanılabilmesinin yanı sıra, çiçek tarlalarında, bordürlerde ve saksılarda da sıkça karşımıza çıkar. Bu bitkinin süs bitkisi olarak kullanılmasındaki en önemli avantajlar, adaptasyon gücünün yüksek olması ve hızlı gelişim göstermesidir (Wisconsin Horticulture, 2024).

Mısır (*Zea mays*)



Şekil 4. Mısır (*Zea mays*) (Wikimedia Commons (d))

Mısır halk arasında tarla bitkileri içerisinde en çok bilinen bitki türlerinden biridir. Fakat mısır bitkisinin estetik görünümü bu bitkinin dekoratif olarak süs bitkisi amacıyla kullanımını sağlar. Özellikle sonbaharda renkli koçana sahip mısır çeşitleri ideal bir süs bitkisi görevi üstlenir. Mısır uzun boy, yapay ve sık dokuya sahiptir. Mekansal ayırım oluşturma ve perdeleme konusunda tercih edilebilir (Bódi ve Pepó,2006).

Aspir (*Carthamus tinctorius*)



Şekil 5. Aspir (*Carthamus tinctorius*) (Wikimedia Commons (e))

Aspir bitkisi, yağ temini için yetiştirilen bir tarla bitkisidir. Sarı ve turuncu çiçeklere sahip bu bitki estetik görünümüyle dikkat çeker. Aranjmanlarda kesme çiçek olarak ve kuru çiçek olarak kullanımı mevcuttur. Bakım isteklerinin düşük olması, bu bitkinin daha yaygın kullanımına olanak verir (Selim ve Durak, 2025).

Keten (*Linum usitatissimum*)



Şekil 6. Keten (*Linum usitatissimum*) (Wikimedia Commons (f))

Keten bitkisi tarla bitkileri arasında hem endüstri bitkisi hem de yağ bitkisi olarak anılır (Arslanoğlu ve ark., 2022). Mavi renkli çiçekleri olan ince yapılı bitki, estetik görünümüyle dikkat çekicidir. Özellikle çiçek açtığı dönemlerde geniş alanlarda etkili bir görsel güzellik sunar. Çiçek aranjmanlarında ve doğal peyzaj yaklaşımlarında kullanılabilen dekoratif bir kır çiçeğidir (Taiz ve Zeiger, 2015).

Süs Çimleri



Şekil 7. Switchgrass (*Panicum virgatum*) (Wikimedia Commons (g))

Süs çimleri, doğal görünüm, sık doku ve hareket imkânı sunan bitki türleridir. Birçok süs çim türü bulunmasına rağmen peyzaj tasarımlarında en çok kullanılan süs çim türleri Switchgrass (*Panicum virgatum*) ve *Miscanthus* türleridir. Bu bitkiler peyzaj alanlarında sadece dekoratif olarak değil, habitat oluşturma ve erozyon kontrolü görevleri de üstlenir (Colorado State University Extension, 2025).



Şekil 8. *Miscanthus* türleri (Wikimedia Commons (h))

TARLA BİTKİLERİNİN PEYZAJ MİMARLIĞINDA KULLANIM AMAÇLARI

Süs bitkisi olarak kullanılan tarla bitkileri peyzaj tasarımlarında farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Bu amaçlara; estetik görünüm sağlama, vurgu yapma, alanlar arası geçiş sağlama, biyolojik çeşitliliği destekleme ve alan tanımlama örnek verilebilir. Özellikle sürdürülebilir peyzaj yaklaşımı doğrultusunda doğal alanlar oluşturmak için süs bitkisi olarak kullanılabilen tarla bitkileri uygun bitkisel materyallerdir.

Estetik Kullanım

Peyzaj tasarımı temel bileşenlerden oluşur. Renk, form ve doku bu bileşenler arasındadır. Ayçiçeği ve süs darısı gibi tarla bitkileri, özellikle çekici renk özellikleri sayesinde peyzaj tasarımlarında güçlü bir görsel etki yaratır (Armitage, 2011).

Kesme Çiçek Olarak Kullanımları

Çiçek boyutu, çiçek rengi, doku ve form gibi özellikler, çiçeklerin kesme çiçek olarak kullanımlarında dikkate alınan unsurlardır. Ayçiçeği gibi büyük ve etkili renkli tarla bitkileri kesme çiçek olarak kullanım için oldukça uygun bitkilerdir. Ayrıca Aspir ve bazı süs çimleri de çiçekçilik sektöründe kullanılan tarla bitkileri arasında yer alır. Bu bitkilerin kesme çiçek olarak kullanımları için sap uzunluklarının yeterli oluşu bu bitkileri kesme çiçek olarak kullanılabilmeleri için ön plana çıkarır.

Kuru Çiçek ve Aranjmanlar

Çiçek sektöründe kuru çiçeklerin kullanımı, uzun süreli kullanım avantajı sayesinde son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır. Sorgum, süpürge darısı ve süs çimleri bu amaçla kullanılabilecek ideal tarla bitkileridir. Kurutulduklarında renk özelliğini koruyan ve uzun süre kullanıma dayanıklı olan bu türler, aranjmanlarda kuru çiçek olarak sıkça karşımıza çıkmaktadır.

Ekolojik Katkılar

Tarla bitkileri peyzaj tasarımlarında yalnızca estetik amaçlı kullanılmaz. Bu bitkiler, ekolojik işlevler üstlenerek peyzaj tasarımlarını daha etkili hale getirir. Çiçek açan türler arılar ve diğer tozlayıcı çeşitler için besin kaynağı olma niteliği taşır (University of Tennessee Extension, 2023). Özellikle süs çimleri gibi tarla bitkileri, peyzaj tasarımlarında erozyon önleyici bitkiler grubundadır. Ayrıca süs bitkisi olarak kullanılan tarla bitkileri kullanıldıkları alanlarda habitat oluşturma ve karbon tutma gibi özellikleri ile sürdürülebilir çevre açısından önemli katkılar sağlarlar.

Ekonomik Önemi

Süs bitkileri sınıflandırması altında yer alan bitkiler genellikle tarla bitkilerine kıyasla daha yüksek ücretli ve daha fazla bakım gerektiren türlerdir. Süs bitkisi olarak kullanılabilen tarla bitkilerinin yetiştirilmesi veya temin edilmesi, daha düşük maliyetler gerektirdiği ve bakımlarının kolay olması nedeniyle ekonomik açıdan önem arz etmektedir. Ayrıca bu bitkilerin peyzaj tasarımlarında kullanılması tarımsal çeşitliliği artırmaktadır.

Türkiye'de Kullanım Potansiyeli

Türkiye, farklı iklim tiplerinin görüldüğü bölgelerden oluştuğu için bitki yetiştiriciliği açısından oldukça avantajlı bir ülkedir. Biyolojik çeşitliliği zengin olan ülkemiz süs bitkisi olarak kullanılabilen tarla bitkilerinin yetiştirilmesi için de ideal koşullara sahiptir. Örneğin; kuraklığa dayanıklı olan aspir ve sorgum gibi türler İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde rahatlıkla yetiştirilebilir. Marmara ve Karadeniz bölgelerimizde ise süs çimleri ve ayçiçeği bitkileri yaygın olarak yetiştirilir.

Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Önerileri

Peyzaj çalışmalarında kullanılabilen tarla bitkileri üzerinde çeşit geliştirme çalışmalarının yapılmaması ve bu bitkilerin süs bitkisi olarak

kullanım potansiyelleri konusunda bilgi eksiklikleri, bu bitkilerin kullanımını sınırlayan özellikler olarak ortaya çıkmaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tarla bitkileri arasında süs bitkisi olarak kullanılma potansiyeli yüksek olan birçok bitki türü bulunmaktadır. Bu bitkiler estetik özellikleri ile ön plana çıkarken, erozyon önleme, perde oluşturma, mekân ayırma gibi fonksiyonel görevlerde de üstlenirler. Ayrıca bu bitkiler, süs bitkilerine kıyasla uygun maliyetli oldukları için ülke ekonomisi açısından bu bitkilerin süs bitkisi olarak da kullanımları önem arz etmektedir. Bu bitkilerin bakım isteklerinin düşük olması hem iş gücü hem de zaman tasarrufu sağlar. Bu türlerin peyzaj tasarımlarında daha yaygın kullanılması sürdürülebilir ve düşük maliyetli uygulamaların gelişmesine katkı sağlayacaktır. Literatür bulguları, tarla kökenli süs bitkilerinin gelecekte daha fazla önem kazanacağını göstermektedir.

Üniversiteler, araştırma kuruluşları ve özel sektör iş birliğiyle tarla bitkileri içerisinde yer alan yeni süs bitkisi potansiyeli yüksek çeşitlerin geliştirilmesi önem taşımaktadır. Bu konularda, tanıtım faaliyetleri ve uygulama projeleri de yaygınlaştırılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Acquaah, G. (2017). Horticulture: Principles and Practices (6th ed.). Pearson.
- Anonim(a). (2020). Ss Bitkileri ve Mamulleri Sektr Raporu. Turkish Flowers, <http://www.susbitkileri.org.tr/images/d/library/354b3de7-2257-4c30-b60d-998ecc546d7b.pdf>.
- Anonim(b). (2020). Ss Bitkileri Sektr Raporu. Ss Bitkileri reticileri Alt Birlięi, <http://www.susbir.org.tr/index.php/raporlar>.
- Armitage, A. M. (2011). Armitage's Garden Perennials. Timber Press.
- Arslandoęlu, Ŗ. F., Sert, S., Ŗahin, H. A., Aytaç, S., & El Sabagh, A. (2022). Yield and yield criteria of flax fiber (*Linum usitatissimum* L.) as influenced by different plant densities. Sustainability, 14(8), 4710.
- Ay, S. (2009). Ss bitkileri ihracatı, sorunları ve czm nerileri:Yalova leęinde bir arařtırma. Sleyman Demirel University Journal of Faculty of Economics & Administrative Sciences. Vol. 14 Issue 3, P423-443. 21p.
- Bdi, Z., & Pep, P. (2006). Possibilities of selection and production of blue and ornamental corn (*Zea mays* L.). Acta Agraria Debreceniensis, 23, 15–19. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/23/3200>
- Colorado State University Extension. (2025). Ornamental Grasses. <https://extension.colostate.edu/resource/ornamental-grasses/>
- Hartmann, H. T., Kester, D. E., Davies, F. T., & Geneve, R. (2018). Plant Propagation: Principles and Practices (9th ed.). Pearson.
- Selim, C., & Durak, A. (2025). Use of Paclobutrazol and Trinexepac-ethyl on Growth, Development, and Flowering Characteristics of Safflower as an Ornamental Plant. BioResources.
- Taiz, L., Zeiger, E., Mller, I. M., & Murphy, A. (2015). Plant Physiology and Development. Sinauer Associates.
- Ulus, A. (1993). Bazı i mekn ss bitkilerinin kullanım teknięi zerine bir arařtırma. Yayınlanmamıř Yksek Lisans Tezi. İstanbul niversitesi.
- University of Tennessee Extension. (2023). Ornamental Grasses in the Landscape.
- Wikimedia Commons (a). 2026. Eriřim tarihi: 17 Haziran 2026, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Helianthus_annuus_00001.jpg
- Wikimedia Commons (b). 2026. Eriřim tarihi: 17 Haziran 2026, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sorghum_bicolor_Ma%C3%A7anet_de_la_Selva.jpg

- Wikimedia Commons (c). 2026. Erişim tarihi: 17 Haziran 2026, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LPCC-986-Pan%C3%ADs_negre_\(infloresc%C3%A8ncies\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LPCC-986-Pan%C3%ADs_negre_(infloresc%C3%A8ncies).jpg)
- Wikimedia Commons (d). 2026. Erişim tarihi: 17 Haziran 2026, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Der_Zuckermals,_S%C3%BC%C3%9Fmais,_lat._Zea_mays_01.jpg
- Wikimedia Commons (e). 2026. Erişim tarihi: 17 Haziran 2026, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carthamus_tinctorius_050709b.JPG
- Wikimedia Commons (f). 2026. Erişim tarihi: 17 Haziran 2026, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Linum_usitatissimum_Flachs_%C3%96tztales_Samedan_20110824.jpg
- Wikimedia Commons (g). 2026. Erişim tarihi: 17 Haziran 2026, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Panicum_virgatum1.jpg
- Wikimedia Commons (h). 2026. Erişim tarihi: 17 Haziran 2026, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Miscanthus_sinensis_%27Gracillimus%27_kz02.jpg
- Wisconsin Horticulture. (2024). Ornamental Millet (*Pennisetum glaucum*)
- Yılmaz Vural, G. (2023). İç Mekan Hava Kalitesini Arttıran Süs Bitkileri. Peyzaj ve Kentler '2023 Çalışmaları. 401-416.

SERİN İKLİM ÇİM BİTKİLERİ

Ertuğrul Balekoğlu*, Mustafa Yılmaz**

GİRİŞ

Serin iklim çim bitkileri, optimum gelişmelerini 15-24 °C sıcaklık aralığında sürdüren ve düşük sıcaklıklara yüksek düzeyde tolerans gösterebilen çok yıllık veya tek yıllık türlerden oluşmaktadır. Bu bitkiler fotosentez mekanizması bakımından C3 grubunda yer almakta olup, ilkbahar ve sonbahar aylarında en iyi büyüme performansını göstermektedir. Yaz aylarında ise yüksek sıcaklık ve kuraklık koşulları büyümeyi sınırlandırabilmekte, kalite ve yeşil görünümde gerileme görülebilmektedir (Bell, 2011: 33; Kır vd., 2018).

Serin iklim çim bitkileri; futbol, golf ve tenis sahaları, çim kayağı ve park ve rekreasyon alanları, yol kenarları, peyzaj uygulamaları ile ev bahçeleri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Avcıoğlu, 2014: 5). Hızlı tesis olmaları, yüksek estetik kalite sunmaları ve birçok türde iyi basılma-ezilme toleransı göstermeleri bu bitkilerin öne çıkan özellikleridir. Bu sayede dünya genelinde olduğu gibi Türkiye'de de yaygın olarak kullanılırlar (Salman ve Avcıoğlu, 2010: 310).

* Öğr. Gör. Dr., Ege Üniversitesi, Bayındır Meslek Yüksekokulu, Çim Alan Tesisi ve Yönetimi Programı, Bayındır/İzmir, ertugrul.balekoglu@ege.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-6060-4709>

** Prof. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Sakarya. e-posta: mustafayilmaz@subu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5256-245X>

Çim alanlar, estetik güzelliğin yanı sıra geniş ve saçak kök sistemleriyle toprak erozyonunu ve sediment taşınımını önemli ölçüde engeller, yüzey akışını yavaşlatarak suyun toprağa süzülmesini kolaylaştırarak doğal bir filtre görevi görür ve yeraltı su kaynaklarının temizlenmesine ve beslenmesine yardımcı olur (Beard ve Green, 1994: 452).

Türkiye'nin farklı iklim bölgeleri dikkate alındığında serin iklim çim bitkileri özellikle Marmara, Karadeniz, İç Anadolu'nun yüksek kesimleri ile Doğu Anadolu'da yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıcak bölgelerinde de kullanılmakla beraber, daha çok sonbahar-kış döneminde sıcak iklim çimlerinin üzerine yapılan üstten tohumlama uygulamalarında yeşil görünümü korumak amacıyla tercih edilirler.

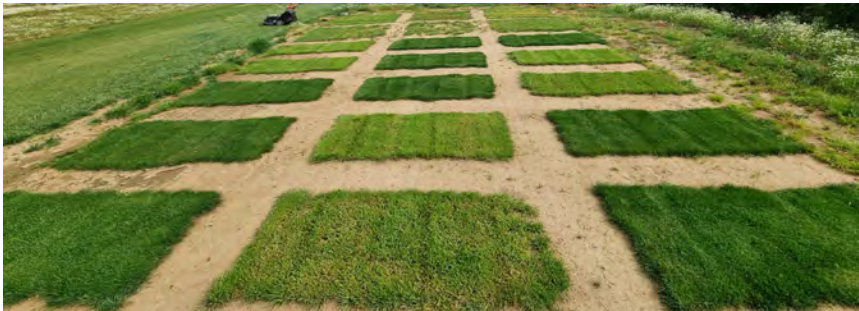
Bu bölümde, yeşil alan tesisinde en yaygın olarak kullanılan *Lolium*, *Poa*, *Festuca* ve *Agrostis* cinslerine ait türler morfolojik ve çim alan özellikleri yönünden incelenmiş; ardından bu türler arasında gözlenen sıcaklık, kuraklık ve basılma gibi stres toleransı farklılıklarına değinilmiştir.

1. *Lolium* L. Cinsi

Lolium cinsi dokuz farklı türü barındıran önemli bir çim grubudur. Çok hızlı çimlenme ve kardeşlenme yetenekleriyle bilinirler. Yumak büyüme formuna sahip olan bu çim grubu içinde çim alan yönetimi açısından üç temel tür şunlardır: Çok yıllık çim (*Lolium perenne* L.), Tek yıllık çim (*Lolium multiflorum* Lam.) ve kamyışı yumak [*Lolium arundinaceum* (Schreb.) Darbysh.].

1.1. Çok Yıllık Çim (*Lolium perenne* L.)

Lolium cinsinin yeşil alan sektöründeki en değerli iki üyesinde biridir. Tek yıllık çimden farklı olarak katlanmış vernasyona sahiptir; yaprak altının parlaklığı, belirgin damarlı üst yüzeyi ve gövde tabanındaki kırmızı-mor renk tonu ile ayırt edilir (Christians vd., 2016: 62) (Şekil 1).



Şekil 1. Farklı çeşitlere ait çok yıllık çim parselleri

Geleneksel olarak yumak tipi gelişim gösteren çok yıllık çimlerin, son yıllarda sahte rizomlar veya sahte stolonlar üreterek geleneksel çeşitlere göre çok daha hızlı yayılan ve kendini yenileyebilen çim tipi varyeteleri pazara sunulmuştur (Pornaro vd., 2018). Hatta bu stolonlu gelişim karakterine sahip çok yıllık çimler için *Lolium perenne* L. ssp. *stoloniferum* alt tür sınıflandırması önerilmiştir (Wipff ve Singh, 2015).

Hızlı tesis olma gücü ve yüksek basılma ve ezilme toleransı çok yıllık çimin en önemli avantajıdır. Nitekim yapılan araştırmalar, bu türün farklı serin iklim çimleri arasında en yüksek basılma direncine sahip olduğunu doğrulamaktadır (Glaş vd., 2024). Bu durum, yaprak hücre çeperlerindeki selüloz, lignin ve hemiselüloz (NDF) gibi lif bileşenlerinin zenginliğiyle doğrudan ilişkilidir. Bu lifli yapı hücrelere stabilite kazandırır ve yaprakların çekme-kopma direncini artırır. Böylece mekanik ezilme kuvvetleri altında yaprak ayasının yırtılması veya parçalanması engellenir. Çok yıllık çim çeşitleri arasındaki performans farklılığının oldukça düşük olması, bu türü yoğun trafiğe sahip alanlar için en istikrarlı ve güvenilir seçeneklerden biri yapmaktadır (Şekil 2) (Cereti vd., 2010: 55).



Şekil 2. Bermuda çimi üzerine üstten tohumlama ile ekilmiş çok yıllık çim

Türün azot ihtiyacı oldukça yüksektir ve düşük azot uygulamalarında bazı hastalıklara karşı hassaslaşır. Çok yıllık çim, sulama desteği olduğunda kuraklık dönemlerinde bile yüksek performans gösterir. Ancak

aşırı ve uzun süreli kuraklıkta yumaklaşma eğilimi gösterir, homojenliğini kaybeder ve ara ekimle yenilenmesi gerekir.

Kamışsı yumak ve çayır salkım otuna kıyasla daha yüksek su isteğine ve daha düşük kuraklık toleransına sahiptir. Kuraklık stresi başladığında hayatta kalma yeteneği iyi düzeyde olsa da şiddetli kuraklık sonrası toparlanma kapasitesi oldukça düşüktür (Kopp ve Jiang, 2013: 337). Su kullanım etkinliği orta seviyelerde olup, görsel kaliteyi koruyabilmek için düzenli sulamaya ihtiyaç duyar (Braun vd., 2022a). Soğuk toleransı sınırlı olduğu için soğuk bölgelerde kış zararı görebilir. Çok yıllık çim serin iklim türleri arasında gölgeye en hassas çimlerden biri olarak sınıflandırılmaktadır. Düşük ışık koşulları altında bitki, ışığa ulaşabilmek amacıyla hızla dikey yaprak uzamasına gider. Ancak bu durum, bitkinin karbonhidrat rezervlerinin hızla tükenmesine, dokuların zayıflamasına ve çim örtüsünün zamanla seyrekleşerek yerini yabancı ot ve yosunlara bırakmasına neden olur (Tegg ve Lane, 2004: 357; Balekoğlu vd., 2026). Tüm bu özellikleri doğrultusunda çok yıllık çim; ılıman ve nemli iklim bölgelerinde, tek başına veya karışım halinde kullanılan vazgeçilmez bir çim türüdür.

1.2. Tek Yıllık Çim (*Lolium multiflorum* / *italicum* Lam.)

Literatürde İtalyan çimi (*Lolium italicum*) olarak da adlandırılır. Kıvrık vernasyona sahip olması, belirgin pençe benzeri kulakçıkları, geniş yakacağı ve yaprağın alt yüzeyinin parlak olması bu türün ayırt edici morfolojik özellikleridir (Christians vd., 2016: 61). Tek yıllık çim, çok yıllık çime kıyasla daha açık yeşil renklidir ve daha hızlı büyür. Yapraklarındaki lifli yapı nedeniyle biçilmeye karşı direnç gösterir ve biçim sonrasında yaprak uçlarında saçaklanmalar oluşur (Şekil 3).



Şekil 3. Tek yıllık çim (*Lolium multiflorum* / *italicum* Lam.)’de başak

Bu türün altında, ıslah ile geliştirilmiş Westerwolds çimi (*Lolium multiflorum* var. *westerwoldicum*) adı verilen özel bir varyete de yer almaktadır. Westerwolds çimini ana türden üç şey ayırır. Çiçeklenmek için kış soğuğuna ihtiyaç duymaz. Ekildiği yıl içinde, yaklaşık 3 ayda başak çıkarır ve kesin olarak tek yıllıktır. Tek yıllık çim ise başaklanabilmesi için vernalizasyona ihtiyaç duyar ve eğer ilkbaharda ekilirse o yıl sapa kalkmaz (De Haan, 1955: 206). Taşıdıkları bu kusurlar, kaba dokusu ve kısa ömrü nedeniyle yüksek kaliteli çim alanlarda tercih edilmezler. Bunun yerine geçici erozyon kontrolü ve şev stabilizasyonu gibi işlerde, düşük bakım gerektiren alanların hızlı yeşillendirilmesinde düşük oranda karışımlara eklenerek kullanılır. Ayrıca sıcak iklim çimlerinin kışın üstten tohumlanmasında ekonomik ve hızlı bir alternatif olarak da tercih edilirler. Ayrıca yüksek kaliteli bir yem bitkisi olarak da değerlendirilmektedir.

1.3. Kamışsı Yumak [*Lolium arundinaceum* (Schreb.) Darbysh.]

Kamışsı yumağın sınıflandırılması uzun yıllar boyunca botanik dünyasında tartışmalara konu olmuştur. İlk olarak *Festuca* cinsi altında (*Festuca arundinacea* Schreb.) sınıflandırılmış olsa da, DNA dizilimleri ve moleküler analizler, bu türün (*Schedonorus* alt cinsi), diğer *Festuca* (ince yapraklı yumaklar) türlerinden ziyade *Lolium* cinsiyle çok daha yakın akrabalığa sahip olduğunu ortaya koymuştur (Cheng vd., 2016: 7). Bu güçlü evrimsel yakınlık nedeniyle araştırmacılar *Schedonorus* alt cinsini *Lolium* cinsiyle birleştirmiş ve kamışsı yumağın resmi bilimsel adını *Lolium arundinaceum* (Schreb.) Darbysh. olarak yenilemiştir (Banfi vd., 2017: 709). Ancak *Lolium* cinsinin çiçeklenme durumunun başak, *Lolium arundinaceum*’un ise salkım oluşturmaması nedeniyle bazı bilim insanları hala eski isimlendirmeyi kullanmaya devam etmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Çok yıllık çim (sol) ve kamışsı yumağa (sağ) (URL-1) ait başak yapıları

Kıvrık vernasyon, belirgin orta damarı bulunmayan ancak çok sayıda paralel damara sahip pürüzlü yaprak yüzeyi ve geniş, açık yeşil renkte parlak yakacığı ile tanımlanmaktadır. Kısa rizomlar oluşturabilse de genel olarak yumak tipi gelişim gösterir (Şekil 4). Son yıllarda, rizomlu kamışsı yumak çeşitleri (Ör: Titan RX, Titanium GLS, Rendition RX) geliştirilmiştir. Çok yıllık çim ile birlikte en büyük tohum yapısına sahip serin iklim çim bitkisi (Şekil 5).



Şekil 5. Kamışsı yumak çiminin genel görünümü (sol) ve yapraklarının yakından görünümü (sağ)

Kamışsı yumak; basılma, sıcaklık ve kuraklığa karşı gösterdiği yüksek direnç sebebiyle dünyada en çok üretilen ve kullanılan üç serin iklim çimi arasında yer alır. Sahip olduğu kaba yaprak dokusu ve yapraklarındaki yüksek kopma kuvveti sayesinde, türün basılma ve ezilme direnci son derece güçlüdür (Gılab vd., 2024: 7). Ayrıca kamışsı yumak; verimsiz, asidik, alkalın, aşırı nemli veya sıkışık topraklar ile tuzluluk gibi birçok olumsuz koşula karşı yüksek adaptasyon yeteneğine sahiptir (Christians vd., 2016: 50; Liu vd., 2023: 7).

Bunun yanı sıra, serin iklim çimleri arasında en yüksek gölge toleransına sahip türdür. Düşük ışık koşullarında çok yıllık çim veya çayır salkım otunun aksine, çim kalitesini başarılı bir şekilde sürdürebilir (Tegg ve Lane, 2004: 356-357; Gardner ve Goss, 2013: 232). Ancak kış soğuklarına karşı toleransının sınırlı olması, bu türün en belirgin olumsuz yönü olarak sayılabilir (Christians vd., 2016: 50; Türk ve Kılıç, 2017; Ntoulas vd., 2024).

Kamışsı yumak, sulanan koşullarda serin iklim çimleri arasında en yüksek evapotranspirasyona sahiptir. Ancak derin kökleri ve kuraklıktan kaçınma mekanizmaları sayesinde kısıtlı su ve kurak koşullarla da başa çıkabilir. Kuraklık altındaki performansı, onu diğer serin iklim türlerinden ayıran en belirgin özelliğidir. (Braun vd., 2022a: 1673-1674). Yapılan kuraklık denemelerinde, hiç sulama yapılmadan yaklaşık 60 gün boyunca %50'nin üzerinde yeşil görünümünü koruduğu tespit edilmiştir (Braun vd., 2022b: 1693). Kısıtlı sulama koşullarında ise kamışsı yumak, diğer serin iklim türlerine kıyasla en yüksek su tasarrufunu sağlayabilen türdür (Braun vd., 2022a: 1676-1677). Çayır salkım otunun kabul edilebilir kalitede kalabilmesi için evapotranspirasyon miktarının yüzde 85'i, ince yapraklı yumakların yüzde 75'i oranında sulamaya ihtiyaç duyarken; kamışsı yumak sadece yüzde 60'ı kadar sulama ile kalitesini koruyabilmektedir. Buna rağmen kuraklık toleransı çeşide göre değişir. Genellikle yüksek sürgün-kök oranına sahip çeşitlerin kuraklık toleransı da daha yüksektir (Karcher vd., 2008). Bu özellikleriyle sıcak Akdeniz iklimine en uygun serin iklim çim bitkisi olarak tanınmaktadır (Şekil 6) (Salman vd., 2011a; Salman vd., 2011b).



Şekil 6. Akdeniz iklim koşullarında yaz sıcaklarında çok yıllık çimde kalite kaybı (sol) ve kamışsı yumakta kalitenin korunması (sağ)

1.4. Melez Çim (*Lolium x boucheanum* Kunth)

Çok yıllık çim (*L. perenne*) ile tek yıllık çiminin (*L. multiflorum*) melezlenmesiyle elde edilen hibrit bir türdür (Humphreys vd., 2010: 216). Tek yıllık çimin çok hızlı çimlenme, yüksek sürme gücü ve hızlı alan kaplama yeteneğini; çok yıllık çimin ise sık doku oluşturma, basılma ve ezilme dayanımı ve estetik görünüm karakterleriyle birleştirir. Morfolojik özellikler çeşide göre önemli farklılıklar gösterir. Bazı çeşitler ince yapraklı yapıları ve yüksek görsel kaliteleriyle çok yıllık çime benzerken,

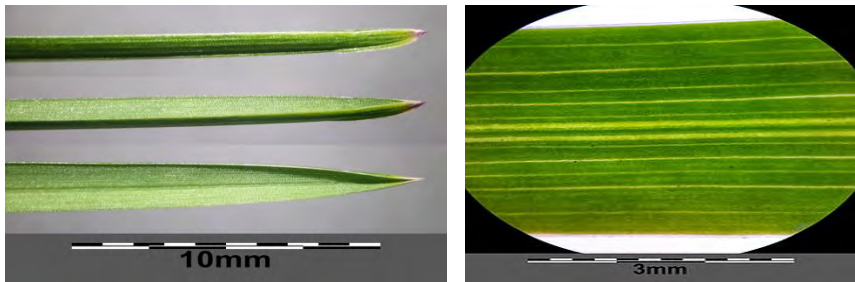
bazıları kaba dokulu olup tek yıllık çime benzemektedir. Çim alalarda, özellikle çok yıllık çim karakteri baskın olan hibrit çeşitler tercih edilir; çünkü bu çeşitler daha sık ve kaliteli çim yüzeyi oluşturur. Bu tür, özellikle golf sahaları ve spor alanlarında kullanılan sıcak iklim çimlerinin dormansi döneminde yeşil görünümünün korunması amacıyla yapılan üstten tohumlama uygulamaları için geliştirilmiştir. Üstten tohumlamada çok yıllık çim yerine melez çimlerin tercih edilmesinin temel nedeni, daha düşük sıcaklık toleransına sahip olmalarıdır. İlkbaharda sıcaklıklar yükseldiğinde, çok yıllık çime göre baskınlığını daha hızlı kaybeder ve yerini sıcak iklim çimine daha kolay bırakırlar. Melez çimlerin en önemli dezavantajı ise tek yıllık çim ebeveynlerinden miras aldıkları hızlı büyüme özelliğidir. Bu nedenle sık biçim gerektirirler. (Richardson, 2004: 171).

2. *Poa* L. Cinsi

Poa cinsi, 500'den fazla türü barındıran son derece çeşitli bir gruptur. Tek yıllık ve çok yıllık formları içeren bu grup; yumak oluşturan, rizomlu veya stolonlu büyüme formuna sahip türleri bünyesinde barındırır. Tüm salkım otları, teşhis için iki ortak morfolojik özelliğe sahiptir: kayık benzeri yaprak ucu ve katlanmış vernasyon. Bu ortak özelliklerin ötesinde, salkım otlarının boyutları ve genel görünümleri büyük farklılıklar gösterir. Mevcut 500 tür içinden yalnızca sınırlı sayıda tür çim alan tesisinde kullanılmaya uygun özellikler taşımaktadır.

2.1. Çayır Salkım Otu (*Poa pratensis* L.)

Çayır salkım otu, *Poa* cinsinin tüm üyelerinde olduğu gibi kayık biçimli yaprak ucuna ve katlanmış vernasyona sahiptir. Yakacığı oldukça kısa ve belirsizdir. Rizom oluşturur, yaprak ayasının orta damarının her iki yanında paralel uzanan yarı saydam iki çizgi ayırt edici morfolojik özelliğidir (Şekil 7).



Şekil 7. Çayır salkım otunda kayık biçimli yaprak ucu (Sol) (URL-2) ve yaprak ayasında bulunan yarı saydam çizgiler (sağ) (URL-3)

Serin iklim bölgelerinin yaygın kullanılan en önemli çim türlerinden biridir. Yoğun ve homojen bir çim örtüsü oluşturabilmesi nedeniyle futbol ve golf sahaları, parklar ve rekreasyon alanlarında yaygın olarak kullanıldığı gibi, yem bitkisi olarak da değerlendirilmektedir.

Rizomları sayesinde üstün kendini yenileme yeteneğine sahiptir ve aşınan bölgeleri kısa sürede yeniden kapatabilir (Şekil 8).



Şekil 8. Çayır salkım otunda rizomların görünümü (URL-4)

Soğuk toleransı, çok yıllık çim ve kamışsı yumağa göre daha yüksektir (Bertrand vd., 2013: 287). Uygun biçim yüksekliğinde (2.5-7.5 cm) ve doğru gübreleme programlarıyla desteklendiğinde yabancı otlarla etkili bir şekilde rekabet edebilir (DeBels vd., 2012). Ayrıca, yapraklarındaki kopmaya karşı yüksek mukavemeti ve güçlü rizomlarıyla sağladığı üstün yenilenme gücü sayesinde basılma ve ezilmeye karşı en dirençli türlerden biridir (Cereti vd., 2010: 55; Gılab vd., 2024: 7).

Çayır salkım otunun başlıca dezavantajları, kök sisteminin nispeten yüzeysel olması ve su gereksiniminin yüksek olmasıdır. Kısıtlı sulama koşulları altında kamışsı yumak gibi türler kalitelerini uzun süre koruyabilirken; çayır salkım otu strese karşı çok daha hassastır ve kısa süre içinde kalitesini kaybederek dormansiye girer (Hong vd., 2021). Su tüketimi açısından değerlendirildiğinde, diğer birçok serin iklim çiminin orta düzeyde sulamayla idare edebildiği dönemlerde bile, çayır salkım otunun yeşil görünümünü koruyabilmesi için yoğun sulamaya gereksinim duyar (Kopp ve Jiang, 2013: 322-323). Tüm bu abiyotik streslere ek olarak, türün tuzluluk toleransı da kamışsı yumak ve çok yıllık çim gibi türlere

kıyasla daha düşüktür (Zhang vd., 2013; Liu vd., 2023: 7). Ayrıca gölge toleransı da oldukça düşüktür. Yetersiz ışık koşullarında bitkinin fotosentez kapasitesi sınırlanır ve özellikle külleme gibi fungal hastalıklara karşı duyarlılığı artarak çim örtüsünde hızlı kayıplar yaşanır (Gardner ve Goss, 2013: 233).

Bununla birlikte, uzun süreli kuraklık stresini yaz dormansisi mekanizmasıyla atlatabilen türlerden biridir. Kuraklık döneminde yaprak ve kök dokularının bir kısmını kaybetmesine rağmen kök boğazı ve rizomları canlılığını korur. Sulamanın veya yağışın yeniden başlamasıyla birlikte hızla sürgün oluşturarak yeşillenir. Kuraklık sonrasında toparlanma hızı bakımından diğer serin iklim çim türlerine göre belirgin bir üstünlük gösterir (Bonos ve Murphy, 1999; Pornaro vd., 2021).

2.2. Kaba Salkım Otu (*Poa trivialis* L.)

Kaba salkım otu, *Poa* cinsinin genel karakteristiği olan kayak biçimli yaprak ucuna ve katlanmış vernasyona sahiptir. Uzun ve zarımsı yakacağı en önemli teşhis karakterlerinden biridir. Bununla birlikte, ıslah edilmiş bazı çeşitlerde yakacak daha kısa ve daha belirsiz olabilir. Stolonlu gelişim gösteren bu tür, çayır salkım otuna göre daha açık yeşil renklidir. Kuruyan yaşlı yaprak kırlarının gümüşümsü, soğan kabuğunu andıran görünümü de ayırt edici morfolojik özelliğidir (Christians vd., 2016: 44) (Şekil 9).



Şekil 9. Bir golf sahasının green bölümünde kullanılan kaba salkım otu çimi

Kaba salkım otu, serin ve nemli iklimlerde ve aşırı gölgeli alanlarda üstün performans gösterir. Çayır salkım otunun gölge nedeniyle zayıf geliştiği, ince yapraklı yumakların ise nemli topraklar nedeniyle kalıcılığını sürdüremediği ağaç altları ve su kenarları için uygun bir türdür.

Çayır salkım otuna kıyasla daha kısa biçim yüksekliklerini tolere edebilmesi nedeniyle gölge amaçlı veya zorunlu gölgelik alanlarda çim karışımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Christians vd., 2016: 44). Türün en önemli kullanım alanlarından biri, kış aylarında dormansiye giren sıcak iklim çimlerinin üstten tohumlanmasıdır. Serin kış aylarında, golf sahalarının green alanlarında uygulanan çok kısa biçim yüksekliklerinde bile yüksek çim kalitesini koruyabilmesi nedeniyle bu amaçla yaygın olarak tercih edilmektedir (Edminster, 1992: 70; Kopec ve Umeda, 2004).

Buna karşın, çayır salkım otu ve çok yıllık çime göre basılma ve aşınma toleransı düşüktür. Yüzeysel kök sistemi nedeniyle sıcak ve kurak hava koşullarına karşı son derece hassastır. Nemli dönemlerde stolonlarıyla güneş alan bölgelere doğru hızla yayılarak geniş yamalar oluşturabilir. Ancak kuraklık başladığında bu yamalar kısa sürede kahverengiye dönerek canlılığını kaybeder (Thompson, 2014: 27). Bu durum, çim alanlarda sıklıkla hastalık veya başka zararlar ile karıştırılmaktadır. Ayrıca, diğer serin iklim çim bitkilerinin içinde stolonlu yapısı ve seçici herbisit seçeneklerinin sınırlı olması nedeniyle mücadelesi zor bir yabancı ot haline gelebilmekte ve kontrolü güçleşmektedir (URL-5).

3. *Festuca L. Cinsi*

Yumaklar (*Festuca L.*) çim alanlarında ince yaprak dokularıyla tanınan serin iklim çim grubudur (Şekil 10).



Şekil 10. Bazı serin iklim çim bitkilerinin yaprak dokuları. Soldan sağa: çok yıllık çim, kamışsı yumak, narin kırmızı yumak ve Stolonlu tavusotu

Çim alan yönetiminde kullanılan ince yapraklı yumaklar botanik olarak iki ana gruba ayrılır: Birincisi rizomlu kırmızı yumak, rizomsuz kırmızı yumak ve narin kırmızı yumağı barındıran *rubra* kompleksi; ikincisi ise sert yumak ve koyun yumağını kapsayan *ovina* kompleksidir (Braun vd., 2020: 1143).

Morfolojik olarak birbirine çok benzeyen ve ayırt edilmesi zor olan bu türler, bir bütün olarak yüksek gölge toleransları ve oldukça düşük azot ihtiyaçları ile tanınırlar. Asidik ve besin maddesince fakir topraklara mükemmel uyum sağlarlar. İnce yapraklı yumakların gölgede gösterdiği bu üstün başarı; düşük ışık yoğunluğunda yapraklarını yatay formda tutarak ışık alımını maksimize edebilmelerinden ve yavaş büyümelerinden kaynaklanmaktadır (Gardner ve Goss, 2013: 225). Bu özellikleri nedeniyle, güneşli ve gölgeli bölgeleri birlikte içeren alanlarda diğer çim türleriyle karışım halinde başarıyla kullanılabilirler. Bu karışımlarda ince yapraklı yumaklar gölgeli kesimlerde gelişimini sürdürürken, diğer türler güneşli kısımlarda baskınlık gösterir (Braun vd., 2020: 1164).

İnce yapraklı yumaklar genellikle kışları soğuk ve yazları ılıman geçen nemli bölgelere adapte olmuşlardır. Yazları aşırı sıcak ve yüksek neme sahip geçiş kuşağında hayatta kalmakta zorlanırlar. Yaz aylarında diğer serin iklim çimlerine göre daha düşük evapotranspirasyona sahip olmaları su tasarrufu açısından büyük bir avantajdır. İnce yapraklı yumaklar, çok yıllık çim ve çayır salkım otu gibi türlerin büyümeyi tamamen durdurduğu şiddetli kuraklık seviyelerinde bile büyümelerini sürdürebilme yeteneğine sahiptir (Kopp ve Jiang, 2013: 325-326). Ancak, yavaş çimlenme ve tesis olmaları ile hasar sonrasında sınırlı yenilenme yetenekleri, bu grubun en önemli dezavantajlarıdır (Braun vd., 2020: 1170).

Su istekleri bakımından hassas türlerdir. Aşırı nemli ve suya doymuş topraklarda fungal hastalıklara yakalanarak hızla zayıflarlar. Özellikle yağışlı dönemlerde kırmızı iplik hastalığı yaygın olarak görülür ve *rubra* kompleksindeki türler bu hastalığa, *ovina* kompleksindeki türlere göre daha duyarlıdır. İnce yapraklı yumaklar, diğer serin iklim çim türlerine kıyasla basılma ve ezilmeye karşı oldukça hassastır (Gılab vd., 2024: 8). Özellikle yüksek yaz sıcaklıklarının bitkide yarattığı stresle birleşen trafik baskısı, bu grubun çim örtüsünde ciddi kayıplara neden olmaktadır (Cereti vd., 2010: 56). Dahası, ince yapraklı yumakların hasar gören dokuları yenileme kapasiteleri neredeyse hiç yoktur; bu nedenle ağır hasar gören alanların kendi kendine toparlanmaları beklenemez (Reiter vd., 2021: 11).

Bununla birlikte, basılma toleransı grup içinde türden türe farklılık gösterir. Sert yumak basılmaya karşı en iyi performansı sunarken; rizomsuz kırmızı yumak basılmaya karşı en zayıf tür olarak öne çıkmaktadır (Reiter vd., 2021: 8-9).

3.1. Rizomlu Kırmızı Yumak (*Festuca rubra* ssp. *rubra* Gaudin)

Rubra kompleksi içerisinde, çim örtüsünde meydana gelen seyrekleşmeleri kapatma kapasitesi en yüksek türdür. Bu sayede çim örtüsünün sürekliliğini koruyarak, basılma sonucu meydana gelen boşlukları diğer yumak türlerine kıyasla daha başarılı şekilde doldurabilir. Azot ihtiyacı düşük-orta düzeydedir buna karşın basılma ve ezilme toleransı grup içinde en düşük türlerden biridir (Braun vd., 2020: 1166). Yüksek tuz toleransı sayesinde tuzlama yapılan yol kenarları ile tuz serpintisine maruz kalan kıyı alanlarında, çok yıllık çim ve çayır salkım otuna kıyasla çim örtüsünün sürekliliğini koruma başarısı yüksektir (Engelhardt ve Hawkins, 2016: 51).

3.2. Narin Kırmızı Yumak [*Festuca rubra* ssp. *littoralis* (G.F.W. Meyer) Auquier], (*F. rubra* ssp. *trichophylla* Gaudin)

Morfolojik olarak rizomlu kırmızı yumağa büyük ölçüde benzemekle birlikte, daha kısa rizomlara sahiptir. Bu özelliği, daha yüksek sürgün yoğunluğu oluşturmamasını sağlar (Şekil 11).



Şekil 11. Narin kırmızı yumağın genel görünümü

İnce yapraklı yumaklar arasında tuz toleransı en yüksek tür olup, deniz kıyısındaki tuzlu alanlarda doğal olarak yetişmektedir (Engelhardt ve Hawkins, 2016: 57-63). Nitekim yapılan çalışmalarda, narin kırmızı yumağın ince yapraklı yumaklar arasında tuza açık ara en toleranslı tür olduğu ve tuz stresi altında kamışsı yumak gibi yüksek toleranslı türlerle benzer performans sergilediği tespit edilmiştir (Zhang vd., 2013: 71). Basılmaya ve kısa biçime gösterdiği yüksek tolerans sayesinde, Kuzey Avrupa gibi nemli iklimlerde golf sahalarının green alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.3. Rizomsuz kırmızı yumak [*Festuca rubra* L. ssp. *commutata* (Thuill.) Nyman]

Rizomları bulunmayan ve yumak tipi gelişim gösteren bir türdür. İngilizcedeki *Chewings fescue* adı, bu türün tohumlarının ilk kez Yeni Zelanda'da George Chewings tarafından ticari olarak pazarlanmasından gelmektedir. Rizom oluşturmamasına rağmen, yoğun kardeşlenme yeteneği sayesinde sık ve homojen bir çim örtüsü meydana getirir. İnce yapraklı yumaklar arasında gölge koşullarına adaptasyon kabiliyeti en yüksek türdür. Buna karşın, diğer ince yapraklı yumakların aksine tuza karşı daha hassastır. Uygun iklim koşullarında 6.4 mm gibi oldukça kısa biçim yüksekliklerine tolerans gösterebilir ve golf sahalarının green alanlarında en yüksek top hızı sağlayan türlerden biri olarak öne çıkar (Braun vd., 2020: 1169).

3.4. Sert Yumak (*Festuca brevipila* Tracey)

Botanik sınıflandırmada uzun yıllar *Festuca trachyphylla* (Hackel) Krajina adı kullanılmış olsa da günümüzde taksonomik açıdan geçerli ve öncelikli bilimsel ad *Festuca brevipila* Tracey olarak kabul edilmektedir.

Koyu gri-yeşil yaprak rengiyle diğer ince yapraklı yumaklardan kolayca ayırt edilir. İnce yapraklı yumaklar arasında yaz sıcaklıklarına ve düşük bakım koşullarına en iyi uyum sağlayan türlerden biri olarak kabul edilmektedir. Düşük azot uygulamalarında bile renk ve sürgün yoğunluğunu uzun süre koruyabilmesi nedeniyle son yıllarda sürdürülebilir çim alan karışımlarındaki kullanım oranı artmıştır (Watkins vd., 2011; Engelhardt ve Hawkins, 2016: 50). Ancak aşırı nemli koşullarda çim örtüsü seyrekleşebilir. İlk çıkış ve tesis hızı oldukça yavaş olduğundan biçim sayısı da azdır.

Akdeniz iklimine iyi adapte olan bu tür, düşük transpirasyon hızı ve gelişmiş kök sistemi sayesinde uzun süreli kuraklık koşullarına dayanabilir (Christians vd., 2016: 55). Ayrıca, ince yapraklı yumaklar arasında basılma ve ezilmeye karşı en yüksek toleransı gösteren türdür (Reiter vd., 2021: 9) ve gölge koşullarının yanı sıra tam güneş alanlarda da başarılı gelişim gösterir.

3.5. Koyun Yumağı (*Festuca ovina* L. ssp. *hirtula*)

Gri-yeşil veya mavimsi yeşil yaprak rengiyle kolayca ayırt edilen, yumak tipi gelişim gösteren bir çim türüdür. Serin iklim çimleri arasında su kullanım etkinliği en yüksek ve kuraklığa en dayanıklı ince yapraklı yumak türü olarak kabul edilir (Christians vd., 2016: 55) (Şekil 12).



Şekil 12. Koyun yumağının yumak (sol) ve başak görünümü (sağ)

Düşük gübre gereksinimi ve yavaş büyümesi nedeniyle biçilmeyen alanlarda, şevlerde ve düşük bakım gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılır. Biçilmediğinde oluşturduğu doğal dalgalı görünüm, alana estetik karakter kazandırır (Engelhardt ve Hawkins, 2016: 65). Buna karşın, basılma ve ezilmeye karşı düşük toleransı nedeniyle yoğun trafiğe maruz kalan alanlarda kullanımı önerilmez. Ayrıca, drenajı yetersiz, su tutan alanlarda yetiştirilmesinden kaçınılmalıdır (Braun vd., 2020: 1166-1168).

4. *Agrostis* L. Cinsi

Tavus otu (*Agrostis* L.) cinsi, botanik olarak yaklaşık 220 türden oluşan geniş bir serin iklim buğdaygil grubudur. Ancak diğer çim cinslerinde olduğu gibi, bu cins içerisindeki türlerin yalnızca birkaçı çim alan tesisinde kullanılmaya uygundur.

Son derece ince dokulu yaprakları ve çok kısa biçim yüksekliklerine uyum sağlamalarıyla tanınan tavus otları, yaprak anatomisi ve hücre duvarı bileşimi bakımından diğer serin iklim çim türlerinden ayrılır. Hücre duvarlarında selüloz ve asit deterjan lifi (ADF) oranı daha düşük, hemiselüloz oranı ise daha yüksektir. Bu nedenle yapraklarının kesme ve basılma direnci düşüktür (Glaab vd., 2024: 6). Yapraklarına dokunulduğunda hissedilen karakteristik yumuşak dokusu da bu özelliğinden kaynaklanmaktadır.

4.1. Stolonlu Tavus Otu (*Agrostis stolonifera* L.)

Stolonlarıyla agresif şekilde yayılan bir türdür. Kıvrık vernasyonu, sivri yaprak ucu, yaprak ayasındaki belirgin damarlar ve teşhisi kolaylaştıran büyük zarımsı yakacığı ayırt edici morfolojik özellikleridir. Buna karşın kulakçıkları bulunmaz. Ayrıca, stolonların taban kısmındaki kırmızımsı renklenme de teşhis açısından önemli bir ipucu sağlar (Cook, 2008: 4). Yüksek kardeşlenme gücü ve stolonlu yapısı, golf sahalarında pürüzsüz ve homojen bir oyun yüzeyi oluşturur (Şekil 13).



Şekil 13. Stolonlu tavus otu çiminin genel görünümü (sol), stolon yapısı (sağ)

Biçim yüksekliğini 2,5 mm'ye kadar tolere edebilmesi nedeniyle, dünya genelinde golf sahalarının green alanlarında en yaygın kullanılan serin iklim çim türüdür. Soğuğa karşı dayanıklılığı oldukça yüksektir ve serin iklim çimleri arasında donma toleransı en yüksek türlerden biri olarak kabul edilir (Cook, 2008: 6).

Buna karşın, basılma ve toprak sıkışmasına karşı toleransı birçok çim türüne göre daha düşüktür. Ayrıca türün gölge toleransı da oldukça zayıftır.

Kısa biçim yükseklikleri bitkinin fotosentez yüzeyini azalttığından, gölgeli alanlarda çim kalitesi hızla düşer (Gardner ve Goss, 2013: 233). Kısa biçim yapıldığında hastalıklara karşı direnci de azalır. Uygun şekilde yönetilmediğinde kısa sürede kalın bir keçe tabakası oluşturabilir (Li vd., 2022: 1). Sıcak dönemlerde kök sisteminin kısalması nedeniyle düzenli sulama ve yoğun bakım gerektirir. Yüksek toprak sıcaklığı ile birlikte kısa biçim yüksekliği, bitkinin su alımını önemli ölçüde sınırlar (Xu ve Huang, 2000: 1363). Türün tuz toleransı çeşitlere göre büyük değişim göstermektedir (Marcum, 2001: 376).

4.2. Narin Tavus Otu (*Agrostis capillaris* L. / *A. tenuis*)

Morfolojik açıdan stolonlu tavus otuna benzemesine karşın, nadiren stolon oluşturmaması, rizomlara sahip olması ve stolonlarının boğumlardan köklenmemesi özellikleriyle bu türden ayrılır (Christians vd., 2016: 58). Stolonlu tavus otu kadar kısa biçim yüksekliklerine tolerans gösteremediğinden, golf sahalarının green alanlarından ziyade daha yüksek biçilen fairway alanlarında kullanılmaya uygundur. Buna karşın Birleşik Krallık, İrlanda ve Yeni Zelanda gibi geleneksel golf kültürünün hakim olduğu bölgelerde, daha düşük girdi gereksinimi ve başta dolar lekesi (*Sclerotinia homoeocarpa*) olmak üzere çeşitli fungal patojenlere karşı gösterdiği yüksek direnç sebebiyle kırmızı yumaklarla karışım halinde greenlerde de kullanılmaktadır (Rotter vd., 2009: 312; Hesselsoe vd., 2022). Besin maddelerince fakir ve asidik topraklarda rekabet gücü oldukça yüksektir.

Narin tavus otunu diğer tavus otu türlerinden ayıran en sıra dışı özelliği, ağır metallerle kirlenmiş topraklara karşı gösterdiği üstün toleranstır (Onete vd., 2023: 509). Kurşun, kadmiyum, nikel ve arsenik gibi oldukça toksik metallerle kirlenmiş eski maden sahalarında doğal olarak yetişir.

4.3. Kadife Tavus Otu (*Agrostis canina* L.)

Köpek tavusotu olarak da anılmaktadır (Avcıoğlu, 2014). Tavus otları arasında en ince yaprak dokusuna ve en yüksek kardeşlenme yoğunluğuna sahip türdür. Green alanlarında kadife benzeri kusursuz bir yüzey oluşturur. Kadife tavus otu, *Agrostis* cinsi içerisinde gölge toleransı en yüksek tür olmasının yanı sıra, diğer tavus otu türleri arasında asidik toprak koşullarına en iyi uyum sağlayan türlerden biridir (Özdemir ve Budak, 2011: 2). Ancak adaptasyon bölgesi, serin ve nemli kıyı şeritleriyle sınırlıdır. Uzun süreli kuraklık koşullarında ise diğer tavus otu türlerine göre çim kalitesini daha uzun süre koruyabilir (DaCosta ve Huang, 2007:

62). Kısa gelişim formu ve oldukça yavaş büyüme hızı nedeniyle biçim gereksinimi de düşüktür (Özdemir ve Budak, 2011: 2). Tavus otu türleri kendi içinde kıyaslandığında, su kullanım etkinliği en yüksek olan tür kadife tavus otudur. Yaz aylarında kabul edilebilir çim kalitesini korumak için stolonlu ve narin tavus otlarına göre daha az sulamaya ihtiyaç duyar. Kısıtlı su koşullarında diğer tavus otlarına kıyasla belirgin şekilde daha çok su tasarrufu sağlar (Braun vd., 2022a: 1696).

4.4. Ak Tavus Otu (*Agrostis alba* L. / *A. gigantea* Roth.)

Avrupa kökenli olup Kuzey Amerika'nın serin bölgelerinde 1940'lara kadar yaygın olarak mera otu olarak kullanılmıştır. Fakir topraklarda hala kullanım alanı bulmaktadır. Genellikle yangınlara iyi tepki vererek rizomları ve tohumları hayatta kalır (Christians vd., 2016: 60).

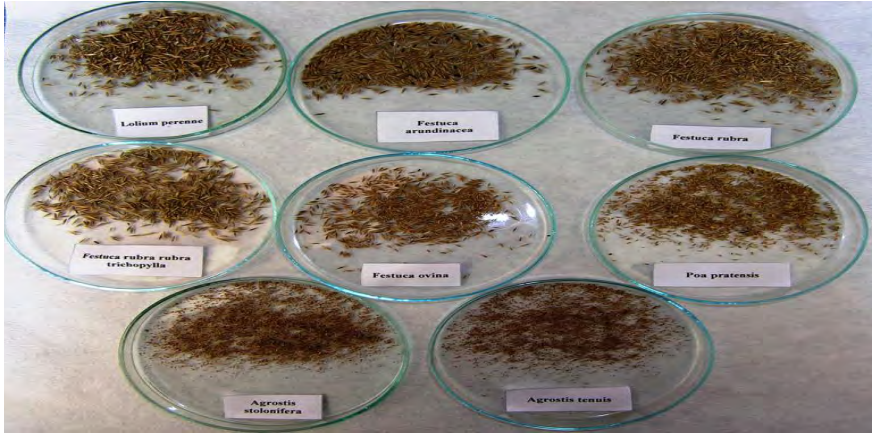
Yapraklar mat yeşil renkte, sürgün içinde kıvrılmış, tüysüz, kulakçıkları yok, dilcik küt ve dişli olup 6 mm kadar uzundur. Çiçek salkımı açık ve gevşek olup yeşil veya morumsu renktedir. Haziran'dan Ağustos'a kadar çiçek açar. Açık ormanlık alanlarda, engebeli otlaklarda, çitlerde, yol kenarlarında ve atık arazilerde bulunabilir; ayrıca ekili arazilerde yabancı ot olarak da yetişir (Avcıoğlu, 2014: 84).

Bazı serin iklim çim bitkilerine ait tohum özellikleri

Çim alanlarda kullanılan bazı serin iklim bitkilerinin tohum iriliklerine bakıldığında; en iriden en inceye doğru bir sıralama yapılacak olursa bunlar; *Lolium multiflorum*, *Lolium perenne*, *Festuca arundinacea*, *Festuca ovina*, *Festuca rubra* ssp, *Poa pratensis* ve *Agrostis* türleri olarak sıralanabilir (Şekil 14 a-b) (Avcıoğlu, 2014).



Şekil 14 a. Bazı serin iklim çim bitkilerine ait tohumlar. Soldan sağa: çok yıllık çim, kamaşlı yumak, rizomlu kırmızı yumak, sert yumak, çayır salkım otu, kaba salkım otu, narin tavus otu ve stolonlu tavus otu



Şekil 14 b. Bazı serin iklim çim bitkilerine ait tohumlar

Bazı serin iklim çim bitkilerinin stres toleransları

Bitkilerin karşılaştırmalı stres toleransları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Serin İklim Çim Türlerinin Karşılaştırmalı Stres Toleransları

Çim Türleri	Sulama İhtiyacı	Basılma /Ezilme	Gölge	Tuz	Sıcaklık	Soğuk	
Çok Yıllık Çim	Orta-Yüksek	Yüksek	Düşük	Orta	Düşük-Orta	Orta	
Tek Yıllık Çim	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	Çok Düşük	Orta	
Melez Çim	Orta-Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük-Orta	Düşük	Orta	
Kamışsı Yumak	Düşük	Orta	Orta	Orta	Yüksek	Düşük-Orta	
Çayır Salkım Otu	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük-Orta	Orta	Yüksek	
Kaba Salkım Otu	Çok Yüksek	Düşük	Çok Yüksek	Çok Düşük	Çok Düşük	Yüksek	
Rizomlu Yumak	Kırmızı	Düşük	Düşük	Yüksek	Orta	Düşük-Orta	Yüksek
Narin Yumak	Kırmızı	Düşük	Orta	Yüksek	Yüksek	Düşük-Orta	Yüksek
Rizomsuz Yumak	Kırmızı	Düşük	Çok Düşük	Çok Yüksek	Düşük-Orta	Düşük-Orta	Yüksek
Sert Yumak		Düşük	Orta-Yüksek	Yüksek	Düşük-Orta	Yüksek	Yüksek
Koyun Yumağı	Çok Düşük	Çok Düşük	Yüksek	Düşük-Orta	Yüksek	Yüksek	
Stolonlu Tavus Otu	Yüksek	Düşük	Düşük	Orta	Düşük	Çok Yüksek	
Narin Tavus Otu	Orta-Yüksek	Düşük	Orta	Çok Düşük	Düşük-Orta	Yüksek	
Kadife Tavus Otu	Orta	Düşük	Yüksek	Çok Düşük	Düşük	Yüksek	
Ak Tavus Otu	Yüksek	Düşük	Düşük	Orta	Düşük	Yüksek	

Tablo 1’de yer alan derecelendirmeler, serin iklim çim türlerinin abiyotik streslere ve bakım koşullarına karşı gösterdikleri toleransların kendi içlerindeki göreceli karşılaştırmasını ifade etmektedir. İlgili değerler, metin içerisinde detaylandırılan güncel bilimsel kaynaklardan sentezlenerek oluşturulmuştur. Ayrıca ticari çeşitler arasında ciddi farklılıklar olabilmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tablo 1’in incelenmesinden de görüldüğü üzere, incelenen serin iklim çim türleri sıcaklık toleransı bakımından birbirinden belirgin şekilde ayrılmaktadır; kamışsı yumak ve sert yumak gibi türler yüksek toleransa sahipken, tek yıllık çim ve kaba salkım otu gibi türler yaz sıcaklarına karşı oldukça hassastır. Bu farklılığın temelinde, serin iklim (C3) çim bitkilerinin ortak zayıf noktası olan fotorespirasyon mekanizması yatmaktadır. Fotosentezin merkezinde yer alan RuBisCO enzimi, karbondioksitin yanı sıra oksijeni de bağlayabilmektedir. Yaz aylarında sıcaklığın ve ışık şiddetinin artmasıyla hücre içi CO₂ derişimi düşerken O₂ derişimi görece yüksek kalır. Bu durum RuBisCO'nun oksijeni bağlama olasılığını artırarak fotorespirasyon adı verilen, bitkinin ATP ve karbonhidrat rezervlerini tükettiği verimsiz bir süreci tetikler (Sharkey, 1988: 147-148; Bell, 2011: 25-30). Türler arasındaki sıcaklık toleransı farklılıkları, büyük ölçüde fotorespirasyon sonucu karbon kaybını sınırlayan fizyolojik ve morfolojik adaptasyonlar (derin kök sistemi, düşük transpirasyon hızı, kütikula kalınlığı vb.) ile açıklanabilir.

Bu çalışmada, serin iklim çim bitkilerinin yaz aylarında yaşadığı bu fizyolojik strese karşı gösterdikleri tür bazlı farklılıklar, yeşil alan tesisinde yaygın olarak kullanılan *Lolium*, *Poa*, *Festuca* ve *Agrostis* cinslerine ait türler üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, tek bir türün tüm kullanım alanları ve iklim koşulları için ideal olmadığını, tür seçiminin alanın kullanım amacına, iklim özelliklerine ve bakım koşullarına göre yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır (Yılmaz vd., 2012).

Lolium cinsine ait çok yıllık çim, hızlı tesis olma gücü ve yüksek basılma-ezilme toleransı sayesinde yoğun trafiğe maruz kalan spor sahaları ve rekreasyon alanları için öne çıkarken; kamışsı yumak, kuraklık ve sıcaklık stresine gösterdiği üstün direnç nedeniyle su kısıtı olan bölgelerde tercih edilebilir bir alternatif sunmaktadır. Çayır salkım otu, rizomlu yapısı sayesinde kendini yenileme kapasitesi yüksek, yoğun ve homojen çim örtüsü oluşturabilen bir tür olarak dikkat çekerken, gölge toleransının

düşük olması nedeniyle güneşli alanlarla sınırlı kalmaktadır. İnce yapraklı yumaklar, düşük azot ihtiyaçları ve yüksek gölge toleransları sayesinde besin maddesince fakir topraklarda ve ağaç altı gibi gölgeli alanlarda öne çıkarken, basılmaya karşı hassasiyetleri kullanımlarını sınırlamaktadır. Tavusotu cinsine ait türler ise çok kısa biçim yüksekliklerine gösterdikleri üstün tolerans sayesinde golf sahalarının green alanları gibi özel bakım gerektiren yüzeylerde vazgeçilmez bir konuma sahiptir.

Bu bulgular ışığında, yeşil alanlarda tek tür kullanımı yerine, alanın güneş-gölge dağılımı, trafik yoğunluğu, su kaynağı, toprak koşulları ve iklimi dikkate alınarak farklı toleranslara sahip türlerin karışım halinde kullanılması önerilmektedir (Salman vd., 2019). Ayrıca, artan yaz sıcaklıkları ve kuraklık dönemlerinin sıklaşması göz önüne alındığında, kamışsı yumak ve sert yumak gibi türlerin sürdürülebilir çim alan yönetiminde daha fazla tercih edilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, doğru tür ve çeşit seçiminin, sağlıklı ve estetik açıdan yüksek kaliteli çim alanların tesisi ve sürdürülebilirliği açısından belirleyici bir faktör olduğu söylenebilir. Gelecekte yapılacak çalışmaların, özellikle Türkiye'nin farklı ekolojik bölgelerinde çeşit odaklı çalışılması, yerel koşullara en uygun tür, çeşit ve karışım kombinasyonlarının belirlenmesinde önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

Kitap

- Avcıoğlu, R. (2014). *Çim Ekimi, Dikimi ve Bakımı*. İzmir: Ege Üniversitesi.
- Bell, G. E. (2011). *Turfgrass Physiology and Ecology: Advanced Management Principles* (1. bs.). Wallingford: CABI.
- Christians, N. E., Patton, A. J. and Law, Q. D. (2016). *Fundamentals of Turfgrass Management, Fifth Edition* (5. bs.). Hoboken: Wiley.

Kitap Bölümleri

- Bertrand, A., Castonguay, Y., Azaiez, A. and Dionne, J. (2013). Low-Temperature Stress. *Turfgrass: Biology, Use, and Management* (ss. 279-318). Madison: John Wiley & Sons, Ltd.
- Gardner, D. S. and Goss, R. M. (2013). Management of Turfgrass in Shade. J. C. STIER, B. P. HORGAN ve S. A. BONOS (Editors), *Turfgrass: Biology, Use, and Management* (p. 219-247). Madison, WI: American Society of Agronomy.
- Humphreys, M., Feuerstein, U., Vandewalle, M. and Baert, J. (2010). Ryegrasses. B. BOLLER, U. K. POSSELT and F. VERONESI (Editors), *Fodder Crops and Amenity Grasses* (ss. 211-260). New York: Springer.
- Kopp, K. L. and Jiang, Y. (2013). Turfgrass Water Use and Physiology. J. C. STIER, B. P. HORGAN and S. A. BONOS (Editors), *Turfgrass: Biology, Use, and Management* (ss. 322-337). Madison, WI: American Society of Agronomy.
- Özdemir, B. S. ve Budak, H. (2011). Agrostis. C. KOLE (Editor), *Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources: Millets and Grasses* (ss. 1-13). Berlin: Springer.
- Rotter, D., Amundsen, K., Bonos, S. A., Meyer, W. A., Warnke, S. E. and Belanger, F. C. (2009). Colonial Bentgrass Genetic Linkage Mapping. T. YAMADA and G. SPANGENBERG (Editors), *Molecular Breeding of Forage and Turf* (ss. 309-322). New York: Springer.

Dergi Makalesi

- Balekoğlu, E., Salman, A. ve Yağmur, B. (2026). Sunlight, LED and HPS Lighting Modulate *Bacillus mycoides* Response to Shade Stress in Perennial Ryegrass. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 24(1), 21909.
- Banfi, E., Galasso, G., Foggi, B., Kopecký, D. and Ardenghi, N. M. G. (2017). From Schedonorus and Micropyropsis to *Lolium* (Poaceae: Loliinae): New Combinations And Typifications. *TAXON*, 66(3), 708-717.
- Beard, J. B. and Green, R. L. (1994). The Role Of Turfgrasses In Environmental Protection and Their Benefits to Humans. *Journal of Environmental Quality*, 23(3), 452-460.
- Bonos, S. A. and Murphy, J. A. (1999). Growth Responses and Performance of Kentucky Bluegrass Under Summer Stress. *Crop Science*, 39(3), 770-774.
- Braun, R. C., Bremer, D. J., Ebdon, J. S., Fry, J. D. and Patton, A. J. (2022a). Review of Cool-Season Turfgrass Water Use and Requirements: I. Evapotranspiration and Responses to Deficit Irrigation. *Crop Science*, 62(5), 1661-1684.
- Braun, R. C., Bremer, D. J., Ebdon, J. S., Fry, J. D. and Patton, A. J. (2022b). Review of Cool-Season Turfgrass Water Use and Requirements: II. Responses to Drought Stress. *Crop Science*, 62(5), 1685-1701.
- Braun, R. C., Patton, A. J., Watkins, E., Koch, P. L., Anderson, N. P., Bonos, S. A. and Brilman, L. A. (2020). Fine Fescues: A Review of the Species, Their Improvement, Production, Establishment and Management. *Crop Science*, 60(3), 1142-1187.
- Cereti, C. F., Ruggeri, R. and Rossini, F. (2010). Cool-Season Turfgrass Species and Cultivars: Response to Simulated Traffic in Central Italy. *Italian Journal of Agronomy*, 5(1), 53-59.
- Cheng, Y., Zhou, K., Humphreys, M. W., Harper, J. A., Ma, X., Zhang, X., Yan, H. and Huang, L. (2016). Phylogenetic Relationships in the *Festuca-Lolium* Complex (Loliinae; Poaceae): New Insights from Chloroplast Sequences. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 4.

- DaCosta, M. and Huang, B. (2007). Drought Survival and Recuperative Ability of Bentgrass Species Associated With Changes in Abscissic Acid and Cytokinin Production. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 132(1), 60-66.
- De Haan, H. (1955). Origin of Westerwolths Ryegrass (*Lolium multiflorum* Westerwoldicum). *Euphytica*, 4(3), 206-210.
- DeBels, B. T., Griffith, S. E., Kreuser, W. C., Melby, E. S. and Soldat, D. J. (2012). Evaluation of Mowing Height and Fertilizer Application Rate on Quality and Weed Abundance of Five Home Lawn Grasses. *Weed Technology*, 26(4), 826-831.
- Edminster, C. W. (1992). The *Poa trivialis* Challenge. *Landscape Management*, 31(2), 68-70.
- Głąb, T., Szewczyk, W. and Kopeć-Jarosz, A. (2024). Comprehensive Assessment of Turfgrass Wear Tolerance: A Study on Mechanical and Chemical Traits. *Industrial Crops and Products*, 216, 118837.
- Hesselsøe, K. J., Heltoft, P., Espevig, T. and Aamlid, T. (2022). Seed Mixtures of Red Fescue and Colonial, Creeping, or Velvet Bentgrass for Pesticide-Free Management of Nordic Golf Greens. *International Turfgrass Society Research Journal*, 14(1), 701-707.
- Hong, M., Bremer, D. J. and Keeley, S. (2021). Minimum Water Requirements of Cool-Season Turfgrasses for Survival and Recovery After Prolonged Drought. *Crop Science*, 61(5), 2963-2977.
- Karcher, D. E., Richardson, M. D., Hignight, K. and Rush, D. (2008). Drought Tolerance of Tall Fescue Populations Selected for High Root/Shoot Ratios and Summer Survival. *Crop Science*, 48(2), 771-777.
- Kır, B., Salman, A., Avcıoğlu, R. ve Özkan, Ş. S. (2018). Bazı Yeni Çim Seçeneklerinin Akdeniz İklim Koşullarında Kalite Özellikleri Üzerine Bir Araştırma. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 55(4), 389-395.
- Li, Z., Zeng, W., Cheng, B., Xu, J., Han, L. and Peng, Y. (2022). Turf Quality and Physiological Responses to Summer Stress in Four Creeping Bentgrass Cultivars in a Subtropical Zone. *Plants*, 11(5), 665.
- Liu, H., Todd, J. L. and Luo, H. (2023). Turfgrass Salinity Stress and Tolerance - A Review. *Plants*, 12(5), 925.
- Marcum, K. B. (2001). Salinity tolerance of 35 bentgrass cultivars. *HortScience*, 36(2), 374-376.
- Ntoulas, N., Papaioannou, G., Bertsouklis, K. and Nektarios, P. A. (2024). Tolerance of Tall Fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) Growing In Extensive Green Roof Systems to Saline Water Irrigation With Varying Leaching Fractions. *Land*, 13(2), 167.
- Onete, M., Chiriac, L.-S., Nicoară, R.-G., Bodescu, F. P. and Manu, M. (2023). *Agrostis capillaris* L. - A Review of the Distribution, Characteristics, Ecological and Agronomic Aspects, and Usage. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, LXVI(2), 505-513.
- Pornaro, C., Dal Maso, M. and Macolino, S. (2021). Drought Resistance and Recovery of Kentucky Bluegrass (*Poa pratensis* L.) Cultivars Under Different Nitrogen Fertilisation Rates. *Agronomy*, 11(6), 1128.
- Pornaro, C., Menegon, A. and Macolino, S. (2018). Stolon Development in Four Turf-Type Perennial Ryegrass Cultivars. *Agronomy Journal*, 110(6), 2159-2164.
- Reiter, M., Mihelich, N. T., Qiu, Y., Horgan, B. P. and Watkins, E. (2021). Assessing Fine Fescue Mixtures and Plant Growth Regulator Applications to Determine Their Effect on Traffic Tolerance and Divot Recovery. *International Turfgrass Society Research Journal*, 1-14.
- Richardson, M. D. (2004). Morphology, Turf Quality, and Heat Tolerance of Intermediate Ryegrass. *HortScience*, 39(1), 170-173.
- Salman, A. ve Avcıoğlu, R. (2010). Bazı Serin İklim Çim Bitkilerinin Farklı Gübre Dozlarındaki Yeşil Alan Performansları. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 47(3), 309-319.

- Salman, A., Avcioğlu, R., Yılmaz, M. and Demiroğlu, G. (2011a). Performances of newly introduced *Festuca arundinacea* Schreb. cultivars versus *Lolium perenne* L. in a Mediterranean Environment. *Turkish Journal of Field Crops*, 16(2), 215-219.
- Salman, A., Avcioğlu, R., Öztarhan, H., Cevheri, A. C. and Okkaoğlu, H. (2011b). Performances of Different Cool Season Turf Grasses and Some Mixtures under Mediterranean Environmental Condition. *International Journal of Agriculture & Biology*, 13(4), 529-534.
- Salman, A., Kır, B. and Avcioğlu, R. (2019). Effect of Cutting Heights on the Turf and Playing Quality Traits of Some Turf Alternatives in a Mediterranean Environment. *Turkish Journal of Field Crops*, 24(2), 261-267.
- Sharkey, T. D. (1988). Estimating the Rate of Photorespiration in Leaves. *Physiologia Plantarum*, 73(1), 147-152.
- Tegg, R. S. and Lane, P. A. (2004). A Comparison of the Performance and Growth of a Range of Turfgrass Species Under Shade. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 44(4), 353-358.
- Türk, M. ve Kılıç, G. (2017). Farklı Azot Dozlarının Kamışsı Yumak (*Festuca arundinacea* L.) Çeşitlerinin Çim Alan Performansı Üzerine Etkileri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 31-37.
- Watkins, E., Fei, S., Gardner, D., Stier, J., Bughrara, S., Li, D., Bigelow, C., Schleicher, L., Horgan, B. and Diesburg, K. (2011). Low-Input Turfgrass Species for the North Central United States. *Applied Turfgrass Science*, 8(1), 1-11.
- Xu, Q. and Huang, B. (2000). Growth and Physiological Responses of Creeping Bentgrass to Changes in Air and Soil Temperatures. *Crop Science*, 40(5), 1363-1368.
- Yılmaz, M., Avcioğlu, R., Salman, A. ve Cevheri, A. C. (2012). Ülkemiz Yeşil Alan Uygulamalarında Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Önerileri. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 5(2), 60-63.
- Zhang, Q., Zuk, A. and Rue, K. (2013). Salinity tolerance of nine fine fescue cultivars compared to other cool-season turfgrasses. *Scientia Horticulturae*, 159, 67-71.

Bildiriler

- Kopec, D. and Umeda, K. (2004). Overseeding Sports Turfs in Southern Arizona. *Turf Management Seminar*. Phoenix, AZ, USA: 2004.

Tezler

- Thompson, C. S. (2014). *Poa trivialis*: Physiological and Pathological Components of Summer Decline, and Cultural, Selective, and Non-Selective Control Methods. Doctora Thesis. Manhattan: Kansas State University.

Raporlar

- Engelhardt, K. A. M. and Hawkins, K. (2016). Identification of Low Growing, Salt Tolerant Turfgrass Species Suitable for Use Along Highway Right of Way (Rapor No: MD-16-SHA-UMCES-6-3). University of Maryland Center for Environmental Science, https://www.roads.maryland.gov/OPR_Research/MD-16-SHA-UMCES-6-3_Turfgrass_Report.pdf, (E.T.: 07.07.2026).

İnternet Kaynakları

- Cook, T. (2008). Creeping Bentgrass: *Agrostis stolonifera* L., Oregon State University Extension, <https://agsci.oregonstate.edu/sites/agscid7/files/horticulture/beaverturf/CreepingBentgrass2008Revision.pdf>, (E.T.: 08.07.2026).
- URL-1: Rose, H. (2013). “*Festuca arundinacea* flowerhead2”, <https://www.flickr.com/photos/macleaygrassman/8680818974> (E.T.: 12.09.2026)
- URL-2: Lefnaer, S. (2017). “*Poa pratensis* sl15”, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Poa_pratensis_sl15.jpg (E.T.: 12.09.2026).

- URL-3: Lefnaer, S. (2017). “Poa pratensis sl14”, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Poa_pratensis_sl14.jpg (E.T.: 12.09.2026).
- URL-4: Rasbak. (t.y.). “Veldbeemdgras Poa pratensis”, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Veldbeemdgras_Poa_pratensis.jpg (E.T.: 12.09.2026).
- URL-5: University of Maryland Extension. (2024). Roughstalk Bluegrass, <https://extension.umd.edu/resource/roughstalk-bluegrass>, (E.T.: 12.07.2026).

Patent

- Wipff, J. K. and Singh, D. (2015). *Lolium perenne* subsp. *stoloniferum*; perennial ryegrass with determinate-stolons (Patent No. US8927804B2). Barenbrug USA Inc.

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN BİTKİSEL ÜRETİM ÜZERİNE ETKİLERİ

Uğur Bilgili*, Melike Köse**

GİRİŞ

4,5 milyar yıllık dünya tarihi boyunca güneş, atmosfer ve yerkürenin etkileşim mekanizmaları değişmesi sonucu iklimde değişimler gözlemlenmiştir (Öztürk, 2009: 6). Ancak küresel iklim değişiminin açıklanması yaklaşık 200 yıllık bir geçmişe dayandırılmaktadır. 1820’lerde Jean-Baptiste Fourier, güneş ışınlarının yeryüzünden tamamen yansıyıp uzaya kaçmadığının ve atmosferde bir şeyin bu enerjiyi tuttuğunu, diğer bir ifadeyle atmosferin sera etkisinin farkına varmıştır (Demir, 2009: 11).

Bugünden itibaren atmosfere herhangi bir sera gazı emisyonu salınmasa dahi küresel sıcaklığın, gelecek on yıllar içerisinde 0.5 °C ile 1 °C arasında artmaya devam edeceği, sera gazı emisyonlarının önemli ölçüde azaltılması için önlem alınmadığı takdirde dünyanın 1.4 °C ile 5.8 °C daha ısınacağı öngörülmektedir (Stern, 2007: 662).

Sanayi öncesi dönemlere göre 5 °C daha yüksek bir sıcaklıkta dünyanın nasıl görüneceği tam olarak bilinmemektedir. En son sıcak dönem yaklaşık 3 milyon yıl önce gerçekleşmiş ve dünya bugünden 2-3 °C daha yüksek sıcaklıklar yaşamıştır (Jansen vd., 2007: 440). Yaklaşık 10.000-12.000 yıl önce sıcaklıklar bugüne göre yaklaşık 5 °C daha düşüktü ve buz tabakaları Londra’nın hemen kuzeyindeki ve New York’un hemen güneyindeki enlemlere kadar inmişti. Büyük boyutlu sıcaklık değişimleri sonucu buzlar erimiş ve deniz seviyeleri yükselerek İngiltere’nin ana kıtadan ayrılmasına sebebiyet vermiştir. Sıcaklıklarda yaşanacak 5 °C’lık bir artışla, büyük buz tabakaları ve muhtemelen Himalayaların karları ve buzulları da dahil olmak üzere dünyanın buz ve karının çoğu eriyecektir. Bu durum nihayetinde deniz seviyesinde 10 metre veya daha fazla yükselmeye yol açacak ve dünya nüfusunun yaklaşık yarısını oluşturan ülkelere hizmet

* Prof. Dr., Bursa Uludağ Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Bursa, ubilgili@uludag.edu.tr , <https://orcid.org/0000-0003-0801-7678>

** Araş. Gör., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Sakarya, melikek@subu.edu.tr , <https://orcid.org/0000-0001-5061-2441>

eden Himalayalardan gelen büyük nehirlerin akışını tamamen bozacaktır. Yağmurlu mevsimde şiddetli seller, kurak mevsimde ise kuru nehirler olacaktır. Dünya muhtemelen türlerinin yarısından fazlasını kaybedecek, fırtınalar, seller ve kuraklıklar bugünkünden çok daha şiddetli olacaktır. Sıcaklıkların sanayi öncesi dönemlere göre 5 °C üzerinde olduğu son zaman, yaklaşık 35-55 milyon yıl önce Eosen dönemi idi. Dünyanın büyük bir kısmı bataklık ormanlarla kaplıydı ve Kuzey Kutbu yakınlarında timsahlar vardı. Bu tür değişiklikler, insanlar da dahil olmak üzere farklı türlerin nerede ve nasıl yaşayabileceğini temelden değiştirecektir. İnsan yaşamı, şu anda yoğun nüfuslu birçok bölgede muhtemelen zorlaşacak veya imkânsız hale gelecek ve bu da büyük ölçekli, muhtemelen veya büyük olasılıkla devasa nüfus hareketlerini gerektirecektir. Tarih bize büyük nüfus hareketlerinin genellikle büyük çatışmalara yol açtığını göstermekte ve değişikliklerin çoğu binlerce veya milyonlarca yıl yerine 100-200 yıl içinde gerçekleşecektir (Stern, 2008: 6).

Sera gazları, atmosferdeki kızılötesi radyasyonu emen ve tekrar yayan gaz oluşumudur. Bu sera gazları; karbondioksit, kloroflorokarbon, metan, azot oksit ve su buharı gazlarından oluşmaktadır. Bu gazların büyük çoğunluğu insan faaliyetleri sonucu oluşmaktadır. Fosil yakıt kullanımı, tarım, ormansızlaşma ve diğer endüstriyel faaliyetler gibi çeşitli insan aktiviteleri sonucu sera gazlarının atmosferdeki oranı artmaktadır (Desombre, 2002: 97).

Son yıllarda adından sıkça söz ettiren küresel ısınma, hayatımıza birçok olumsuz etki bırakmaktadır. Hava sıcaklıklarının yükselmesi, yaşanan sıcak gün sayısının artması, önceden öngörülmeleyen doğal felaketlerdeki artışlar, yaz aylarında artan kuraklık, buzulların erimesi, deniz seviyelerinin gün geçtikçe yükselmesi, muson yağmurlarındaki düzensizlikler gibi etkiler küresel ısınma sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda kurgulanan gelecek senaryoları, yeterli ve zamanında önlem alınmadığı takdirde dünyada yaşayan bütün canlıları bir felaketin beklediğini göstermektedir (O'Neill ve Oppenheimer, 2002: 296).

Küresel Isınmanın Tanımı, Oluşumu

Doğal sera etkisi, dünyada yaşam olabilmesi için gerekli sıcaklığı sağlayan doğal bir süreçtir. Yeryüzüne düşen güneş ışınlarının büyük kısmı sera gazları olarak adlandırdığımız karbondioksit, ve metan başta olmak üzere atmosferde bulunan gazlar tarafından tutulmakta, bu yüzden yeryüzü ısınmaktadır (Yönten, 2007: 16). Günümüzdeki tehlike ise, sanayi

devriminden günümüze sera gazlarının atmosferdeki miktarlarının büyük artışı ile doğal sera etkisini kuvvetlendirmesidir. Son yıllarda atmosferde bulunan karbondioksit, metan, ozon ve kloroflorokarbon gibi sera gazlarının miktarlarında artış gözlemlenmiştir. Bu durum dünyanın ortalama sıcaklığında artış göstermiş ve küresel ısınmaya neden olmuştur (Yönten, 2007: 18). Sera etkisi yapan en önemli gaz %55 oranında karbondioksit olup diğer gazların sera etkisine katkısı; kloroflorokarbonlar %25, metan %15 ve azot oksit %5'tir (Bayram, 2014: 8).

İklim değişiklikleri, tüm kıtalar üzerindeki bitki ve hayvanların yaşamlarını etkilemekte, bazı türlerin de nesillerinin tehlike altına girmesine neden olabilmektedir. Aniden yaşanabilecek bir buzul çağı, sıcak iklim koşullarında yaşayan canlıları olumsuz etkileyebileceği gibi, aniden ısınan iklim koşulları ise ters etkide bulunacaktır. Değişen iklim koşulları hayvanlar, bitkiler ve insanlar üzerinde olumsuz etkiler bırakacaktır (Demir, 2009: 10).

Küresel ısınma, insan aktiviteleri sonucunda oluşan sera gazlarının yoğunluklarının artışına bağlı olarak yeryüzünde ve yeryüzüne yakın atmosfer tabakalarında sıcaklığın artışıdır (Boşgelmez, 2007: 119). Bir başka tanımla, küresel ısınma, ekonomik faaliyetler sonucu insan aracılığı ile atmosfere salınan sera gazları olan karbondioksit (CO_2), metan (CH_4), diazot monoksit (N_2O), ozon (O_3), kloroflorokarbon (CFCs) ve su buharı (H_2O)'nın doğal sera etkisini kuvvetlendirmesi sonucunda, dünyanın ortalama yüzey sıcaklığının artması ve iklim yapısında oluşan değişiklikleri ifade etmektedir. Sera gazı emisyonlarındaki artış özellikle 1800'lü yıllardan itibaren, yani sanayi devriminden günümüze kadar geçen sürede açıkça gözlenmektedir (Dellal, 2008: 103).

Küresel ısınma kavramı; dünya genelinde sıcaklığın sistematik bir biçimde yükselmesini ifade ederken, küresel iklim değişimi ise, küresel ısınmaya bağlı olarak yağış, nem, hava hareketleri, kuraklık gibi diğer iklim öğelerinin de değişmesi olarak tanımlanmaktadır (Çepel, 2003: 125).

İklim Değişikliğinin Bitkisel Üretim Üzerine Etkisi

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) Beşinci Değerlendirme Raporu'na (AR5) göre, iklim değişikliğinin dünyanın birçok yerinde ürün verimi üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu gözlemlenmektedir (Porter vd, 2014: 503). İklim ve toprak koşullarındaki değişiklikler, üretim miktarı ve kalitesindeki değişiklikler yoluyla tarımsal verimliliği etkilemektedir. İklim değişkenliği, küresel ürün verimindeki

değişimin yaklaşık üçte birinden sorumludur (Ray vd., 2015: 7). Sıcaklık artışı ürün verimini olumsuz etkilemekte ve tarımsal üretim üzerinde yağış azalmasından daha kritik bir etkiye sahiptir (Asseng vd., 2011: 1007; Lobell vd., 2011: 619). Ortalama sıcaklıklardaki aşırı artışın ürün verimini etkilemesi beklenmekte ve bu etkinin ılıman bölgelere göre tropikal bölgelerde daha yıkıcı olacağı tahmin edilmektedir (Porter vd., 2014: 504).

Sıcaklıkların bitkisel üretim üzerine etkilerini değerlendirmeyi amaçlayan istatistiksel ve süreç temelli modeller 2000’li yıllarla birlikte kullanılmaya başlanmış, model sonuçları; büyüme mevsimi süresince yüksek sıcaklıklara bağlı olarak artış gösteren su stresinin anahtar fizyolojik süreçler olarak bilinen ürünlerin olgunlaşma süresini kısalttığı ve tane tutumunda azalmaya neden olduğu belirlenmiştir (Iqbal vd., 2009: 6; Moriondo vd., 2011: 692).

Artan sıcaklığın tahıllarda göstereceği ilk etki, kısalan olgunlaşma süresi nedeniyle verim ve kalitede yaşanacak düşüş şeklinde ortaya çıkacaktır. Artan sıcaklık tahıllarda dane doldurma dönemini hızlandırmakta, bu nedenle verim ve kalite özellikleri değişmektedir. Diğer taraftan buğday kuşağında ortaya çıkacak kayma nedeniyle buğday yetiştirilebilir alanlar kutup bölgelerine doğru kaydıkcça, üretim alanlarının azalmasından kaynaklı bir kayıp ortaya çıkabilecektir. Tarıma uygun alanların azalması yanında tahıl verimi ve diğer ürünlerin verimlerinde bir azalma ortaya çıkacaktır. Artan sıcaklık ve karbondioksit seviyesine bağlı olarak bir miktar üretim artışları oluşacak olsa da ilerleyen dönemde aşırı sıcaklık ve karbon birikimi ve üretim alanlarının azalması nedeniyle asıl kayıp ortaya çıkacaktır. Bu konuda Hindistan özelinde yapılan bir modellemede olası bir küresel ısınma etkisiyle eğer sıcaklık 4°C derece artacak olursa, tahıl üretimi % 25-40, çeltik üretimi % 15-25, buğday üretimi % 30-35 oranında azalacağı varsayılmıştır (Mendelsohn, 2000). Küresel ısınma ile artan sıcaklık sonucu bitkisel üretimi tehdit eden hastalık ve zararlıların artışı yönünde yapılan tahminlerin tahıl tarımında da verim ve kalite üzerine doğrudan etki edecektir. Artan sıcaklıkla su kaynaklarının azalması, su kaynaklarının ortadan kalkması, sulı şartlarda yetişen çeltik başta olmak üzere yetişmesi sırasında suyla verimliliği orantısız artan mısır gibi diğer tahılların verimliliği azalacaktır. Olası bir küresel ısınmayla C4 bitkileri olan mısır ve çeltik gibi en çok üretilen ve dünyanın en önemli tahıllarında yaşanacak üretim kayıpları insan ve hayvan beslenmesinde ciddi açıklar oluşturacaktır. Başta buğday, arpa olmak üzere susuz şartlara adaptasyonu en iyi olan türlerin yetiştiriciliği

yaygınlaşacak, kurak şartlara adaptasyonu kolay olan çeşitlerle ön plana çıkacaktır. Diğer taraftan artan sel, taşkın, erozyon gibi ekstrem doğa olayları nedeniyle de üretim ve verim üzerindeki tehdit unsuru olarak ortaya çıkabilecektir

Türkiye’de 1994 yılından bu yana pozitif sıcaklık anomalileri bulunmuştur. Elma, kiraz ve buğdayın fenolojik dönemleri ile bitki gelişiminin fazla olduğu Şubat-Mayıs ortalama sıcaklıkları arasında negatif bir ilişki bulunmuştur. Bu durum bitkilerinin artan sıcaklıklarına tepki olarak fenolojik dönemlerini erkene kaydardıklarını göstermektedir. Elma, kiraz ve buğdayın hasat tarihleri için hesaplanan trend sırasıyla -25, -22, -40 gün/100 yıl şeklindedir. Şubat-Mayıs arası sıcaklıklarda 1.0°C’lik artışın anılan bitkilerin hasat tarihlerini sırasıyla 5, 4 ve 8 gün erkene kaydıracağı hesaplanmıştır. 21. yüzyılın sonlarına doğru bitkilerin fenolojik devrelerinde önemli değişiklikler olacağı beklenmektedir. Türkiye için gerçekleştirilen iklim indisi çalışmasında sıcaklıkla ilişkili yaz günleri, tropik geceler, sıcak günler ve geceler ile büyüme sezonu uzunluğu indislerinde artış trendleri bulunmuştur. Kısalan gelişme döneminin tahıllarda tane doluluğu, başak başına tane sayısı ve tane ağırlığı üzerine negatif etkileri olacaktır. Meyve ağaçlarının erken çiçek açması da geç don zararını artırabilecek, erken olgunlaşan ürünlerin kalitesi bozulacak ve pazar değerleri düşecektir (Türkoğlu vd., 2014: 70).

İklim değişikliği, dünya nüfusunun artmasına karşın kişi başına düşen gıda miktarını azaltarak gıda güvenliği bakımından risk oluşturmaktadır. Mevcut eğilimler devam ederse, potansiyel tarımsal üretimin küresel olarak azalması ve azalma oranının gelişmekte olan ülkelerde daha yüksek olması beklenmektedir (Türkeş, 2014: 83). Şu anda iklim değişikliğinin etkilerine karşı savunmasız olan ve gıda güvenliği sorunuyla karşı karşıya kalan birçok gelişmekte olan ülke, iklim değişikliğinin neden olduğu aşırı iklim olaylarıyla yoğun bir şekilde mücadele etmektedir. Tarımsal kırılganlık düzeyi, sosyo-ekonomik yetkinliğe ve çiftçilerin tarımda teknolojik uygulamaları kullanma yeteneğine bağlı olarak bölgesel olarak değişebilir (Brown ve Funk, 2008: 581).

Tarım doğaya bağlı olarak sürdürülen bir faaliyettir, teknoloji ne kadar gelişse de bu özelliğini kaybetmesi mümkün değildir. Tarımın ekonomik bir faaliyet olması nedeniyle, iklim değişikliği ile ortaya çıkacak üretimdeki değişimler, hem ülke hem de uluslararası ticaret açısından önemlidir. Tarım iklim değişikliğinden etkilendiği kadar, iklim

değişikliğine de neden olan bir faaliyet alanıdır. Toprak işleme, gübreleme, ilaçlama ve ürün-gıda arz zincirindeki işlemler, tarım arazilerinin kullanım değişikliği, enerji tüketimi, yetiştirilen hayvanların gübreleri gibi faaliyetler karbon emisyonuna katkıda bulunmaktadır (Bayraç ve Doğan, 2016: 25).

Yeryüzündeki doğal çayır-mera alanları karbon emisyonunun absorbe edilmesi için önemli alanlardır. Ancak günümüzde doğal çayır-mera alanlarının bozulması ve bu alanların tarım arazilerine dönüşmesi büyük miktarlarda karbonun atmosfere salınmasına sebep olmaktadır. Çayır-mera alanlarının tarım arazilerine dönüştürülmesinin engellenmesi, yanlış mera yönetimine karşı koruyucu politikaların uygulanması ve bazı yönetsel tedbirlerin hayata geçirilmesi durumunda bu alanların karbon yakalama ve tutma kapasitelerini artırabilecektir.

Türkiye pamuk tarımı için oldukça elverişli konumdadır. Ancak pamuk tarımında olmazsa olmaz unsur sulamadır. Su kıtlığı ve kuraklık verim üzerinde olumsuz etkiye neden olmaktadır. İklim değişiklikleri nedeniyle daha sık görülmeye başlanan kuraklık pamuk tarımı üzerinde olumsuz etkiye neden olmaktadır.

Çok yıllık bitkiler, ani sıcaklık değişikliklerine karşı tek yıllık bitkiler ile kıyaslandığında daha hassastır. Meyve yetiştiriciliği, çok yıllık bir tarımsal faaliyet olduğu için küresel iklim değişikliklerinden daha fazla etkilenir. Son yıllarda, meyve ağaçlarının dinlenme, çiçeklenme, tomurcuk oluşumu ve meyve döneminde meydana gelen ekstrem hava koşulları daha sık olarak yaşanmaktadır. Bu durum, meyve üretimi ve kalitesinin doğrudan etkilenmesinin yanı sıra, arılar gibi tozlanmada görev alan canlılar üzerinde de olumsuz etkilere neden olmaktadır. Meyve yetiştiriciliğinde dengeli çiçeklenme, meyve olgunlaşması, yüksek verim ve kaliteli ürün elde etmek için kış dinlenme döneminde türlere göre farklı sürelerde olan soğuklama ihtiyacının karşılanması gerekir (Şahin vd., 2015: 148).

Küresel ısınmanın gelecekte meyve yetiştiriciliği üzerindeki etkileri giderek daha belirgin hale gelmektedir. Artan sıcaklıklar, değişen yağış düzenleri ve aşırı hava olayları, meyve üretimini hem doğrudan hem de dolaylı olarak etkilemektedir. Bu etkiler, yetiştirilen meyve türüne, coğrafi konuma ve iklim değişikliklerinin şiddetine bağlı olarak değişir. Artan sıcaklıklar, meyve ağaçlarının soğuklama gereksinimlerini karşılamayı zorlaştırarak verim düşüşlerine yol açabilir. Ayrıca, aşırı sıcaklıklar ve

düzensiz yağışlar meyve kalitesini ve hasadı doğrudan etkileyebilir. Yağış düzenlerindeki değişiklikler ve aşırı hava olayları, meyve bahçelerinde su stresi ve toprak erozyonuna yol açarak ürün kaybına neden olabilir. Kuraklık, sel ve fırtına gibi aşırı hava olayları meyve yetiştiriciliğini daha da zorlaştırabilir. İklim değişikliğine bağlı olarak artan zararlı ve hastalık baskısı, meyve türlerinin ve çeşitlerinin sağlığını tehdit edebilir. Bu durum, çiftçilerin daha fazla böcek ilacı ve mantar ilacı kullanmasını gerektirebilir; bu da maliyetleri artırabilir ve çevresel etkilere yol açabilir. Yüksek sıcaklıklar, meyvelerin normalden daha erken olgunlaşmasına neden olabilir; bu da hasat zamanlamasını ve meyvenin kalitesini etkiler. Yüksek sıcaklıkların neden olduğu hızlı olgunlaşma, erken olgunlaşan çeşitler için faydalı olabilir. Çünkü bu çeşitler pazara daha erken gelir ve bu nedenle daha yüksek fiyatlarla satılabilir. Bazı durumlarda ise meyve tam olarak olgunlaşmayabilir, bu da meyvenin tadını ve dokusunu etkileyebilir. Küresel ısınma, dünya çapında ekosistemleri, su kaynaklarını ve tarımsal faaliyetleri önemli ölçüde etkileyen bir olgudur. Tarım arazilerinin kaybı en önemli etkilerden biridir. Yükselen deniz seviyeleri, kuraklık, aşırı hava olayları ve artan tuzluluk gibi faktörler, tarım arazilerinin verimliliğini ve kullanılabilirliğini ciddi şekilde tehdit etmektedir. Bu kayıplar sadece gıda güvenliğini tehlikeye atmakla kalmaz, aynı zamanda özellikle geçimini meyve üretimine dayandıran topluluklar için derin ekonomik sonuçlar doğurur (İkinci, 2025: 271).

Türkiye ekonomisinin önemli tarım ürünlerinden biri olan fındık yaygın olarak Ordu, Giresun, Sakarya, Trabzon, Samsun ve Düzce'de yetiştirilir (Coşkun ve Sözen, 2017: 17). Türkiye'de her yıl ortalama 700 bin hektar alanda 600 bin ton fındık üretimi yapılmaktadır ve Türkiye dünya fındık ihracatının %75'ini gerçekleştirmektedir (Atsan ve Karapınar, 2019: 430). Yıllık ortalama sıcaklığın 13-16°C olduğu yerler fındık yetiştiriciliği için uygun olup, en düşük sıcaklık -10°C'yi, en yüksek sıcaklık ise 36-37°C'yi geçmemesi gerekmektedir (Zengin ve Özbahçe, 2014: 103). İyi bir fındık yetiştiriciliği ve üretimi için yıllık toplam yağış miktarı 800 mm civarında olmalı ve yağışın mevsimlere dağılımı dengeli olmalıdır (Fideghelli ve Salvador, 2009: 40).

Türkiye fındık üretiminde ve ihracatında dünya lideri konumundadır ve dünya fındık üretiminin % 70'ini tek başına sağlamaktadır (DGC, 2017). Ancak iklim değişikliğinin fındık üretimine olabilecek etkileri, rekolte değişikliklerine duyarlı olan küresel fındık pazarını ciddi bir şekilde etkileyebilecektir. An vd., (2020: 1098), iklim değişikliğinin Türkiye

findık verimi üzerine etkilerini elde ettikleri iklim değişkenlerini ve findığın fenolojik dönemlerini dikkate alan bir istatistiksel model kullanarak RCP8.5 kötümser senaryoya göre çözümlemişlerdir. Bu senaryoya göre 21. yüzyılın ortalarına kadar Türkiye’de findık rekoltesinin bugünkü üretim alanlarının yaklaşık yarısında % 13’e ulaşan bir oranda azalacağını ve findık kalitesinin bozulacağını öngörerek, azalmanın çoğunun Doğu Karadeniz Bölümü’nde gerçekleşeceğini ortaya koymuştur. Bu veriler ışığında, iklim değişikliğinin findık üretiminin yoğun olduğu Doğu Karadeniz’de önemli ekonomik sorunlar oluşturabileceğini göstermektedir.

İklim Değişikliğinin Fitopatojenler Üzerine Etkisi

Bitki hastalıkları ile bölgesel iklim ve flora arasında dinamik bir ilişkisi söz konusudur. Bu nedenle fitopatojenlerin çoğalıp yayılabilmesi için çevre, konukçu ve patojenin uygun şartlarda bir arada bulunması gerekmektedir. İklim değişikliği ile birlikte hava sıcaklıklarındaki, mevsim ekstremlerindeki değişiklikler patojenin yayılmasını etkileyecek yeni patojenlerin farklı lokasyonlara dağılmasına neden olacak ve birçok fitopatojenin epidemiyolojisi üzerinde değişimlere yol açacaktır (Chakraborty ve Newton, 2011: 2; Garret vd., 2011: 16)

İklim Değişikliğinin Yabancı Otlar Üzerine Etkisi

Kültür bitkisi yetiştiriciliğinde yabancı otların verim üzerine %40’lık bir olumsuz etkisinin olduğu bildirilmiştir (Işık ve Akça, 2018: 83). Fakat son yıllarda iklim değişikliğinin etkisinin artırmasıyla birlikte yabancı ot mücadelesinde bir takım olumsuzluklar söz konusu olmaktadır. Yetiştiriciliği yapılan kültür bitkisini birçok abiyotik ve biyotik faktörler etkilemektedir. Bunlara ışık, nem, sıcaklık, besin örnek olarak verilebilir. Ancak kültür bitkisine arız olan yabancı otlar, kaliteli ürün alınması için gerekli olan bazı faktörlere ortak olarak ürün kalite ve kantititesinde düşüslere yol açmakta hatta ürün alınamayacak boyutlara getirmektedir. Bu bağlamda yabancı ot ve kültür bitkisi arasında kaçınılmaz bir rekabet bulunmakta ve iklim değişikliğinin de bu rekabeti olumlu ya da olumsuz etkilemesi söz konusu olmaktadır (Radicetti ve Mancinelli, 2021: 1).

Yabancı otlar iklim değişikliğine karşı; gelişimlerini devam ettirebilmek adına farklı alanlara göç, fenotipik çeşitliliklerinden yararlanarak değişen iklime ve çevreye uyum ve değişen koşullara kalıtsal olarak uyum sağlamak şeklinde dayanıklılık geliştirebileceklerdir. Bunun sonucunda yabancı otların iklim değişikliğine uyumu daha fazla

olacağından kültür bitkileri üzerinde oluşturacağı olumsuz etki artacaktır. Düzensiz yağışlar, yağışların sürekliliği ya da yağışsız geçen gün sayısının fazla olmasına bağlı olarak yabancı otlara uygulanacak olan herbisitler ya toprakta nem yetersizliğinden dolayı çok çabuk bozunacak ya da yüksek nem ve sıcaklık koşulları nedeniyle herbisit kalıcılığında kısalmalar meydana gelebilecektir. Ayrıca toprak nemine bağlı olarak mikroorganizmaların canlılığında azalma meydana gelecek ve bu da herbisitlerin topraktaki kalıntı sürelerinde uzamalara yol açacaktır (Baile, 2004: 158; Pautasso vd., 2010: 731; Vilà vd., 2021: 2).

İklim Değişikliğinin Ekonomi Üzerine Etkisi

Küresel ısınma ve iklim değişikliklerinin, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin ekonomileri üzerinde önemli etkileri söz konusudur ve gerekli emisyon azaltma ve uyum önlemleri alınmadığı takdirde, söz konusu ekonomik etkilerin büyük boyutlara ulaşması kaçınılmaz olarak görülmektedir. Günümüzde yapılan hesaplamalara göre, küresel ısınmada sadece 10°C'lık bir artışın ekonomik maliyetinin 2050 yılında yıllık 2 trilyon dolar olacağı tahmin edilmektedir. AB'de yürütülen bir çalışmaya göre, küresel ısınmanın kümülatif global ekonomik maliyetinin 74 trilyon euro olabileceği ifade edilmektedir. Küresel ısınmanın 2050 yılından sonra dünyanın GSMH'sının % 5 ile % 20'si arasında değişen global maliyetinden kaçınmak için 2050 yılına kadar sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ilişkin yöntemlere global bir yatırım yapılması gerektiği ifade edilmektedir (Bayraç ve Doğan, 2016: 29).

SONUÇ VE ÖNERİLER

İklim Değişikliği 2000'li yılların başından itibaren etkisini artırmakta, beklenen etkiler daha erken ve şiddetli gerçekleşmektedir. Tarım sektörü iklim değişikliğinden en fazla etkilenen sektördür. Türkiye yarı kurak bir bölgede bulunması nedeniyle iklim değişikliğinden en fazla etkilenecek ülkeler arasında yer almaktadır. Sıcaklık artışları, yağış rejiminin değişmesi, iklime bağlı afetlerin daha sık ve şiddetli yaşanması tarım sektöründe önemli etkiler yaratmaktadır. Yapılan çalışmalar, iklim değişikliğinin Türkiye'de tarım üzerinde etkisinin; ürünlerin verimlerinin azalması, üretimin azalması, ürün deseninin değişmesi, fiyatların artması, ithalatın artması, ihracatın azalması ve toplam refahın azalması şeklinde gerçekleşeceğini tahmin etmektedir. İklim değişikliği ile ortaya çıkacak bu olumsuz etkileri azaltmak için, iklim değişikliğine uyum sağlamak için önlemlerin alınması gerekmektedir. Bunun yanında tarım kaynaklı sera

gazı emisyonlarını azaltılması için mücadele çalışmalarının etkin yapılması ve uygulanan ve uygulanacak olan politika araçlarının iklim değişikliğini de gözetenek alınması önemlidir. Bu çalışmaların yanında tarımla ilgili tüm kesimlerin (çiftçiler, teknik personel, karar alıcılar vb) iklim değişikliği konusunda bilinçlendirilmesi için yayım çalışmaları yapılması, etki, uyum ve mücadele faaliyetlerinden beklenenlerin gerçekleşmesi için kilit rol oynamaktadır (Dellal vd., 2020).

İklim değişikliği sonucunda tarım sektöründe verim ve ürün kalitesinde düşüş, ürün desenlerinde ve tarımsal faaliyetlerin tarihlerinde değişiklik yaşanacağı öngörülmektedir (Mete, 2022). İklim değişikliğinin tarımsal faaliyetler üzerindeki olumsuz etkilerin azaltılması ve önlenmesi için uyum çalışmalarının hızlandırılması gerekmektedir. Bu amaçla öncelikli olarak yapılması gereken bazı faaliyetler şunlardır; tarımla ilgili veri tabanlarının güncellenmesi, toprak envanteri ve haritalarının güncellenmesi, iklim değişikliğinin etkilerinin havza, bölgesel ve ulusal bazda tespit edilmesi, bitkisel ve hayvansal üretimde kalitenin korunması ve iyileştirilmesi için çalışmalar yapılması, iklim değişikliğine uyum sağlayabilecek çeşit ve anaçların ıslah edilmesi, tasarruflu su kullanımı sağlayan sulama sistemlerinin yaygınlaştırılması, erozyon ve çölleşme konularında farkındalığın artırılması, çevreye duyarlı tarım tekniklerine verilen desteklerin artırılması ve çiftçilerin çevre bilincinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapılması (Dellal, 2012). Ayrıca iklim değişikliğinin çok yıllık bitkilerin coğrafi dağılımını nasıl değiştirebileceğini anlamak, gelecekteki plantasyon seçimlerinin uygulanabilirliği hakkında önemli bilgiler sağlayarak uzun vadede arazi kullanımı, su yönetimi planlaması, verim ve agroekonomi açısından tutarlı ve güçlü öngörülerde bulunmaya olanak tanıyacaktır (Parker ve Abatzoglou, 2018: 212).

Sera gazı emisyonlarının azaltılarak iklim değişikliğinin etkilerini gidermek, her biri karbon yakalama ve depolama yeteneği bulunan ormanların, sulak alanların, deniz ve kıyı ekosistemlerinin, çayırın, tarımsal alanların ve tur balıkların mevcut durumlarının korunması ve iyileştirilmesi ile mümkün olabilmektedir (Dudley vd., 2010: 126).

İklim değişikliği, günümüzde dünyanın karşı karşıya olduğu en önemli küresel ölçekli sorunların basında gelmektedir. Tarım başta olmak üzere, birçok sektörü tehdit eden iklim değişikliği, son yıllarda tüm dünyada yaşanan kuraklık ve çeşitli afetlerle gıda güvenliği konusunu gündeme taşımıştır.

Cumhuriyetin ilk yıllarında GSMH içerisinde % 43 paya sahip olan tarım sektörü, zamanla bu büyük payını sanayi ve hizmetler sektörlerine devretmiş olsa da, günümüzde tarımın ekonomimiz içerisindeki % 10'lar civarındaki payı, gelişmiş ülkelere kıyasla hala çok yüksektir. Aynı zamanda, ekonomi içerisindeki payının gerilemesine karşın, artan nüfusun gıda ihtiyacının giderilmesi gibi önemli bir rol üstlenen tarım sektörünün stratejik önemi değişmeyecektir. Özellikle son yıllarda Dünya'nın birçok bölgesinde yaşanan kuraklık ve afetlerin gıda fiyatlarındaki artışı tetiklemesi ile gündeme gelen gıda güvenliği sorunu, tarım sektörünün diğer sektörle kıyaslanamayacak bir öneminin ve gücünün olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle tarımda kendine yeterlilik ülkeler için büyük önem arz etmektedir.

İklim değişikliği sürecinde, tarımsal üretimdeki düşüşlerin ekonomiye birçok olası etkilerinin olacağı açıktır. Bu etkilerin en önemlisi olarak fiyat artışları gösterilebilir. Tarımsal üretimdeki düşüşlere bağlı olarak ürün fiyatlarındaki artışlar, dış ticareti etkilemektedir. Ürün fiyatlarındaki artışlar, milli gelirden en düşük payı alan ilk % 20'lik grubun bütçesi içerisinde gıda harcamalarının payını artıracaktır. Ülkemizde en düşük % 20'lik gelire sahip grupların, gelirlerinden gıda harcamasına ayırdıkları pay 2026 yılı verilerine göre % 29,2'dir. Fiyatlardaki artışlara paralel olarak, gelir içerisinde gıdaya ayrılan payın artması, diğer harcamaların payını düşürerek gelir dağılımındaki orantısızlığı daha da belirginleştirecektir. Bunun yanında, açlık sınırında yaşayan insanların gıdaya erişimini güçleştirecek bu durum, toplumsal sorunlara yol açacaktır. TÜİK'in açıkladığı güncel verilere göre tarım sektörünün istihdamdaki payı %13,8'e kadar gerilemiştir. Tarımın ekonomik büyüklük (GSYİH) içindeki payı %6 seviyelerinde kalsa da, sektör halen 4,5 milyondan fazla kişiye iş imkanı sunarak toplumsal ve bölgesel dengeyi korumaktadır (TÜİK, 2026).

İklim değişikliğiyle kuraklığın şiddetini artırması, birçok küçük üreticinin üretimini durdurması anlamına gelmektedir. Ülkemizde yaşamını tarımdan sürdüren birçok üreticinin, gelir elde edememesi ve kuraklığa karşı alınabilecek teknolojik önlemlerin maliyetlerini karşılayamaması, toprağından kopmasına ve göçün hız kazanmasına sebep olacaktır. İklim değişikliği sürecinde maliyeti artacak olan suyun, daha etkin kullanımı amacıyla geliştirilen teknolojilerin ve kurak koşullara dayanıklı tohumların geliştirilmesi amacıyla gen teknolojilerine yapılacak yatırımların, ekonomiler üzerinde ek maliyetler yaratacağı açıktır. Yine de iklim değişikliğinden etkilenecek coğrafyanın büyüklüğü ve üretim

kayıplarının maliyeti düşünöldüğünde teknolojik yatırımların gerekliliğı tartışılmazdır. Aynı zamanda, yapılan çalışmalar sıcaklıklardaki artışlar nedeniyle yabancı ot ve bitki zararlılarının da artış göstereceğini ortaya koymaktadır. Bu durum, tarım zararlılarıyla mücadele amacıyla daha fazla tarım ilacı kullanılmasına, bu nedenle de üretim maliyetlerinin artmasına neden olacaktır.

İklim değışikliği ile ürün miktarındaki ve kalitesindeki düşüşlere karşılık ürün fiyatlarındaki artışlar, bu ürünlerin girdi olarak kullanıldığı gıda sektörlerinde de maliyetlerin artmasına ve işlenmiş tarım ürünleri fiyatlarında da artışlara yol açabilecektir. İklim değışikliğinin tarımsal üretim üzerinde, kuraklığın yanında ekstrem hava olaylarının görölme sıklığındaki artışlar (seller, taşkınlar gibi) nedeniyle de olumsuz sonuçları olacağı tahmin edilmektedir. Bu koşullar içerisinde, Türkiye'nin bulunduğu coğrafyanın verdiği dezavantajlara rağmen, iklim değışikliğine uyum gösterebilmek amacıyla acil önlemler alınması gerekmektedir. Bu önlemlerin en önemlisi, ülkenin gelişmesini engellemeyecek ölçüde, gerekli enerji kullanım seviyesinin altına düşmeden, karbondioksit salınım seviyesini düşürme konusunda çalışmalar yapılmasıdır. Aynı zamanda, tarımda vahşi sulama yöntemlerinin terk edilerek, bitkinin ihtiyacı olan su miktarının bitkiye verilmesini sağlayan yeni teknolojilerin hızla devreye konulması gerekmektedir. İklim değışikliği sürecinde üreticinin desteklenmesi ve iklim koşullarına dayanıklı bitki türlerinin geliştirilerek üreticinin kullanımına sunulması, üretimin iklimdeki değışikliklere hızla uyum sağlaması açısından büyük önem taşımaktadır. Dünya piyasalarında son yıllarda ürün arzında yaşanan daralma ve ürün fiyatlarındaki artışlar nedeniyle, ihracatçı ülkelerin önlem olarak bitkisel ürün ihracına çeşitli kotalar uygulaması, insanlar ve hayvanlar için temel tüketim maddesi olan buğday, arpa ve mısır bitkilerinin fiyatlarının 2000 yılı seviyelerinin iki katına yükselmesine yol açmıştır. Aynı zamanda, talep miktarındaki artışa karşılık, arzadaki daralma ülkelerin satın alma gücüne sahip olsalar dahi tarımsal ürüne ulaşamama riskinin olduğunu göstermiştir. Bu durum tarımın sadece ekonomik bir sektör değil, aynı zamanda insanlar için hayati önem taşıyan bir sektör olduğunu ortaya koymuştur. Türkiye sürekli artan nüfusunun gıda ihtiyacı, toplumsal gelir adaletinin sağlanması, istihdamın genişletilmesi, tarıma bağlı endüstrilerin girdi maliyetlerinin kontrol edilebilmesi, gıda güvenliğinin sağlanması gibi pek çok nedenden dolayı tarımda kendine yeten bir ülke olma çabasını sürdürmeli ve korumalıdır (Kaya, 2009: 151).

KAYNAKÇA

- An, N., Turp, M.T., Türkes, M. ve Kurnaz, M.L. (2020). Climate change effects on agricultural production: A Short Review. *Curr. Inves. Agri. Curr. Res.* 8(3):1097-1099.
- Asseng, S, Foster, I.A.N. and Turner, N.C. (2011). The impact of temperature variability on wheat yields. *Global Change Biology* 17(2): 997-1012.
- Atsan, T., ve Karapınar, A. (2019). Türkiye fındık ihracatını etkileyen faktörler: Çekim modeli uygulaması. *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 7(89), 430-444.
- Bailey, S.W. (2004). Climate change and decreasing herbicide persistence. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science*, 60(2), 158-162.
- Bayraç, H.N. ve Doğan, E. (2016). Türkiye’de İklim Değişikliğinin Tarım Sektörü Üzerine Etkileri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, Nisan, 11(1), 23- 48.
- Bayram, C. (2014). Lise Öğrencilerinin Küresel Isınma Konusundaki Görüş ve Tutumları. T.C. Necmettin Erbakan Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Ortaöğretim Fen ve Matematik Alanları Eğitimi Anabilim Dalı, Biyoloji Eğitimi Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi. ss 95.
- Boşgelmez, A.; Boşgelmez, İ.; Savaşçı, S.; Paslı, N. ve Kaynaş, S. (2007). *Ekoloji*, ISVAK, Ankara. 312 s.
- Brown, M.E. and Funk, C.C. (2008). Food security under climate change. *Science* 319(5863): 580-581.
- Chakraborty, S. and Newton A.C. (2011) Climate change, plant diseases and food security; an overview. *Plant Pathology*, 60, 2-14.
- Coşkun, M., and Sözen, E. (2017). The Evaluation of the Agriculture of Hazelnut in Düzce According to Climate Parameters. *International Journal*, 4(1), 16-27.
- Çepel, N. (2003), Ekolojik Sorunlar ve Çözümleri, Tübitak Popüler Bil. Kitap., Ankara. 183 s.
- Demir, A. (2009). Küresel İklim Değişikliğinin Biyolojik Çeşitlilik ve Ekosistem Kaynakları Üzerine Etkisi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 1.
- Dellal, İ. (2008) .Küresel İklim değişikliği ve Enerji Kısıcında Tarım, İhracatı Geliştirme ve Etüt Merkezi, İGEME-Bakış Dergisi, Sayı:35, Ankara.
- Dellal, İ. (2012), Türkiye’de İklim Değişikliğinin Tarım ve Gıda Güvencesine Etkileri, Türkiye’nin II. Ulusal Bildiriminin Hazırlanması Projesi Yayını, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çevre Yönetimi Gen. Müd., İklim Değişikliği Dairesi Başkanlığı, Ankara., 1-32.
- Dellal, İ., Ünüvar, İ., Bolat, M ve Polat, K. (2020). İklim Değişikliği ve Tarım: Ekonomik Etkisi Uyum ve Azaltım Politikaları TMMOB Ziraat Mühendisleri Odası, Türkiye Ziraat Mühendisliği, IX. Teknik Kongresi, Bildiriler Kitabı-1, Ankara.
- Denhez, F. (2007). Küresel Isınma Atlası. İstanbul, Türkiye, *NTV Yayınları*.
- Desombre, E.R. (2002). *The Global Environment&World Politics*, Continuum, London, Newyork.
- DGC. 2018. Hazelnut Report for 2017 (in Turkish). Republic of Turkey Ministry of Customs and Trade, Directorate General of Cooperatives (DGC): Ankara.
- Dudley, N., Stolton, S., Belokurov, A., Krueger, L., Lopoukhine, N., Mackinnon, K., Sandwith, T. and Sekhran, N. (2010), Natural Solutions: Protected Areas Helping People Cope With Climate Change. IUCN/WWF, TNC, UNDP, WCS, The World Bank and WWF, Gland, Switzerland, Washington DC and New York, USA.
- Fideghelli, C., and De Salvador, F.R. (2009). World Hazelnut Situation and Perspectives. *Acta Horticulturae*, 845 (2), 39-52. doi: 10.17660/ActaHortic.2009.845.2
- Garrett, K.A., Forbes, G.A., Savary, S., Skelsey, P., Sparks, A.H., Valdivia, C. and Yuen, J. (2011). Complexity in climate change impacts an analytical frame work for effects mediated by plant disease. *Plant Pathology*. 60 (1). 15-30.
- Iqbal, M.M., Goheer, M.A. and Khan, A.M. (2009). Climate-change aspersions on food security of Pakistan. *Science Vision*, 15(1), 15-23.

- Işık, D., ve Akça, A. (2018). Assessment of weed competition critical period in sugar beet. *Journal of Agricultural Sciences*, 24(1), 82-89.
- İkinci, A. (2025). Effects of Climate Change on Fruit Growing: Risks and Solutions for the Future. *Int. Journal Environ. Clim. Change*, 15:3, 268-284.
- Jansen, E., Overpeck, J., Briffa, K.R., Duplessy, J.C., Joos, F., Masson-Delmotte, V. and Miller, H. L. (2007). Palaeoclimate. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Kaya, B. (2009). İklim Değişikliğinin Türkiye’de Buğday, Arpa ve Mısır Bitkilerinin Verimleri Üzerine Etkileri Panel Veri Modeli İle Analizi. T.C. İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Anabilim Dalı İktisat Politikası Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Işık, D. ve Akça, A. (2018). Assessment of weed competition critical period in sugar beet. *Journal of Agricultural Sciences*, 24(1), 82-89.
- Lobell, D.B., Schlenker, W., Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science* 333(6042): 616-620.
- Lorite, I.J., Cabezas-Luque, J.M., Arquero, O., Gabaldón-Leal, C., Santos, C., Rodríguez, A., Ruiz-Ramos, M., and Lovera, M. (2020). The role of phenology in the climate change impacts and adaptati on strategies for tree crops: a case study on almond orchards in Southern Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 294 (January), 108142. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108142>
- Lobell, D.B., Hammer, G.L., McLean, G., Messina, C., Roberts, M.J. and Schlenker, W. (2013). The critical role of extreme heat for maize production in the United States. *Nature Climate Change*, 3, 497-501.
- Mall, R.K., Singh, R., Gupta, A., Srinivasan, G., Rathore, L.S. and et al. (2006). Impact of climate change on Indian agriculture: a review. *Climatic Change* 78(2 4): 445-478.
- Mendelsohn, R. (2000). Efficient adaptation to climate change. *Climatic change*, 45(3), 583-600.
- Mete, B.B. (2022). İklim değişikliği ve Türkiye’de tarım üzerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kırklareli.
- Moriondo, M., Giannakopoulos, C. and Bindi, M. (2011). Climate change impact assessment: the role of climate extremes in crop yield simulation. *Climatic Change*, 104, 679-701.
- O'Neill, B.C. and Oppenheimer, M. (2002). Dangerous Climate Impacts and The Kyoto Protocol. *Science* 296, 1971-1972.
- Pautasso, M., Dehnen-Schmutz, K., Holdenrieder, O., Pietravalle, S., Salama, N., Jeger, M. J., Lange, E., and Hehl-Lange, S. (2010). Plant health and global change-some implications for landscape management. *Biological Reviews*, 85(4), 729-755.
- Parker, L.E., and Abatzoglou, J.T. (2018). Shifts in the thermal niche of almond under climate change. *Climatic Change*, 147(1-2), 211 224.
- Pimentel, D. (2009). Pesticides and pest control. In: Peshin, R., Dhawan, A.K. (Eds.), *Integrated Pest Management: Innovation Develop.Process*, Vol. 1. Springer, Netherlands, pp. 83–89.
- Porter, J.R., Xie, L., Challinor, A.J., Cochrane, K., Howden, M., Iqbal, M.M., Lobell, D.B., and Travasso, M.I. (2014). Food security and food production systems. In CB Field, VR Barros, DJ Dokken, K J Mach, MD Mastrandrea, TE Bilir, ... and LL White (Eds.), *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge, Cambridge Univ. Press, U. Kingdom, pp. 485-533.
- Radicetti, E. and Mancinelli, R. (2021). Sustainable Weed Control in the AgroEcosystems. *Sustainability*, MDPI, vol. 13(15), pages 1-5,.
- Ray, D.K., Gerber, J.S., MacDonald, G.K. and West, P.C. (2015). Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature Communications*, 6: 5989.

- Stern, S.N. (2007) The Economics of Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press. Available at: http://www.hm-treasury.gov.uk/Independent_Reviews/stern_review_economics_climate_change/sternreview_index.cfm
- Şahin, M., Topal, E., Özsoy, N., ve Altunoğlu, E. (2015). İklim değişikliğinin meyvecilik ve arıcılık üzerine etkileri. *Anadolu Doğa Bilimleri Dergisi*, 6(2), 147-154.
- TÜİK (2026). Bitkisel Üretim Verileri. <https://veriportali.tuik.gov.tr/tr/statistical-themes>
- Türkeş, M. (2014). Impacts of the climate change on agricultural food security, traditional knowledge and agroecology. *Turkish Journal of Agriculture: Food Science and Technology*, 2(2), 71-85.
- Türkoğlu, N., Çiçek, İ ve Şensoy, S. (2014). Türkiye’de iklim değişikliğinin meyve ağaçları ve tarla bitkilerinin fenolojik dönemlerine etkileri. *TÜCAUM - VIII. Coğrafya Sempozyumu*, 23-24 Ekim, Ankara.
- Vilà, M., Beaury, E.M., Blumenthal, D.M., Bradley, B. ., Early, R., Laginhas, B.B. and Ibáñez, I. (2021). Understanding the combined impacts of weeds and climate change on crops. *Environmental Research Letters*, 16(3), 034043.
- Yönten, A. (2007). *Küresel Isınmanın Azaltılması Politikaları: Türkiye İçin bir Yaklaşım* (Master's thesis, Dokuz Eylül Üniversitesi (Türkiye).
- Zengin, M. ve Özbahçe, A. (2014). Bitkilerin İklim ve Toprak İstekleri. Konya: Atlas Akademi.

TARLA BİTKİLERİ TARIMINDA UZAKTAN ALGILAMA YÖNTEMLERİNİN BİTKİ KORUMA AÇISINDAN KULLANILMASI

Bahadır Şin*, Lerzan Öztürk**

GİRİŞ

Tarla bitkileri yetiştiriciliği, dünya nüfusunun beslenmesinde temel rol oynayan tarımsal faaliyetlerden biridir. Tarla bitkileri; tahıllar, baklagiller, endüstri bitkileri, yem bitkileri ve Türkiye’de buğday, arpa, mısır, çeltik gibi tahıllar; nohut, mercimek, fasulye gibi baklagiller; ayçiçeği, pamuk, tütün, patates ve şeker pancarı gibi endüstri bitkileri en yaygın olarak yetiştirilen tarla bitkileri arasında yer almaktadır. Özellikle Orta Anadolu, Güneydoğu Anadolu ve Trakya Bölgeleri, tarla bitkileri üretiminde çok önemli bölgelerdir yağlı tohumlar gibi geniş bir çeşitliliği içeren bitki gruplarını belirtmektedir. 2025 yılında Türkiye'nin toplam tarla bitkileri üretimi yaklaşık 68,2 milyon ton olarak gerçekleşmiş olup, üretimin büyük bölümünü 34,2 milyon ton ile tahıllar ve 28,4 milyon ton ile yumru bitkiler oluşturmuştur. Tahıl grubunda buğday 17,95 milyon tonluk üretimle ilk sırada yer alırken, dane mısır 8,5 milyon ton ve arpa 6 milyon ton üretim miktarına ulaşmıştır. Yumru bitkiler içerisinde şeker pancarı yaklaşık 22 milyon ton, patates ise 6,4 milyon ton üretimle öne çıkmıştır. Kuru baklagillerde nohut (412 bin ton), kırmızı mercimek (250 bin ton) ve kuru fasulye (247 bin ton) en fazla üretilen türler olurken, yağlı tohumlu bitkiler arasında ayçiçeği 1,94 milyon tonluk üretimiyle ilk sırada yer almıştır. Pamuk yaklaşık 1,94 milyon tonluk üretimiyle tekstilde kullanılan bitkiler grubunun büyük kısmını oluştururken, tütün üretimi 112 bin ton olarak gerçekleşmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, 2025 yılında Türkiye tarla bitkileri üretiminde buğday, dane mısır, şeker pancarı, patates, ayçiçeği ve pamuk en yüksek üretim miktarına sahip stratejik ürünler olarak öne çıkmıştır (TUIK, 2025). Tarla bitkileri, insan beslenmesinde

* Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniv., Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Sakarya, sinbahadir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0109-3662>

** Dr., Bağımsız araştırmacı, Tekirdağ, Türkiye lerzanzoturk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2199-6807>

gerekli enerji ve proteinin önemli bir kısmını karşılamaktadır (Poutanen ve ark., 2022).

Tarla bitkileri üretiminde verim kayıplarının başlıca nedenleri arasında hastalıklar, zararlılar, yabancı otlar ve çevresel stres faktörleri yer almaktadır. Bu etmenlerin erken dönemde belirlenmesi ve uygun mücadele yöntemlerinin zamanında uygulanması, sürdürülebilir üretim açısından büyük önem taşımaktadır (TAGEM, 2025). Ancak geniş üretim alanlarında yapılan arazi gözlemleri hem zaman almakta hem de önemli miktarda iş gücü gerektirmektedir. Bu nedenle son yıllarda tarımsal alanların daha hızlı ve etkin şekilde değerlendirilmesine imkân veren teknolojilere yönelim artmıştır. Uzaktan algılama, bitkilerden yansıyan elektromanyetik enerjinin ölçülmesi esasına dayanan ve tarımsal üretimde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Uydu görüntüleri, insansız hava araçları ve çeşitli sensör sistemleri sayesinde geniş alanlardan kısa sürede veri elde edilebilmekte, bitki gelişimi ve sağlık durumu düzenli olarak takip edilebilmektedir (Mashori ve ark., 2026). Özellikle görüntüleme teknolojilerindeki gelişmeler, bitkilerde meydana gelen değişimlerin daha ayrıntılı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Bitki koruma çalışmalarında uzaktan algılama yöntemlerinden yararlanılarak hastalık ve zararlıların neden olduğu değişimler belirlenebilmekte, yabancı ot yoğunluğu ortaya konulabilmekte ve sorunlu alanlar haritalanabilmektedir. Böylece mücadele uygulamaları daha doğru planlanabilmekte, gereksiz pestisit kullanımının önüne geçilebilmekte ve üretim maliyetleri azaltılabilmektedir. Son yıllarda uzaktan algılama verilerinin görüntü işleme ve yapay zekâ yöntemleri ile birlikte değerlendirilmesi, tarla bitkilerinde bitki koruma çalışmalarına yeni olanaklar kazandırmıştır. Bu derlemede, tarla bitkileri yetiştiriciliğinde kullanılan uzaktan algılama yöntemleri ve bu yöntemlerin bitki koruma alanındaki kullanım olanakları ele alınmıştır.

Uzaktan Algılama

Uzaktan algılama, yeryüzündeki nesneler veya olaylar hakkında doğrudan fiziksel temas olmaksızın bilgi elde edilmesini sağlayan bir teknoloji ve bilim dalıdır. Uzaktan algılama teknolojilerinin tarımda uygulanması, 1972 yılında Landsat Multispectral Scanner System (MSS) uydusunun fırlatılmasıyla başlamıştır. Bauer ve Cipra, Landsat MSS verilerini kullanarak ABD'nin Ortabatı bölgesindeki tarım alanlarını mısır ve soya fasulyesi alanları olarak sınıflandırmıştır (Khanal ve ark., 2021).

Uzaktan algılama terimi genel olarak bir nesneden yansıyan veya yayılan elektromanyetik radyasyonun cihazlarla ölçülmesini ifade etmektedir. Kullanılan cihazlar elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerindeki radyasyonu kaydedebilmektedir. Uzaktan algılamada bilgi elde etmek amacıyla kullanılan başlıca cihaz ve teknikler arasında kameralar, filmler, filtreler, radyometreler, video sistemleri, sonar ve radar cihazları bulunmaktadır (Nilsson, 1995).

Uzaktan algılama, nesnelerden yansıyan veya yayılan elektromanyetik enerjinin algılanması, kaydedilmesi, işlenmesi ve analiz edilmesi esasına dayanmaktadır (Wójtowicz ve ark., 2016). Uzaktan algılamada görünür ışık (VIS), yakın kızılötesi (NIR), kısa dalga kızılötesi (SWIR), termal kızılötesi (TIR) ve mikrodalga bölgelerinde elde edilen veriler kullanılmaktadır. Uzaktan algılamada elektromanyetik spektrumun farklı dalga boyu bölgeleri, yeryüzündeki nesnelerin fiziksel ve biyolojik özelliklerinin belirlenmesinde farklı bilgiler sunmaktadır. Görünür ışık (VIS; 400–740 nm) bölgesi, mavi, yeşil ve kırmızı bantlardan oluşmakta olup bitki, su ve toprak yüzeylerinin ayırt edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Mavi bant klorofil tarafından güçlü şekilde absorbe edilirken temiz suya daha fazla nüfuz edebilmekte, yeşil bant bitkilerin yüksek yansıma gösterdiği bölge olması nedeniyle bitki canlılığının değerlendirilmesinde önemli rol oynamakta, kırmızı bant ise klorofil tarafından yoğun olarak absorbe edildiğinden bitki örtüsünün belirlenmesi ve vejetasyon analizlerinde kullanılmaktadır. Yakın kızılötesi (NIR; 700–1400 nm) bölgesi, bitki yapraklarının hücresel yapısına duyarlı olup sağlıklı bitkilerde yüksek yansıma göstermesi nedeniyle bitki canlılığı, biyokütle, klorofil miktarı ve fotosentetik aktivitenin değerlendirilmesinde önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde birçok vejetasyon indeksinin hesaplanmasında temel spektral bantlardan biri olarak kullanılmaktadır. Kısa dalga kızılötesi (SWIR; 1,4-3,0 μm) bölgesi ise bitki dokusundaki su içeriği ve hücresel yapıdan etkilendiğinden bitki su durumu, kuraklık stresi, toprak nemi ve bazı bitki hastalıklarının izlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Termal kızılötesi (TIR; 8-15 μm) bölgesi cisimlerin yaydığı ısı enerjisini algılayarak bitki yüzey sıcaklığının belirlenmesine olanak sağlamakta; su stresi, evapotranspirasyon, sulama ihtiyacı ve bitkilerin fizyolojik durumunun değerlendirilmesinde önemli veriler sunmaktadır. Mikrodalga bölgesi ise 1 mm ile 1 m arasındaki dalga boylarını kapsamakta olup bulut, sis ve yağış gibi atmosferik koşullardan büyük ölçüde etkilenmeden veri elde

edilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle radar tabanlı aktif algılama sistemlerinde yaygın olarak kullanılmakta ve toprak nemi, yüzey pürüzlülüğü, bitki yapısı ve biyokütle gibi özelliklerin gece-gündüz ve her türlü hava koşulunda belirlenmesine olanak tanımaktadır (Yavaşlı, 2019; Karabulut, 2019).

Bitkiler, toprak ve diğer yüzeyler elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerinde kendilerine özgü yansıma özellikleri gösterdiğinden, bu farklılıklar kullanılarak çevresel koşullar ve bitki sağlığı hakkında ayrıntılı bilgiler elde edilebilmektedir (Wójtowicz ve ark., 2016; Shanmugapriya ve ark., 2019). Sağlıklı bitkiler görünür bölgede, özellikle kırmızı bantta klorofil tarafından gerçekleştirilen absorpsiyon nedeniyle düşük yansıma gösterirken, yakın kızılötesi bölgede yaprak mezofil dokusunun etkisiyle yüksek yansıma oluşturmaktadır. Bitkilerde hastalık, zararlı, besin elementi eksikliği veya su stresi gibi biyotik ve abiyotik stres faktörleri meydana geldiğinde bu spektral yansıma özellikleri değişmekte ve oluşan değişimler uzaktan algılama sistemleri ile erken dönemde belirlenebilmektedir. Bu nedenle bitkilerin spektral yansıma özellikleri, bitki gelişiminin izlenmesi, stres belirtilerinin tespit edilmesi ve hassas tarım uygulamalarında karar destek sistemlerinin geliştirilmesi açısından temel veri kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir (Omia ve ark., 2023). Bununla birlikte bitkilerin spektral özelliklerinin yorumlanmasında yalnızca hastalık veya zararlı etkisinin dikkate alınması yeterli değildir. Pigment miktarı, yaprak açısı ve yüzey özellikleri, kanopi mimarisi, bitkinin gelişme dönemi, toprak örtüsü, güneş açısı, su ve azot durumu ile ölçüm sırasındaki çevresel koşullar spektral yansımayı önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Özellikle toprak suyu ve azot düzeyindeki farklılıkların oluşturduğu spektral değişimler, düşük şiddetteki patojen enfeksiyonlarının etkisini maskeleyebilmektedir. Benzer şekilde hastalık nedeniyle kanopinin seyrelmesi durumunda toprak yansımasının görüntüye daha fazla katılması veya hastalıklı alanlarda gelişen yabancı otların toplam kanopi yansımasını değiştirmesi, hastalığa özgü sinyallerin ayrılmasını güçleştirebilir (Nilsson, 1995).

Uzaktan algılama sistemlerinin başarısını belirleyen en önemli bir diğer faktör çözünürlüktür. Çözünürlük; mekânsal, spektral, radyometrik ve zamansal olmak üzere dört temel bileşenden oluşmaktadır. Mekânsal çözünürlük görüntüde ayırt edilebilen en küçük alanı ifade ederken, spektral çözünürlük algılayıcının kaydedebildiği bant sayısını ve bant genişliğini göstermektedir. Radyometrik çözünürlük sensörün yansıma

farklılıklarını ayırt edebilme kapasitesini, zamansal çözünürlük ise aynı bölgenin yeniden görüntülenme sıklığını ifade etmektedir. Bu özellikler elde edilen verinin doğruluğunu ve tarımsal uygulamalardaki kullanım başarısını doğrudan etkilemektedir (Yavaşlı, 2019).

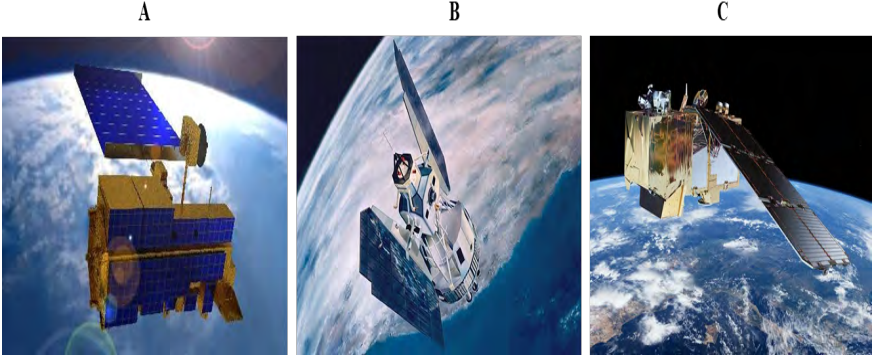
Uzaktan algılama sistemleri genel olarak pasif ve aktif sistemler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Resim 1). Pasif sistemlerde enerji kaynağı güneş olup sensörler yeryüzünden yansıyan doğal elektromanyetik enerjiyi kaydetmektedir. Bu grupta yer alan RGB kameralar, görünür ışık spektrumunda yüksek çözünürlüklü görüntüler sağlayarak üç boyutlu yüzey modellerinin oluşturulması, bitki örtüsü yoğunluğunun belirlenmesi, hastalık ve zararlıların neden olduğu renk ve doku değişimlerinin izlenmesi ile eksik bitkilerin tespitinde kullanılmaktadır. Multispektral sensörler görünür bantların yanı sıra yakın kızılötesi (NIR) ve kırmızı kenar (Red-Edge) bantlarında veri toplayarak NDVI, GNDVI ve NDRE gibi vejetasyon indekslerinin hesaplanmasına olanak sağlamakta; bitki canlılığı, fotosentetik aktivite, besin elementi eksiklikleri ve hastalıkların neden olduğu fizyolojik değişimlerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hiperspektral sensörler ise onlarca hatta yüzlerce dar ve sürekli spektral bantta veri sağlayarak bitkilerin kimyasal ve biyokimyasal özelliklerine ait spektral imzaların ayrıntılı şekilde belirlenmesine imkân vermektedir. Aktif uzaktan algılama sistemlerinde ise sensör tarafından üretilen elektromanyetik enerji hedef yüzeye gönderilmekte ve geri dönen sinyal analiz edilmektedir. Radar ve LiDAR bu sistemlerin en yaygın örnekleri olup, özellikle LiDAR teknolojisi bitki boyu, bitki hacmi ve üç boyutlu bitki yapısının yüksek doğrulukla belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Adamchuk ve ark., 2003; Jindo ve ark., 2021). Son yıllarda tek bir sensörden elde edilen verilerin yeterli olmadığı, farklı sensörlerden sağlanan bilgilerin birlikte değerlendirilmesinin model başarısını önemli ölçüde artırdığı bildirilmektedir. RGB, multispektral, hiperspektral, termal ve LiDAR verilerinin birlikte kullanılması; yaprak alan indeksi, biyokütle, klorofil içeriği, don zararı ve ürün verimi gibi özelliklerin daha doğru tahmin edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca farklı tarihlerde elde edilen zaman serisi görüntülerinin birlikte analizi,

ürün gelişiminin tüm vejetasyon dönemi boyunca izlenmesine olanak vermektedir (Liu ve ark., 2024).

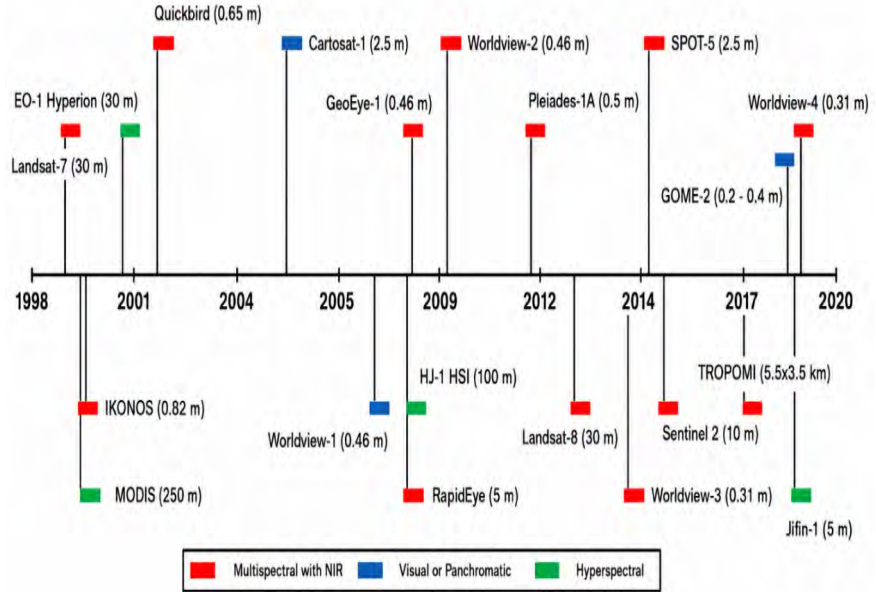


Resim 1. Uzaktan Algılama Sistemleri A. Aktif Sistemler B. Pasif Sistemler (Singh ve Singh, 2024)

Tarımsal uygulamalarda uzaktan algılama verileri uydu sistemleri, hava araçları, insansız hava araçları ve yer tabanlı sensörler aracılığıyla elde edilmektedir. Uydu sistemleri geniş alanların düzenli aralıklarla izlenmesine olanak sağlarken, insansız hava araçları daha yüksek mekânsal çözünürlükte görüntüler sağlayarak tarla düzeyinde ayrıntılı değerlendirmelerin yapılmasına imkân vermektedir. Yer tabanlı sensörler ise bitki ve toprak özelliklerinin yakın mesafeden hassas şekilde belirlenmesinde kullanılmaktadır (Adamchuk ve ark., 2003). Günümüzde Landsat, Sentinel ve MODIS (Resim 2) gibi uydu sensörleri (Resim 3) ile multispektral, hiperspektral ve termal sensörler tarımsal izleme çalışmalarında birlikte yaygın olarak kullanılmaktadır.



Resim 2. A. Modis-Terra (Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG)) B. Landsat (Nasa science) C. Sentinel (Copernicus data space ecosystem)



Resim 3. 1999 Yılından Beri Dünyada Kullanılan Uydu Sensörleri Ve Çözünürlüklerinin Listesi (Khanal ve ark., 2020)

Uzaktan algılama teknolojileri günümüzde hassas tarım uygulamalarının temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Uzaktan algılamanın tarımdaki başlıca uygulamaları; biyokütle ve verim tahmini, bitki canlılığının ve kuraklık stresinin izlenmesi, bitki gelişiminin değerlendirilmesi, ekili alanların tahmin edilmesi ve tarım alanlarının haritalanmasının yanı sıra arazi kullanımı/arazi örtüsü değişimlerinin belirlenmesi, hastalık ve zararlı tespiti, hassas tarım ve sulama yönetimini

kapsamaktadır (Atzberger, 2013; Kundu ve ark., 2022). Bu teknolojiler sayesinde ürün deseninin belirlenmesi, bitki gelişiminin izlenmesi, biyokütle ve verim tahminlerinin yapılması, sulama yönetimi, besin elementi eksikliklerinin belirlenmesi ve kuraklık stresinin değerlendirilmesi mümkün olmaktadır (Shanmugapriya ve ark., 2019; Wu ve ark., 2023). Bu amaçla geliştirilen vejetasyon indeksleri, bitkilerin elektromanyetik spektrumdaki yansıma özelliklerinden yararlanarak klorofil içeriği, azot durumu, biyokütle, yaprak alan indeksi, su durumu ve bitki canlılığı gibi biyofiziksel özelliklerin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Vejetasyon indeksleri genel olarak multispektral ve hiperspektral olarak iki gruba ayrılmakla beraber bunlar da temel, fonksiyonel ve modifiye indeksler olmak üzere üç grupta değerlendirilmektedir. Multispektral vejetasyon indekslerinden (Tablo 1) özellikle Normalize Edilmiş Fark Vejetasyon İndeksi (NDVI), Toprak Düzeltilmiş Vejetasyon İndeksi (SAVI) ve Geliştirilmiş Vejetasyon İndeksi (EVI) gibi vejetasyon indeksleri uzaktan algılama çalışmalarında tarım alanlarının izlenmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan başlıca vejetasyon indeksleridir. NDVI bitki canlılığı ve fotosentetik aktivitenin değerlendirilmesinde, NDRE klorofil içeriği, azot durumu ve erken stres belirtilerinin belirlenmesinde, GNDVI bitki beslenmesi ve fotosentetik etkinliğin izlenmesinde, SAVI ise özellikle seyrek bitki örtüsüne sahip alanlarda toprak yansımalarının etkisini azaltarak omca gelişiminin daha doğru değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Termal görüntülerden elde edilen CWSI ise bitkilerde su stresinin belirlenmesi, sulama ihtiyacının mekânsal olarak haritalandırılması ve hassas sulama uygulamalarının planlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu indekslerin birlikte değerlendirilmesi, tarım alanlarında bitki sağlığının, beslenme durumunun, su stresinin ve mekânsal değişkenliğin hassas bir şekilde belirlenmesini sağlayarak hastalık yönetimi, verim tahmini ve hassas tarla tarımı uygulamalarına önemli katkılar sunmaktadır (Wójtowicz ve ark., 2016; Vera-Esmeraldas ve ark., 2025; Mishra, 2025).

Bitki stresinin erken belirlenmesinde özellikle kırmızı kenar (red-edge) bölgesi önemli bilgiler sağlamaktadır. Yaklaşık 680-750 nm arasındaki bu bölgede, kırmızı banttaki güçlü klorofil absorpsiyonundan yakın kızılötesi bölgedeki yüksek yansımaya doğru keskin bir geçiş meydana gelmektedir. Red-edge, sağlıklı yeşil bitki örtüsünün karakteristik spektral özelliklerinden biri olup klorofil içeriği ve yaprak alan indeksiyle yakından ilişkilidir. Bu nedenle red-edge bölgesinde meydana gelen değişimler,

hastalık ve diğer stres faktörlerinin erken dönemde belirlenmesinde yararlı bir gösterge olarak kullanılmaktadır (Horler ve ark., 1983; Nilsson, 1995).

Tablo 1. Tarla Bitkilerinin İncelenmesinde Kullanılan Vejetasyon İndeksleri (Omia ve ark., 2023)

Kategori	Vejetasyon indeksi	Kısaltma	Ölçülen özellik
Temel vejetasyon indeksleri	Oran Vejetasyon İndeksi	RVI	Klorofil içeriği
	Yeşil Oran Vejetasyon İndeksi	GRVI	Azot içeriği
	Kırmızı Kenar Klorofil İndeksi	CIred-edge	Klorofil içeriği, yaprak alan indeksi
	Fark Vejetasyon İndeksi	DVI	Klorofil içeriği
	Yeşil Fark Vejetasyon İndeksi	DVIGRE	Klorofil içeriği
	Kırmızı Kenar Fark Vejetasyon İndeksi	DVIRED	Klorofil içeriği
Fonksiyonel vejetasyon indeksleri	Atmosferik Dirençli Vejetasyon İndeksi	AVRI	-
	Yeşil Atmosferik Dirençli İndeks	GARI	Klorofil içeriği
	Görünür Atmosferik Dirençli İndeks	VARI	Biyokütle
	Toprak Düzeltilmiş Vejetasyon İndeksi	SAVI	Azot içeriği
	Optimize Edilmiş Toprak Düzeltilmiş Vejetasyon İndeksi	OSAVI	Klorofil içeriği
	Modifiye Toprak Düzeltilmiş Vejetasyon İndeksi	MSAVI	Klorofil içeriği
Modifiye vejetasyon indeksleri	Normalize Edilmiş Fark Vejetasyon İndeksi	NDVI	Klorofil içeriği
	Modifiye Basit Oran	MSR	Klorofil içeriği
	Normalize Edilmiş Kırmızı Kenar Fark İndeksi	NDRE	Azot içeriği

Hiperspektral görüntüleme teknolojisi, multispektral sistemlere kıyasla görünür bölgeden yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi bölgelere kadar uzanan yüzlerce dar ve birbirine bitişik spektral bantta veri sağlayarak bitkilerin fizyolojik ve biyokimyasal özelliklerinin çok daha ayrıntılı şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Multispektral sensörler belirli sayıda geniş bantta bilgi toplarken, hiperspektral sensörler her bir dalga boyundaki küçük değişimleri algılayabildiğinden bitkilerin kendilerine özgü spektral imzalarını yüksek hassasiyetle ortaya koyabilmektedir. Bu nedenle klorofil içeriği, yaprak alan indeksi (LAI), pigment bileşimi, su içeriği ve besin elementi durumu gibi birçok bitki özelliği hiperspektral veriler kullanılarak daha doğru şekilde tahmin edilebilmektedir. İlk geliştirilen hiperspektral vejetasyon indeksleri arasında Kırmızı Kenar Pozisyonu (REP), Normalize Edilmiş Pigment Klorofil Oran İndeksi (NPCl) ve Modifiye Klorofil Absorpsiyon Reflektans İndeksi (MCARI) yer almakta olup, bu indeksler multispektral indekslerle benzer prensiplere dayanmasına rağmen çok daha yüksek

spektral çözünürlükten yararlanarak bitkilerde meydana gelen fizyolojik değişimleri daha hassas biçimde belirleyebilmektedir. Son yıllarda ise yalnızca belirli bantların oranlanmasına dayalı klasik yaklaşımların ötesine geçilerek spektral eğri alanı, birinci türev, ters alma ve logaritmik dönüşüm gibi spektral dönüşüm yöntemlerine dayanan yeni hiperspektral indeksler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, bitki spektrumundaki ince değişimlerin daha belirgin hale getirilmesini sağlayarak özellikle yaprak alan indeksi, klorofil miktarı ve biyokütle tahminlerinde doğruluğu artırmaktadır. Yapılan çalışmalar, birinci türev dönüşümünün özellikle çeltikte taç spektrumu ile yaprak alan indeksi arasındaki ilişkiyi önemli ölçüde güçlendirdiğini göstermiştir. Benzer şekilde, Normalize Edilmiş Reflektans Eğrisi Alanı (NAOC) indeksi kullanılarak hiperspektral görüntülerden yaprak klorofil içeriğinin yüksek doğrulukla tahmin edilebildiği, farklı ürün ve toprak tiplerini içeren heterojen alanlarda ilave arazi ölçümlerine gerek duyulmadan klorofil dağılım haritalarının oluşturulabildiği bildirilmiştir. Bu özellikleri sayesinde hiperspektral vejetasyon indeksleri, bitki gelişiminin izlenmesi, beslenme durumunun değerlendirilmesi, hastalık ve zararlıların neden olduğu fizyolojik değişimlerin belirlenmesi ile biyotik ve abiyotik streslerin erken dönemde tespit edilmesinde multispektral sistemlere göre önemli avantajlar sunmaktadır (Peñuelas ve ark., 1995; Daughtry ve ark., 2000).

Uzaktan algılama çalışmalarında güvenilir sonuçların elde edilebilmesi için arazi ölçümleri büyük önem taşımaktadır. Bitki türü, gelişme dönemi, ekim ve hasat tarihleri, verim değerleri ile çevresel değişkenlerden elde edilen arazi verileri, uzaktan algılama modellerinin kalibrasyonu ve doğrulanmasında kullanılmaktadır. Böylece geliştirilen modeller farklı bölgelerde daha yüksek doğrulukla uygulanabilmektedir (Navi ve ark., 2023). Son yıllarda görüntü işleme, makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte uzaktan algılama verilerinin analiz kapasitesi önemli ölçüde artmıştır. Farklı sensörlerden elde edilen verilerin birlikte değerlendirilmesi sayesinde bitki gelişimi, stres faktörleri ve çevresel koşullar daha kapsamlı biçimde analiz edilebilmektedir. Bu gelişmeler uzaktan algılama teknolojilerini yalnızca gözlem ve izleme amacıyla kullanılan sistemler olmaktan çıkararak, tarımsal karar destek sistemlerinin önemli bir bileşeni haline getirmiştir (Muhammad ve ark., 2026; Wang ve ark., 2026).

Günümüzde uzaktan algılama teknolojileri, yapay zekâ (YZ), makine öğrenmesi (MÖ), derin öğrenme (DÖ), nesnelerin interneti

(Nİ), kablosuz sensör ağları (KSA), büyük veri analitiği ve bulut bilişim teknolojileri ile bütünleşerek hassas tarım uygulamalarının temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir. Tarımsal üretim alanlarında uydu, insansız hava araçları (İHA), yer tabanlı sensörler ve akıllı tarım makinelerinden elde edilen büyük hacimli veriler, yapay zekâ algoritmaları kullanılarak analiz edilmekte ve üreticilere gerçek zamanlı karar desteği sunulmaktadır. Böylece bitki gelişiminin sürekli izlenmesi, hastalık ve zararlıların erken dönemde belirlenmesi, yabancı otların otomatik olarak tespit edilmesi, su ve besin elementi stresinin değerlendirilmesi, verim tahmini ve ürün kalite analizleri yüksek doğrulukla gerçekleştirilebilmektedir. Özellikle derin öğrenme tabanlı görüntü işleme yöntemleri, karmaşık tarımsal görüntülerden anlamlı bilgilerin otomatik olarak çıkarılmasını sağlayarak geleneksel görüntü analiz yöntemlerine göre daha başarılı sonuçlar vermektedir (Çakmakçı ve Çakmakçı 2024).

Uzaktan Algılama Süreci

Uzaktan algılama süreci, yeryüzündeki hedeflerden elde edilen elektromanyetik bilgilerin sensörler aracılığıyla kaydedilmesi, işlenmesi, analiz edilmesi ve anlamlı bilgiye dönüştürülmesi aşamalarından oluşmaktadır. Bitki ve toprak yüzeyleriyle etkileşime giren elektromanyetik enerji; yüzeyin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerine bağlı olarak farklı spektral özellikler göstermektedir. Bu farklılıklar uydu, insansız hava aracı (İHA), uçak veya yer tabanlı platformlarda bulunan sensörler tarafından kaydedilerek sayısal görüntü verilerine dönüştürülmektedir. Sensörlerden elde edilen ham veriler, analiz öncesinde radyometrik, geometrik ve atmosferik düzeltme gibi ön işleme aşamalarından geçirilmektedir. Gerektiğinde görüntülerin coğrafi referanslanması, mozaiklenmesi ve iyileştirilmesi gibi işlemler de uygulanmaktadır. Ön işleme sonrasında spektral bantlar ve vejetasyon indeksleri değerlendirilebilmekte; görüntü sınıflandırma, nesne tespiti, makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak hedef özellikler belirlenebilmektedir. Elde edilen sonuçlar coğrafi bilgi sistemleriyle (CBS) bütünleştirilerek tematik ve mekânsal dağılım haritalarına dönüştürülebilmektedir. Böylece uzaktan algılama verileri, tarımsal alanlarda bitki gelişiminin izlenmesi ve hastalık, zararlı, yabancı

ot ile çeşitli stres faktörlerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesinde kullanılabilir bilgiye dönüştürülmektedir (Yeshe ve ark., 2021).

Uzaktan Algılamanın Bitki Korumada Kullanımı

Uzaktan algılama teknolojileri, bitki koruma çalışmalarında hastalık, zararlı ve yabancı otların erken dönemde belirlenmesi, yayılışlarının izlenmesi ve mücadele stratejilerinin geliştirilmesinde önemli bir araç haline gelmiştir. Uydu sistemleri, insansız hava araçları, hava platformları ve yer tabanlı sensörler aracılığıyla elde edilen veriler sayesinde bitkilerin fizyolojik durumları, stres seviyeleri ve sağlık durumları hızlı ve temassız olarak değerlendirilebilmektedir (Wójtowicz ve ark., 2016; Shanmugapriya ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2019).

Uzaktan algılama teknolojileri, bitki hastalıkları ve zararlılarının mekânsal dağılımının belirlenmesi, erken dönemde tespit edilmesi ve alana özgü mücadele uygulamalarının geliştirilmesi açısından önemli olanaklar sunmaktadır. Sensörlerin hastalık belirtilerini algılama başarısı bitkinin üç boyutlu kanopi yapısına, patojenin biyolojisine ve belirtilerin bitki üzerindeki konumuna bağlıdır. Özellikle bitki paraziti nematodlar ve diğer toprak kökenli patojenlerin neden olduğu kök zararları doğrudan görüntülenemese de kök fonksiyonlarındaki bozulmanın bitkinin toprak üstü aksamında oluşturduğu fizyolojik değişiklikler uzaktan algılama yöntemleriyle belirlenebilmektedir. Nematod bulaşıklıklarının tarla içerisinde çoğunlukla odaklar halinde bulunması ve yayılımlarının nispeten yavaş olması, uzaktan algılama ile zarar haritalarının oluşturulmasını ve bu haritaların sonraki üretim dönemlerinde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte uzaktan algılama zararın bulunduğu alanları ortaya koyabilse de etmen türünün kesin olarak belirlenmesi için arazi örnekleme ve laboratuvar doğrulaması gerekmektedir. Hastalıkların görünür belirtiler ortaya çıkmadan önce belirlenmesi uzaktan algılama çalışmalarının önemli hedeflerinden biri olmakla birlikte, hastalık kaynaklı spektral ve termal değişimlerin su ve besin stresi gibi diğer stres faktörlerinden ayrılması halen önemli bir güçlük oluşturmaktadır (Sangeetha ve ark., 2024).

Bitkilerde hastalık ve zararlıların oluşturduğu biyotik stres, görünür belirtiler ortaya çıkmadan önce veya belirtilerle birlikte bitkinin fizyolojik, biyokimyasal ve yapısal özelliklerinde çeşitli değişimlere neden olabilmektedir. Fotosentetik aktivitenin azalması, klorofil miktarındaki değişimler, hücresel yapının bozulması, su içeriğinin azalması ve yaprak

sıcaklığındaki farklılaşmalar bunların başında gelmektedir. Bu değişimler, bitkinin elektromanyetik enerjiyi soğurma, geçirme ve yansıtma özelliklerini etkileyerek sağlıklı ve stres altındaki bitkiler arasında spektral farklılıkların oluşmasına yol açmaktadır. Bu nedenle uzaktan algılama teknikleri, hastalık ve zararlı kaynaklı bitki stresinin doğrudan etmenin görüntülenmesinden ziyade, çoğunlukla bitkinin strese verdiği fizyolojik ve spektral tepkilerin belirlenmesine dayanmaktadır (Lawley ve ark., 2016; Karim ve ark., 2019). Uzaktan algılama sistemleri sayesinde bu değişiklikler belirtiler gözle görülmeden önce belirlenebilmekte ve erken müdahale olanağı sağlanmaktadır (Gogoi ve ark., 2018)

Yer tabanlı uzaktan algılama sistemleri, bitki yaprağı veya kanopisinden yüksek spektral çözünürlükte veri elde edilmesine olanak sağlayarak hastalık ve zararlıların hassas biçimde belirlenmesinde kullanılmaktadır. Özellikle hiperspektral görüntüleme ve spektrometrelerden elde edilen verilerin makine öğrenmesi yöntemleriyle birlikte değerlendirilmesi, görünür belirtiler ortaya çıkmadan önce bitkide meydana gelen fizyolojik değişimlerin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Hiperspektral İHA görüntülerinin spektral, doku ve renk özellikleriyle birlikte değerlendirilmesi ve Random Forest gibi makine öğrenmesi yöntemleriyle analiz edilmesi sonucunda buğdayda Fusarium başak yanıklığının tarla koşullarında %85 doğrulukla belirlenebildiği bildirilmiştir. Benzer şekilde, buğday sap pasının dört farklı hastalık şiddeti düzeyinde sınıflandırılmasında %85 genel doğruluk elde edilmiş; düşük şiddette bulaşık ve sağlıklı bitkilerin ayrımında doğruluk %88'e ulaşmıştır (Gu et al., 2026) Bu sonuçlar, İHA tabanlı hiperspektral görüntülemenin yalnızca hastalığın varlığının belirlenmesinde değil, hastalık şiddetinin sınıflandırılmasında da kullanılabileceğini göstermektedir.

Uzaktan algılama teknolojileri yalnızca mevcut hastalık belirtilerinin belirlenmesinde değil, hastalık gelişimini etkileyen çevresel koşulların izlenmesi yoluyla hastalık riskinin tahmin edilmesinde de kullanılabilmektedir. Sıcaklık, nem ve toprak nemi gibi hastalık epidemiyolojisini etkileyen çevresel değişkenlerin uzaktan algılama verileriyle birlikte değerlendirilmesi, hastalık gelişimi açısından riskli alanların önceden belirlenmesine ve mücadele uygulamalarının daha uygun zamanda gerçekleştirilmesine katkı sağlayabilmektedir.

Tarla bitkilerinde hastalık ve zararlıların belirlenmesinde kullanılan uzaktan algılama yöntemlerine ilişkin çalışmalar Tablo 2’te özetlenmiştir. Çalışmalar incelendiğinde, biyotik streslerin belirlenmesinde hiperspektral ve multispektral görüntüleme başta olmak üzere spektrometre, radar, uydu görüntüleri ve havadan görüntüleme gibi farklı yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Bunlardan yer tabanlı ve taşınabilir spektrometreler, bitki dokusu veya kanopinin yakın mesafeden yüksek spektral çözünürlükle değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Tablo 2. Tarla Bitkilerinde Hastalık Ve Zararlıların Belirlenmesinde Kullanılan Uzaktan Algılama Yöntemleri İle İlgili Yapılan Bazı Çalışmalar (Mirik ve ark., 2013; Khanal et al., 2020; Gu et al., 2026)

Tarla bitkisi	Hastalık/Zararlı	Uzaktan algılama yöntemi / sensör
Sorgum	<i>Hieroglyphus nigrorepletus</i>	Yer tabanlı X-band radar sistemi
Pamuk	<i>Thrips tabaci</i>	Taşınabilir spektrometre
Pamuk	Yaprakpiresi	Hiperspektral
Çeltik	Sap kurdu	Hiperspektral
Çeltik	Çeltik yaprak kıvrırcığı	Spektral türev dönüşümü
Pamuk	Akar	Multispektral
Pamuk	Beyazsinek	Multispektral videografi ve CIR görüntüleme
Soya fasulyesi	Pas	Multispektral
Mısır	Maize streak gemini virüs	RapidEye multispektral
Kışlık buğday	Sarı pas	Spektrograf
Buğday	Sarı pas	Hiperspektral
Buğday	Wheat streak mosaic virüs	Landsat 5 TM görüntüsü
Kışlık buğday	Sarı pas	Sürekli dalgacık analizi
Pamuk	Kök çürüklüğü	Havadan multispektral görüntüleme
Çeltik	Çeltik yaprak kıvrırcılığı	Görüntüleme spektrometresi
Çeltik	Çeltik yanıklığı	Yer tabanlı ve İHA hiperspektral
Çeltik	Hastalıklar	Taşınabilir multispektral/RGB kamera
Buğday	Fusarium başak yanıklığı	Hiperspektral görüntüleyici
Buğday	Yeşil böcek	Yer tabanlı spektrometre
Mısır	Curvularia yaprak lekesi	Hiperspektral görüntüleme
Mısır	Gri yaprak lekesi	Tarla spektrometresi PSR-3500
Mısır	Kuzey Yaprak Yanıklığı	Tarla spektrometresi PSR-3500
Soya fasulyesi	Mozaik virüsü	Hiperspektral görüntüleyici
Soya fasulyesi	Bakteriyel yaprak lekesi	Hiperspektral eğri
Çeltik	Bakteriyel yaprak çizgisi	İHA hiperspektral
Buğday	Fusarium başak yanıklığı	İHA hiperspektral
Buğday	Gövde pası	İHA hiperspektral
Mısır	Kuzey mısır yaprak yanıklığı	İHA hiperspektral
Mısır	Zararlılar ve hastalıklar	İHA RGB görüntüsü
Mısır	Curvularia yaprak lekesi	İHA multispektral ve termal kızılötesi

Tarla bitkisi	Hastalık/Zararlı	Uzaktan algılama yöntemi / sensör
Tarla bitkileri	Zararlılar ve hastalıklar	WorldView-2, Landsat-8
Tarla bitkileri	Gelişim izleme	GF-2
Kışlık buğday	Külleme ve yaprak bitleri	Çift zamanlı Landsat-8
Kışlık buğday	Çizgi pası	Sentinel-2
Kışlık buğday	Mildiyö ve afitler	Çift zamanlı Landsat-8 – SMOTE-BPNN yöntemi
Mısır	Kırmızı örümcek akarı	Yüksek çözünürlüklü uydu görüntüsü
Mısır	Yaprak kurdu	Çok zamanlı hiperspektral uydu verisi
Şeker pancarı	Hastalık izleme	El tipi spektrometre ve hiperspektral görüntüleyici
Patates	Hastalık izleme	İHA üzerinde görsel sensör

Hastalık ve zararlıların belirlenmesinde ham spektral verilerin yanı sıra bitkilerin fizyolojik ve yapısal değişimlerini daha belirgin hâle getiren çeşitli vejetasyon ve spektral indekslerden de yararlanılmaktadır. Bu amaçla Normalize Edilmiş Fark Vejetasyon İndeksi (NDVI), Yeşil Normalize Edilmiş Fark Vejetasyon İndeksi (GNDVI), Mavi Normalize Edilmiş Fark Vejetasyon İndeksi (BNDVI), Green Ratio Vegetation Index, Red-Edge Normalize Edilmiş Fark Vejetasyon İndeksi (RENDVI), Structure Insensitive Pigment Index (SIPI), Infrared Percentage Vegetation Index (IPVI), Chlorophyll Index (CI) ve Difference Vegetation Index (DVI) gibi indeksler kullanılabilmektedir. Ayrıca Normalized Difference Spectral Index (NDSI), Ratio Spectral Index (RSI) ve Difference Spectral Index (DSI) gibi spektral indekslerin de hastalık ve zararlı kaynaklı değişimlerin ortaya çıkarılmasında kullanılabileceği bildirilmektedir (Pourazar ve ark., 2019).

Bitki hastalıklarının belirlenmesinde özellikle hiperspektral görüntüleme sistemleri yüksek başarı göstermektedir. Gogoi ve ark. (2018), görünür, kızılötesi, floresans ve termal görüntüleme sistemlerinin hastalık belirtilerini erken dönemde ortaya çıkarabildiğini ve pestisit uygulamalarının yalnızca enfekte alanlara yönlendirilmesine olanak sağladığını bildirmiştir. Böylece gereksiz pestisit kullanımının azaltılması ve çevresel etkilerin sınırlandırılması mümkün olabilmektedir. Hastalıkların belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biri olan termal görüntülemede ise, patojen enfeksiyonlarının bitkilerin su alımı, stomatal iletkenlik ve transpirasyonunda meydana getirdiği değişimlerin yaprak ve kanopi sıcaklığı üzerinden değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle kök ve iletim demetlerini etkileyen hastalıklarda su taşımının bozulması, sağlıklı ve hastalıklı bitkiler arasında belirgin sıcaklık farklılıklarının ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Nitekim *Pythium*

aphanidermatum ile enfekteli şeker pancarı ve *Phymatotrichum omnivorum* ile enfekteli pamuk bitkilerinde yaprak sıcaklığının sağlıklı bitkilere göre yaklaşık 3-4 °C daha yüksek olduğu; *Fusarium*, *Pythium* ve *Rhizoctonia* kaynaklı kök çürüklüklerinde de benzer sıcaklık değişimlerinin meydana gelebildiği bildirilmiştir (Pinter ve ark., 1979; Nilsson, 1995). Bununla birlikte yaprak ve kanopi sıcaklığı yalnızca hastalık etkisiyle değişmemektedir. Sulama ve azot düzeyi, rüzgâr, bitki morfolojisi ve çevresel koşullar da termal ölçümleri önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu nedenle termal görüntüleme, hastalık etmeninin doğrudan tanılanmasından çok bitkide meydana gelen fizyolojik stresin belirlenmesinde kullanılmalı ve diğer sensör verileri ile arazi gözlemleriyle birlikte değerlendirilmelidir (Nilsson, 1995).

Uzaktan algılama teknikleri yalnızca hastalıkların değil, zararlı böceklerin neden olduğu zararların belirlenmesi ve izlenmesinde de kullanılmaktadır. Uzaktan algılama; zararlıların neden olduğu yaprak kayıplarının yanı sıra kloroz, yapraklarda sararma ve zaman içerisinde meydana gelen yaprak örtüsü azalmalarının izlenmesinde kullanılmakta; bu değişimlere ait spektral tepkilerin ilişkilendirilmesi, sınıflandırılması ve yorumlanmasına olanak sağlamaktadır. Örneğin, zararlı istilalarının geniş alanlarda izlenmesinde etkili bir yöntem olan uzaktan algılama teknolojileri kullanılarak zararlıların varlığı ve yayılışı belirlenebilmektedir (Adhikary ve ark., 2023). Geleneksel yer tabanlı izleme yöntemleri, geniş alanlarda zararlıların gelişimi ve dağılımına ilişkin güvenilir mekânsal ve zamansal veriler sağlamada çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Bu durum, özellikle biyolojik mücadele başta olmak üzere hassas ve hedefe yönelik mücadele uygulamalarının gerçekleştirilmesini güçleştirmekte ve uygulama etkinliğinin azalmasına neden olabilmektedir. Uzaktan algılama teknolojileri, daha yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlükte veri sağlayarak zararlı böceklerin göç ve yayılma hareketlerinin izlenmesinde kullanılan eşey feromonu tuzakları, ışık tuzakları ve emici tuzaklar gibi geleneksel yöntemleri tamamlayıcı niteliktedir (Mpisane ve ark., 2025). Ayrıca bu yöntemlerin makine öğrenmesi teknikleriyle bütünleştirilmesi, elde edilen büyük miktardaki verinin daha doğru analiz edilmesine, belirli örüntülerin ortaya çıkarılmasına ve zararlı davranışlarının daha yüksek doğrulukla tahmin edilmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle yüksek çözünürlüklü insansız hava aracı görüntüleri, zararlıların neden olduğu yaprak kayıpları, renk değişimleri ve gelişme geriliklerinin görüntü işleme teknikleriyle ortaya

konulmasına olanak sağlamaktadır. Bu veriler kullanılarak zararlı yoğunluk ve dağılım haritaları oluşturulabilmekte ve mücadele uygulamaları yalnızca gerekli alanlara yönlendirilebilmektedir (Yang, 2020). Bu yaklaşım, entegre mücadele programlarının etkinliğinin artırılmasının yanı sıra pestisit kullanımının azaltılmasına da katkı sağlamaktadır.

Uzaktan algılama, nematod zararlarının belirlenmesinde de kullanılabilmektedir. Zararlıların beslenmesi, yaprak kaybı veya kök zararına bağlı olarak yeşil biyokütle ve yaprak alanında meydana gelen azalmalar, hava fotoğraflarında veya multispektral vejetasyon indekslerinde anormal alanlar şeklinde ortaya çıkabilmektedir. Bu yaklaşımın özellikle monokültür tarla bitkilerinde daha başarılı olduğu belirtilmektedir. Bitki paraziti nematodların neden olduğu stresin uzaktan algılama ile belirlenmesine yönelik çalışmalar oldukça eskiye dayanmaktadır. Heald ve ark. (1972), pamuk alanlarında *Rotylenchulus reniformis* zararının belirlenmesinde kızılötesi hava görüntülerinden yararlanırken, Hillnhütter et al., (2011) kızılötesi termometri kullanarak şeker pancarında *Heterodera schachtii* ile bulaşık alanları sağlıklı alanlardan ayırt edebilmiştir. Benzer şekilde, multispektral görüntüler kullanılarak buğdayda *Heterodera avenae* bulaşıklığı yüksek alanlarda kanopi sıcaklığının düşük bulaşıklık gösteren alanlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Soyada ise *Heterodera glycines*'in tarla içerisindeki mekânsal dağılımı uzaktan algılama yöntemleriyle haritalanmıştır (Kundu ve ark., 2022). Pamuk alanlarında *Rotylenchulus reniformis* zararının değerlendirilmesinde renkli kızılötesi görüntülerden; kenaf bitkisinde *Meloidogyne incognita* ve ilişkili toprak kökenli fungal kompleksin mevsimsel gelişiminin izlenmesinde ise çok zamanlı NIR videografiden yararlanılmıştır. Bununla birlikte bitki gelişimindeki zayıflama zararlıları dışındaki birçok faktörden kaynaklanabileceğinden, etmenin kesin olarak belirlenmesi için spektral, mekânsal ve zamansal bilgilerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Pinter ve ark., 2003).

Benzer şekilde, yabancı ot yönetiminde uzaktan algılama teknikleri, kültür bitkileri ile yabancı otlar arasındaki farklı spektral yansıma özelliklerinden yararlanılarak yabancı otların belirlenmesine, yoğunluklarının değerlendirilmesine ve mekânsal dağılımlarının haritalanmasına olanak sağlamaktadır. Geleneksel arazi sürveyleri yabancı otların belirlenmesinde etkili olmakla birlikte, geniş alanlarda yüksek iş gücü gerektirmesi ve zaman alıcı olması nedeniyle görüntü tabanlı uzaktan

algılama yöntemleri hassas yabancı ot yönetiminde önemli avantajlar sunmaktadır. Elde edilen yabancı ot dağılım veya reçete haritaları, herbisitlerin tüm alana homojen olarak uygulanması yerine yalnızca yabancı ot bulunan bölgelere veya yabancı ot yoğunluğuna göre uygulanmasına imkân vermektedir. Bu kapsamda Kaur ve ark. (2014), radyans oranı ve NDVI değerlerinden yararlanarak buğday ile *Rumex spinosus* popülasyonlarının ekimden 30 gün sonra ayırt edilebildiğini, farklı yabancı ot yoğunluklarının ise 60 günden sonra belirlenebildiğini bildirmiştir. Benzer şekilde, buğday ile *Malva neglecta* popülasyonlarının radyans oranı ve NDVI kullanılarak ekimden 30 gün sonra birbirinden ayrılabilirdiği ve farklı yabancı ot yoğunluklarının 60 günden sonra ayırt edilebildiği belirlenmiştir (Kaur ve Jaidka, 2014). Uzaktan algılama verilerinin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile bütünleştirilmesiyle oluşturulan yabancı ot reçete haritaları, alana özgü ve gereksinime dayalı herbisit uygulamalarına temel oluşturarak kimyasal kullanımının azaltılmasına ve yabancı ot mücadelesinin daha etkin yürütülmesine katkı sağlayabilmektedir. Yabancı otların uzaktan algılama ile tespiti amacıyla yürütülen bazı çalışmalara ait veriler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Uzaktan Algılama İle Yabancı Ot Tespiti (Khanal ve ark., 2020)

Tarla bitkisi	Platform / sensör / veri	Mekânsal / zamansal çözünürlük	Başarı / Sonuç	Çalışma alanı
Mısır	Görsel ve multispektral sensörler taşıyan İHA	1,14–3,8 cm (görsel); 1,62–5,51 cm (multispektral); mısırın 4–6 yaprak döneminde tek zamanlı görüntüleme	Yabancı ot sınıflandırma doğruluğu %86–92; en düşük uçuş yüksekliğinde (30 m) en yüksek başarı	İspanya
Mısır	İHA üzerinde multispektral sensör	2 cm; mısırın 4–6 yaprak döneminde tek zamanlı görüntüleme	Yabancı ot yoğunluğu tahmininde $R^2 = 0,89$; yabancı ot haritası sınıflandırma doğruluğu %86	İspanya
Kışlık buğday	QuickBird multispektral uydu görüntüsü	2,4 m (multispektral);	Sınıflandırma doğruluğu %80–98	İspanya
Soya fasulyesi	İHA üzerinde multispektral sensör	1,3 m; görüntüler 20 ve 30 Temmuz	Sınıflandırma doğruluğu %92–94	ABD

SONUÇ

Uzaktan algılama teknolojileri, tarla bitkilerinde hastalık, zararlı ve yabancı otların belirlenmesi ve izlenmesinde önemli olanaklar sunmaktadır. Uydu, İHA ve farklı sensör sistemlerinden elde edilen verilerin vejetasyon indeksleri ve yapay zekâ yöntemleriyle birlikte kullanılması, bitki sağlığındaki değişimlerin erken dönemde belirlenmesine ve sorunlu alanların haritalanmasına katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, çevresel koşullar ve farklı stres faktörlerinin benzer spektral tepkiler oluşturabilmesi nedeniyle elde edilen sonuçların arazi gözlemleriyle desteklenmesi önemlidir. Bu teknolojilerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, mücadele uygulamalarının yalnızca gerekli alanlara yönlendirilmesine, pestisit kullanımının azaltılmasına ve daha sürdürülebilir bitki koruma uygulamalarının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Adamchuk, V. I., Perk, R. L. and Schepers, J. S. (2003). EC03-702 precision agriculture: Applications of remote sensing in site-specific management.
- Adhikary, S., Biswas, B., Kumar Naskar, M., Mukherjee, B., Pratap Singh, A. ve Atta, K. (2023). Remote sensing for agricultural applications. *Arid environment - Perspectives, challenges and management* içinde. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.106876.
- Atzberger, C. (2013). Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. *Remote Sensing*, 5(2), 949-981.
- Copernicus Data Space Ecosystem. Copernicus Sentinel missions: Sentinel-2. Erişim tarihi: 15.08.2026.
- Çakmakçı, M. F. ve Çakmakçı, R. (2023). Uzaktan algılama, yapay zeka ve geleceğin akıllı tarım teknolojisi trendleri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (52), 234-246.
- Daughtry, C. S. T., Walthall, C. L., Kim, M. S., De Colstoun, E. B. ve McMurtry III, J. E. (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 74, 229-239.
- Gogoi, N. K., Deka, B. ve Bora, L. C. (2018). Remote sensing and its use in detection and monitoring plant diseases: A review. *Agricultural Reviews*, 39, 307-313. DOI: 10.18805/ag.R-1835.
- Heald, C. M., Thames, W. H. ve Wiegand, C. L. (1972). Detection of *Rotylenchulus reniformis* infestations by aerial infrared photography. *Journal of Nematology*, 4, (4), 298.
- Hillnhütter, C., Mahlein, A. K., Sikora, R. A. ve Oerke, E. C. (2011). Remote sensing to detect plant stress induced by *Heterodera schachtii* and *Rhizoctonia solani* in sugar beet fields. *Field Crops Research, 122*, 71-77.
- Jindo, K., Kozan, O., Iseki, K., Maestrini, B., van Evert, F. K., Wubengeda, Y. ve Kempenaar, C. (2021). Potential utilization of satellite remote sensing for field-based agricultural studies. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8, 1-16.
- Karabulut, M. (2019). Vejetasyon çalışmalarında uzaktan algılama. D. D. Yavaşlı ve M. K. Ölgün (Ed.), *Coğrafyada uzaktan algılama içinde* (s. 109-156). Kriter Yayınevi.
- Kaur, R., Jaidka, M. ve Kingra, P. K. (2014). Study of optimum time span for distinguishing *Rumex spinosus* in wheat crop through spectral reflectance characteristics. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 84, (3), 625-633.
- Kaur, R. ve Jaidka, M. (2014). Spectral reflectance characteristics to distinguish *Malva neglecta* in wheat (*Triticum aestivum*). *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 84, (10), 1243-1249.
- Khanal, S., Kc, K., Fulton, J. P., Shearer, S. ve Ozkan, E. (2020). Remote sensing in agriculture- Accomplishments, limitations, and opportunities. *Remote Sensing*, 12, (22), 3783.
- Kundu, A., Chakraborty, R. ve Sarkar, S. (2022). Remote sensing in nematode detection and forecasting. *Agriculture & Food: e-Newsletter*, 4,, 74-77.
- Lawley, V., Lewis, M., Clarke, K. ve Ostendorf, B. (2016). Site-based and remote sensing methods for monitoring indicators of vegetation condition: An Australian review. *Ecological Indicators*, 60, 1273-1283.
- Liu, J., Zhou, Z. ve Li, B. (2024). Editorial: Remote sensing for field-based crop phenotyping. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1368694. DOI: 10.3389/fpls.2024.1368694.
- Mashori, A. S., Li, F., Aman, M., Zhang, W., Jia, S., Ali, A. ve Yan, Y. (2026). Remote sensing through UAVs for precision agriculture: Applications, technical foundations, current barriers, and future opportunities. *Smart Agricultural Technology*, 102074.
- Mirik, M. vd. (2013). Remote monitoring of wheat streak mosaic progression using sub-pixel classification of Landsat 5 TM imagery for site specific disease management in winter wheat. *Advances in Remote Sensing*, 2, 16-28.

- Mohamed El-Karim. Role of remote sensing in environmental monitoring. *Science Ind Journal*, 21. (4), 298.
- Mpisane, K., Kganyago, M., Munghemezulu, C., Price, R. ve Nduku, L. (2025). A systematic review of remote sensing technologies and techniques for agricultural insect pest monitoring: Lessons for *Locustana pardalina* (Brown Locust) control in South Africa. *Frontiers in Remote Sensing*, 6, 1571149. DOI: 10.3389/frsen.2025.1571149.
- NASA Science. Landsat*. Erişim tarihi: 15.08.2026.
- Nilsson, H. (1995). Remote sensing and image analysis in plant pathology. *Annual Review of Phytopathology*, 33, 489-527. DOI: 10.1146/annurev.py.33.090195.002421.
- Nilsson, H. E. (1995). Remote sensing and image analysis in plant pathology. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 17, (2), 154-166. DOI: 10.1080/07060669509500707.
- Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG). Terra. Erişim tarihi: 15.08.2026.
- Omia, E., Bae, H., Park, E., Kim, M. S., Baek, I., Kabenge, I. ve Cho, B. K. (2023). Remote sensing in field crop monitoring: A comprehensive review of sensor systems, data analyses and recent advances. *Remote Sensing*, 15, (2), 354. DOI: 10.3390/rs15020354.
- Peñuelas, J., Gamon, J. A., Fredeen, A. L., Merino, J. and Field, C. B. (1994). Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*, 48, 135-146.
- Pinter Jr., P. J., Hatfield, J. L., Schepers, J. S., Barnes, E. M., Moran, M. S., Daughtry, C. S. ve Upchurch, D. R. (2003). Remote sensing for crop management. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69, (6), 647-664.
- Pinter Jr., P. J., Stanghellini, M. E., Reginato, R. J., Idso, S. B., Jenkins, A. D. and Jackson, R. D. (1979). Remote detection of biological stresses in plants with infrared thermometry. *Science*, 205, (4406), 585-587.
- Pourazar, H., Samadzadegan, F. ve Dadrass Javan, F. (2019). Aerial multispectral imagery for plant disease detection: Radiometric calibration necessity assessment. *European Journal of Remote Sensing*, 52, (sup3), 17-31.
- Poutanen, K. S., Kårlund, A. O., Gómez-Gallego, C., Johansson, D. P., Scheers, N. M., Marklinder, I. M., Eriksen, A. K., Silventoinen, P. C., Nordlund, E., Sozer, N., Hanhineva, K. J., Kolehmainen, M. and Landberg, R. (2022). Grains - A major source of sustainable protein for health. *Nutrition Reviews*, 80, (6), 1648-1663. DOI: 10.1093/nutrit/nuab084.
- Sangeetha, C., Moond, V., Rajesh, G. M., Damor, J. S., Pandey, S. K., Kumar, P. and Singh, B. (2024). Remote sensing and geographic information systems for precision agriculture: A review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14, (2), 287-309. DOI: 10.9734/ijec/2024/v14i23945.
- Shanmugapriya, P., Rathika, S., Ramesh, T. and Janaki, P. (2019). Applications of remote sensing in agriculture-A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8, (1), 2270-2283.
- Singh, S. and Singh, S. (2024). Types of remote sensing and sensor characteristics. *GIS & remote sensing: Recent trends and applications içinde* (s. 68-78). KD Publications.
- Tandle, S. S. and Pradhan, R. (2024). Remote sensing and satellite technology in agronomy. *Smart agronomy: Emerging technologies and sustainable practices içinde* (s. 375-411).
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2025). Bitkisel üretim istatistikleri, 2025. Ankara.
- Wójtowicz, A., Wójtowicz, M. and Piekarczyk, J. (2005). Zastosowanie teledetekcji do monitorowania i oceny produktywności plantacji rzepaku. *Rośliny Oleiste - Oilseed Crops*, 26, (1), 269-276.
- Yavaşlı, D. D. (2019). Uzaktan algılamada temel kavramlar. D. D. Yavaşlı ve M. K. Ölgün (Ed.), *Coğrafyada uzaktan algılama içinde* (s. 1-28). Kriter Yayınevi.

TARLA BİTKİLERİNDE BİYOSTİMULANTLARIN ROLÜ VE ÖNEMİ

Şebnem Kuşvuran*, Alpaslan Kuşvuran**

GİRİŞ

Küresel iklim değişikliğine bağlı olarak ortaya çıkan olumsuzluklar ve dünya genelinde devam eden hızlı nüfus artışı gıda ihtiyacının karşılanmasında önemli problemlere neden olmaktadır. Dünya nüfusunun 9 milyara çıkması ve gıda ürünlerine olan talebin 2050 yılına kadar %100-110 oranında artması beklenirken, bazı çalışmalar verim artışının bu hedefe ulaşmak için yetersiz olduğunu göstermektedir. Tarla bitkileri üretimi, küresel gıda güvenliği, hayvansal üretim, endüstriyel hammadde temini ve kırsal ekonomi açısından stratejik bir öneme sahiptir. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change-Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli) raporunda; küresel iklim değişikliğine bağlı olarak ortalama sıcaklıklarda 2 °C'lik bir artış olacağı, bunun da özellikle buğday, çeltik, mısır gibi tahılların veriminde azalmalara yol açacağı, ayrıca sıcaklık artışına bağlı olarak tahılların ürün kalitesinde de düşüşler görüleceği ifade edilmektedir. Bununla birlikte; toprak bozunumu, su kaynaklarının azalması, tuzluluk ve kuraklık gibi abiyotik stres faktörleri, besin noksanlığı ve girdi maliyetlerindeki artış, tarla bitkilerinde sürdürülebilir üretimi giderek zorlaştırmaktadır (Kuşvuran ve Kuşvuran 2021; Bhupenchandra vd., 2022; Di Sario vd., 2025).

Modern tarımda yüksek verim hedefine bağlı olarak yoğun kimyasal girdi kullanımı, toprak biyolojik aktivitesinin zayıflaması, besin kayıpları ile su ve çevre kirliliği üretim sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Bu doğrultuda çevre dostu tarımsal üretim sistemlerinin yaygınlaştırılarak bitkisel üretimde verim ve kalitenin artırılması büyük önem taşımaktadır. Diğer yandan, dünya genelinde tarımsal üretimde pestisit kullanımının 2023 yılında 3.73 milyon ton aktif madde düzeyine ulaştığı (FAO, 2025a),

* Prof. Dr., Çankırı Karatekin Üniversitesi, Gıda ve Tarım Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Çankırı, skusvuran@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1270-6962>

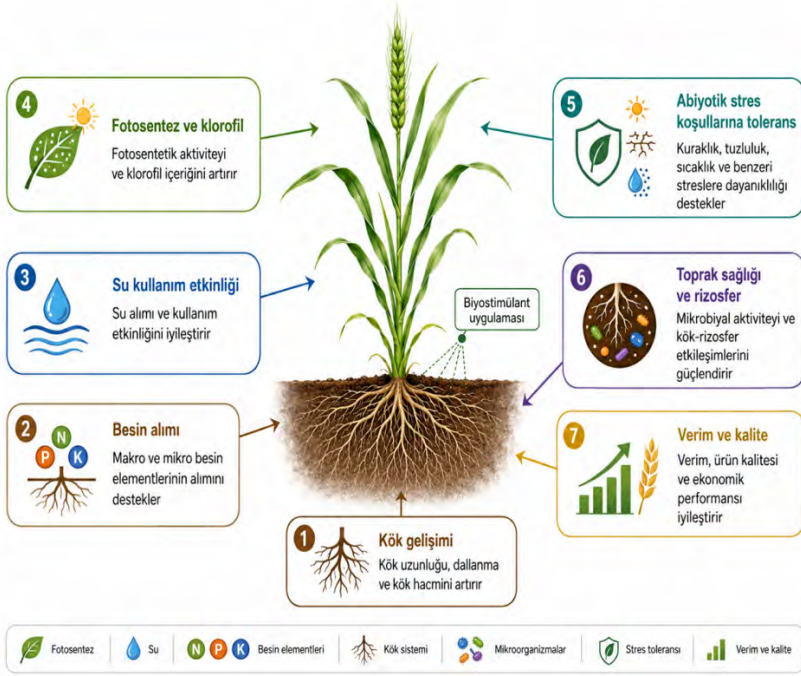
** Prof. Dr., Çankırı Karatekin Üniversitesi, Gıda ve Tarım Meslek Yüksekokulu, Park ve Bahçe Bitkileri Bölümü, Çankırı, akusvuran@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5252-6261>

inorganik gübre kullanımında ise azotlu gübrelerin 112 milyon ton, fosforlu gübrelerin 41 milyon ton ve potasyumlu gübrelerin 39 milyon ton düzeyinde gerçekleştiği dikkate alındığında (FAO, 2025b), bitkisel üretimde verim ve kaliteyi artırırken tarımsal uygulamaların çevresel etkilerini azaltacak sürdürülebilir yaklaşımlara duyulan ihtiyacın giderek arttığı görülmektedir. Dolayısıyla, bitkisel üretimde verim ve kaliteyi artırırken, tarımsal uygulamaların çevre üzerindeki olumsuz etkisini minimize edecek önlemlerin de alınması gerekmektedir (Del Buono, 2020; Mokrani vd., 2020; Garcia-Garcia vd., 2020; Mrid vd., 2021; Sible vd., 2021; Roche vd., 2024).

Biyostimülant kavramı, bitki büyümesini düşük dozlarda destekleyen doğal veya biyolojik kökenli maddeleri tanımlamak için kullanılmaya başlanmış, günümüzde ise daha işlevsel ve düzenleyici bir çerçeveye kavuşmuştur. Bitki biyostimülantları; bitkisel üretimde büyüme, gelişme ve stres toleransını destekleyen özel ürün gruplarını ifade etmek için yaygın biçimde kullanılan bir terimdir. Bununla birlikte, bu ürünleri tanımlamak için biyogübreler, bitki probiyotikleri, biyostimülatörler ve metabolik güçlendiriciler gibi farklı kategoriler de kullanılmaktadır. Biyostimülantların düzenleyici çerçevesi Avrupa Birliği'nde Regulation (EU) 2019/1009 ile tanımlanmış olup, bu düzenlemeye göre bitki biyostimülantları; ürünün besin elementi içeriğinden bağımsız olarak bitki beslenme süreçlerini uyararak, besin elementi kullanım etkinliğini, abiyotik stres toleransını, kalite özelliklerini veya toprak ve rizosferde sınırlı bulunan besin elementlerinin yararlanılabilirliğini artırmayı amaçlayan ürünler olarak tanımlanmaktadır (European Union, 2019).

Bu ürünler, bitkide kök gelişimi, fotosentez, besin elementi alımı, antioksidan savunma, hormonal düzenleme, ozmotik uyum, rizosfer mikrobiyolojisi ve kalite bileşenleri gibi süreçleri düzenleyerek tarla koşullarında verimin artırılmasında büyük öneme sahiptir (Rouphael ve Colla, 2020; Kuşvuran ve Kuşvuran, 2021; Sible vd., 2021; Ruzzi vd., 2024). Biyostimülantların tarla bitkilerindeki önemi özellikle abiyotik stres koşullarında daha fazla belirginleşmektedir. Kuraklık, tuzluluk, yüksek sıcaklık, düşük sıcaklık, su baskını, besin noksanlığı ve ağır metal toksisitesi gibi stresler bitkide fotosentezi, su durumunu, membran bütünlüğünü, iyon dengesini, kök ve generatif organların gelişimini sınırlar. Biyostimülantların bu stres koşullarında antioksidan savunmayı, osmoprotektan birikimini, hormonal sinyalleri, kök-rizosfer ilişkilerini ve

besin alım süreçlerini desteklediği rapor edilmiştir (Asif vd., 2023; Di Sario vd., 2025).



Şekil 1. Tarla bitkilerinde biyostimulantların etkisi

Biyostimülantların sınıflandırılması

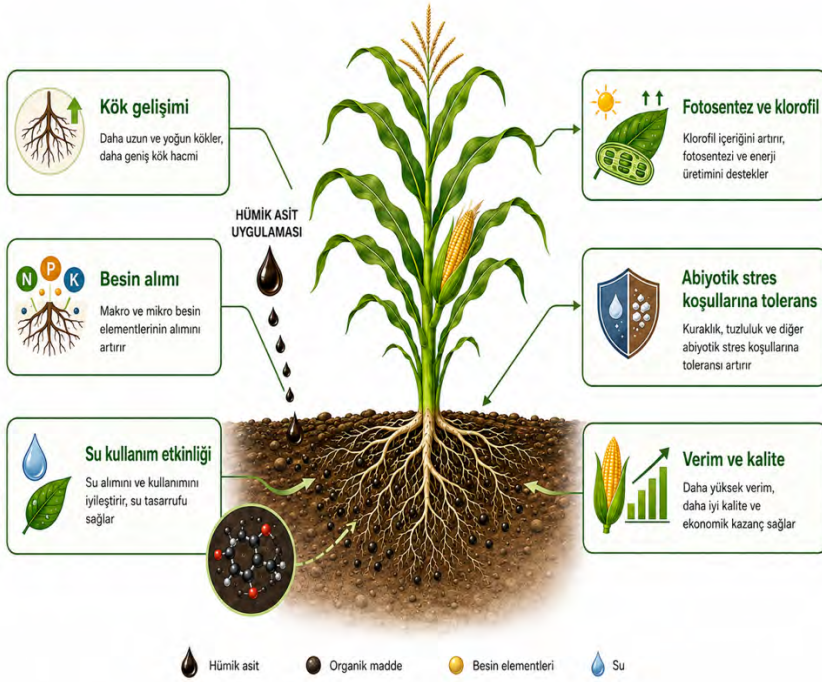
Biyostimülantlar genel olarak mikrobiyal olmayan ve mikrobiyal biyostimülantlar olmak üzere iki ana grupta değerlendirilmektedir. Mikrobiyal olmayan biyostimülantlar humik ve fulvik asitler, amino asitler ve protein hidrolizatları, deniz yosunu ekstraktları, mikroalg temelli ürünler, kitosan ve diğer biyopolimerler, silisyum ve selenyum gibi yararlı elementler, vermikompost ekstraktları ve nano-biyostimülantları kapsamaktadır. Mikrobiyal biyostimülantlar ise N-bağlayan faydalı bakteriler, fosfor ve potasyum çözücü mikroorganizmalar, arbusküler mikorizal funguslar, *Trichoderma* türleri ve mikrobiyal konsorsiyumlardan oluşmaktadır (Rouphael ve Colla, 2020; Sible vd., 2021; Ruzzi vd., 2024).



Şekil 2. Biyostimulantların sınıflandırılması

Hümik maddeler

Hümik ve fulvik asitler, organik maddenin ayrışması ve humifikasyonu sonucunda oluşan, bitki ve toprak süreçleri üzerinde çok yönlü etkilere sahip biyostimulantlardır. Hümik maddeler, moleküler ağırlıklarına ve çözünürlüklerine göre sınıflandırılan heterojen bileşikler olup; bazik ortamda çözünen hümik asitler, alkali ve asidik ortamda çözünen fulvik asitler ve topraktan çıkarılamayan hüminler olarak tanımlanmaktadır. Bu maddeler kök büyümesini, yan kök oluşumunu, membran geçirgenliğini, H^+ -ATPaz aktivitesini, besin taşınımını ve mikrobiyal aktiviteyi destekler. Tarla bitkilerinde özellikle kireçli, organik maddece zayıf, tuzluluk veya kuraklık riski taşıyan topraklarda hümik maddelerin etkisi daha belirgin hâle gelmektedir (González-Morales vd., 2021; Kuşvuran ve Kuşvuran, 2021; Akdağ vd., 2024; Canellas vd., 2024).



Şekil 3. Hümkik asit uygulamasının bitki gelişimi

Hümkik asit esaslı biyostimülanlar, yalnızca toprak strüktürünü destekleyen organik bileşikler olarak değerlendirilmemekte, aynı zamanda toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyileştirilmesine de katkı sağlayan çok yönlü materyaller olarak öne çıkmaktadır. Bu bileşikler, özellikle tuzlu koşullarda bitkilerin su dengesinin korunmasına yardımcı olmakta, hücre turgoru, su alımı ve ozmotik düzenleme süreçleri üzerinde etkili olabilmektedir (de Oliveira vd., 2016). Bu nedenle hümkik asitlerin, başta tuz stresi olmak üzere çeşitli çevresel stres koşulları altında bitki metabolizmasını destekleyen ve stres zararını hafifletebilen koruyucu biyostimülanlar arasında yer aldığı kabul edilmektedir. Hümkik asitler osmoprotektan birikimini, antioksidan enzim aktivitesini, iyon homeostazını, hormonal dengeyi ve stresle ilişkili gen yanıtlarını düzenleyerek bitkinin fizyolojik adaptasyonunu artırmaktadır. Mısır (*Zea mays* L.) ve sorgum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) da, hümkik asit priming uygulamalarının fotosentez, antioksidan savunma, osmotik üretimi, verim bileşenleri ve tane kalite özelliklerini iyileştirdiği bildirilmiştir (Canellas vd., 2024; Abu-Ria vd., 2025). Çeltik (*Oryza sativa* L.)’te hümkik asit uygulaması verim ve verim parametrelerini artırırken (Chaubey vd., 2025); buğday (*Triticum aestivum* L.)’da kuraklık stresi koşullarında hümkik asitin

topraktan uygulanması tane verimini %9.13 ve %13.86, biyolojik verimi %9.94 ve %5.19 oranında artırırken, yapraktan hümik asit uygulaması ise tane verimini %24.76 ve %25.19, biyolojik verimi ise %19.23 ve %6.50 oranında artırmıştır (Roy vd., 2025).

Amino asitler ve protein hidrolizatları

Amino asitler ve protein hidrolizatları, bitkisel, hayvansal veya algal protein kaynaklarının kimyasal ya da enzimatik hidroliziyle elde edilen serbest amino asitler, peptitler ve düşük molekül ağırlıklı organik azot bileşiklerinden oluşmaktadırlar. Bu ürünler azot metabolizması, protein sentezi, klorofil oluşumu, redoks dengesi, kök gelişimi ve stres toleransı üzerinde etkilidir. Küçük peptitler ve serbest amino asitler; sinyal molekülü, şelatlayıcı, antioksidan sistem düzenleyicisi ve stres yanıtı modülatörü olarak görev yaparken; prolin, glutamat, glutamin, triptofan, metiyonin ve fenilalanin gibi amino asitler ozmotik düzenleme, hormon öncüllüğü, fenolik bileşik sentezi ve savunma metabolizması açısından önemlidir (Sun vd., 2024). Amino asitler, bitkilerde metabolik faaliyetlerin düzenlenmesinde görev alan temel organik bileşikler olup, stres koşullarına karşı fizyolojik dayanıklılığın artırılmasında önemli rol oynayabilmektedir. Yüksek sıcaklık, düşük nem, don, böcek zararı, dolu zararı ve taşkın gibi ürün miktarı ve kalitesini olumsuz etkileyen çevresel faktörler, bitki metabolizmasında önemli bozulmalara neden olabilmektedir. Amino asit esaslı biyostimülant uygulamaları, bu tür stres koşullarında bitkinin metabolik dengesinin korunmasına, stres kaynaklı fizyolojik zararların azaltılmasına ve iyileşme süreçlerinin desteklenmesine katkı sağlamaktadır. Bu ürünlerin stres oluşmadan önce, stres sırasında veya stres sonrasında uygulanması; bitkide savunma mekanizmalarının uyarılması, metabolik aktivitenin sürdürülmesi ve stres sonrası toparlanmanın hızlandırılması bakımından önem taşımaktadır (Kuşvuran ve Kuşvuran, 2021). Kuşvuran vd. (2019) guar (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.)’da yapmış oldukları çalışmalarında, amino asit uygulamasının stres koşulları altında bitkinin morfolojik ve fizyolojik özellikleri üzerinde olumlu etki yaptığını ve stresin olumsuz etkisini 4 ila 8 kata kadar azalttığı sonucuna varmışlardır. Protein hidrolizatları, protein kökenli hammaddelerin kısmi hidrolizi sonucunda elde edilen serbest amino asitler, oligopeptitler ile polipeptitlerden oluşan önemli bir biyostimülant grubudur (Nephali vd., 2020). Düşük molekül ağırlıklı bileşenler içermeleri, bu ürünlerin bitki dokuları tarafından daha kolay alınmasına ve metabolik süreçlere daha hızlı dâhil olmasına olanak

sağlamaktadır. Bu nedenle protein hidrolizatları, bitki büyüme ve gelişmesini destekleyen, kök ve sürgün biyokütlesini artırabilen ve farklı bitki türlerinde verim ile kalite özelliklerini iyileştirebilen biyostimülantlar arasında değerlendirilmektedir.

Protein hidrolizatlarının bitkiler üzerindeki etkileri çok yönlüdür. Bu ürünler, mineral besin elementlerinin ve toprak suyunun alım etkinliğini artırmanın yanı sıra protein sentezi, fotosentetik aktivite, lignifikasyon, azot metabolizması ve abiyotik stres toleransı ile ilişkili çeşitli biyokimyasal süreçleri de destekleyebilmektedir. Ayrıca düşük molekül ağırlıklı peptitler ve amino asitler, demir (Fe), magnezyum (Mg) ve kalsiyum (Ca) gibi farklı katyonlarla kompleks veya şelat oluşturabilmekte, bu durum besin elementlerinin bitki tarafından alınabilirliğini ve taşınımını kolaylaştırabilmektedir. Protein hidrolizati uygulamalarının besin elementi alımını artırıcı etkisi birkaç temel mekanizma ile açıklanmaktadır. Bunlar arasında toprak mikrobiyal aktivitesinin ve enzimatik süreçlerin uyarılması, demir (Fe), çinko (Zn), mangan (Mn) ve bakır (Cu) gibi mikro elementlerin hareketliliği ile çözünürlüğünün artması, kök uzunluğu, kök yoğunluğu ve yan kök oluşumu gibi kök mimarisi özelliklerinin iyileşmesi ve nitrat redüktaz, glutamin sentetaz ile Fe (III)-şelat redüktaz gibi enzim aktivitelerinin artması yer almaktadır. Bu mekanizmalar birlikte değerlendirildiğinde, protein hidrolizatlarının yalnızca bitkiye organik azot sağlayan ürünler olmadığı, aynı zamanda rizosfer işlevlerini, kök gelişimini ve besin kullanım etkinliğini destekleyen kompleks biyostimülantlar olduğu görülmektedir. Protein hidrolizatları, içerdikleri spesifik peptitler ve triptofan gibi fitohormon biyosentezinde görev alan öncül bileşikler aracılığıyla bitkilerde hormonal dengeyi de etkileyebilmektedir. Bu ürünlerin bazı durumlarda oksin ve gibberellin benzeri aktiviteleri uyararak kök gelişimi, hücre uzaması, sürgün büyümesi ve genel bitki performansı üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu bildirilmektedir. Bu nedenle protein hidrolizatlarının biyostimülant etkisi, yalnızca besin alımı veya metabolik destekle sınırlı olmayıp, büyüme düzenleyici sinyal yollarının modülasyonu ile de ilişkilendirilmektedir. Protein hidrolizatları ve belirli amino asit uygulamaları, tuzluluk, kuraklık ve besin elementi noksanlığı gibi abiyotik stres koşullarında bitkisel kayıpların azaltılmasına da katkı sağlayabilmektedir. Bu ürünler, antioksidan savunma sistemini güçlendirerek, ozmotik düzenlemeyi destekleyerek ve stresle ilişkili metabolik süreçleri uyararak bitkilerin abiyotik streslere ve oksidatif zarara

karşı toleransını artırabilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle protein hidrolizatları, sürdürülebilir bitkisel üretimde hem besin kullanım etkinliğini artıran hem de stres koşullarında fizyolojik dayanıklılığı destekleyen önemli biyostimülant gruplarından biri olarak öne çıkmaktadır (Colla vd., 2014, 2015; Lucini vd., 2015; Kuşvuran ve Kuşvuran, 2021; Sun vd., 2024; Dhanasekaran vd., 2025)

Deniz yosunu ekstraktları

Deniz yosunu ekstraktları, biyostimülant olarak en yaygın kullanılan mikrobiyal olmayan ürünlerden biri olup günümüzde başlıca yeşil algler, kırmızı algler ve kahverengi algler olmak üzere on beş binden fazla türe sahiptir. Bu ekstraktlar; polisakkaritler, oligosakkaritler, betainler, fenolik bileşikler, vitaminler, mineral elementler ve fitohormon benzeri maddeler, enzimler ve çeşitli biyoaktif bileşikler bakımından zengin yapılarıyla dikkat çekmektedir (Ali vd., 2021; Dhanasekaran vd., 2025; Rabbi vd., 2025). Deniz yosunu ekstraktları, bitki gelişimini destekleyen doğal biyostimülantlar arasında yer almakta ve uygulama sonrasında çevresel kirlilik oluşturmamaları nedeniyle özellikle entegre ve organik tarım sistemlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Güncel araştırmalar, deniz yosunu ekstraktlarının kök farklılaşmasını teşvik edebildiğini, ürün verimini ve stres toleransını artırabildiğini, besin kullanım etkinliği ile fotosentetik aktiviteyi iyileştirebildiğini ve bitkilerin hastalık ve zararlılara karşı dayanıklılığını destekleyebildiğini göstermektedir. Dünyada ticari biyostimülant üretiminde en yaygın değerlendirilen deniz yosunu grubu kahverengi alglerdir. *Ascophyllum nodosum*, *Sargassum*, *Laminaria*, *Turbinaria* ve *Fucus* gibi kahverengi alg türlerinden elde edilen ekstraktlar; bitkilerde besin elementi alımının desteklenmesi, verim artışı, tohum çimlenmesinin hızlanması ve ürün kalitesinin iyileştirilmesi gibi çok yönlü avantajlar sağlayabilmektedir (Sharma vd., 2014). Özellikle *Ascophyllum nodosum* kökenli ürünler, deniz yosunu ekstraktlarının tarımsal kullanımında önemli bir yere sahiptir. Algler ve alg ekstraktları, içerdikleri organik asitler aracılığıyla toprakta bulunan metal iyonlarıyla kompleks bileşikler oluşturabilmekte, bu yüksek molekül ağırlıklı kompleksler su tutma kapasitesini artırarak toprağın daha uzun süre nemli kalmasına katkı sağlayabilmektedir. Toprak neminin korunması ve fiziksel yapının desteklenmesi, toprak havalanmasını iyileştirmekte, buna bağlı olarak toprak mikroorganizmalarının aktivitesi, gözenek yapısı ve kök gelişimi olumlu yönde etkilenebilmektedir. Bu nedenle deniz yosunu ekstraktlarının etkisi yalnızca bitki bünyesindeki fizyolojik süreçlerle

sınırlı olmayıp, toprak-kök-rizosfer etkileşimlerini de kapsayan daha geniş bir mekanizma çerçevesinde değerlendirilmelidir. Kahverengi deniz yosunu ekstraktlarının kimyasal bileşimi ve fizyolojik etkileri, bitki büyümesini teşvik eden çok yönlü mekanizmalarla ilişkilidir. Bu ekstraktlarda bulunan polisakkaritler, organik asitler, fenolik bileşikler, hormon benzeri maddeler ve mineral bileşenler; bitkilerde kök gelişimi, fotosentetik aktivite, besin alımı ve stres yanıtlarının düzenlenmesine katkı sağlayabilmektedir. Özellikle tuzluluk, aşırı sıcaklıklar ve besin elementi noksanlığı gibi abiyotik stres koşulları altında, kahverengi alg ekstraktlarının bitkilerin tolerans mekanizmalarını desteklediği ve stres zararını azaltmaya yardımcı olduğu değerlendirilmektedir (Kusvuran ve Kusvuran, 2021). Deniz yosunu ekstraktlarıyla yapılan priming uygulamaları, abiyotik stres toleransının artırılması, ürün kalitesinin iyileştirilmesi ve verim bileşenlerinin desteklenmesi bakımından dikkat çekmektedir. *Sargassum muticum* kökenli deniz yosunu ekstraktlarının, nohut (*Cicer arietinum* L.)’ta tuz stresine duyarlılığı azaltıcı yönde etki ettiği, bu etkinin iyon dengesinin düzenlenmesi ve süperoksit dismutaz ile peroksidaz gibi antioksidan enzim aktivitelerinin artırılması yoluyla oksidatif zararın hafifletilmesiyle ilişkili olduğu belirtilmektedir. Ayrıca *Sargassum* ekstraktı uygulamalarının serin, treonin, prolin, aspartik asit ve histidin gibi bazı amino asitlerin birikimini artırarak bitkinin stres koşullarına uyum kapasitesini desteklediği görülmektedir. Benzer şekilde, *Grateloupia filicina* alginden elde edilen polisakkaritlerin tuz stresinin olumsuz etkilerini hafifletmek amacıyla kullanıldığı ve çeltik (*Oryza sativa* L.)’te çimlenme potansiyeli, vigor indeksi ve çeşitli büyüme parametreleri üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu bildirilmektedir. Bu bulgular, deniz yosunu kökenli ekstrakt ve polisakkaritlerin yalnızca büyümeyi teşvik eden biyostimülantlar olarak değil, aynı zamanda tuzluluk gibi abiyotik stres koşullarında fizyolojik dayanıklılığı artıran priming ajanları olarak da değerlendirilebileceğini göstermektedir (Elumalai vd., 2025). Çinko (Zn) ve manganez (Mn) içeren deniz yosunu ekstraktının, iki hafta boyunca düşük kök bölgesi sıcaklıklarına (12-14 °C) maruz kalan mısır (*Zea mays* L.)’da soğuğa toleransı iyileştirdiği, yapraklardaki nekrozu azalttığı ve kök uzunluğu ile yoğunluğunu artırdığı (Bradacova vd., 2016); kolza (*Brassica napus* L.)’da bakır (Cu), demir (Fe) ve çinko (Zn) gibi mikro besin elementlerinin taşıyıcılarını kodlayan genlerin ekspresyonunu uyardığı saptanmıştır (Billard vd., 2014). Uygulama yöntemi ve çevresel koşullar, deniz yosunu temelli biyostimülantların etkinliğinde belirleyici rol oynamaktadır. Buğdayda substrat

uygulamalarının tohum kaplamaya kıyasla daha etkili sonuçlar verebildiği; ayçiçeği gibi bazı türlerde, kritik gelişme dönemlerinde yapılan yapraktan uygulamaların daha avantajlı olduğu, nitekim %0,6 oranında *Gracilaria* ekstraktının uygun fenolojik dönemlerde yapraktan uygulanmasının, bu tür bitkilerde büyüme ve verim performansını destekleyebilen etkili bir uygulama stratejisi olduğu rapor edilmiştir (Hasbullah vd., 2026).

Mikroalg ve siyanobakteri temelli biyostimülantlar

Mikroalg ve siyanobakteri temelli biyostimülantlar, sürdürülebilir tarım ve döngüsel ekonomi açısından yeni nesil kaynaklar arasında yer almaktadır. *Chlorella*, *Spirulina/Arthrospira*, *Scenedesmus*, *Dunaliella* ve *Tetradesmus* gibi mikroalgler; proteinler, amino asitler, pigmentler, vitaminler, polisakkaritler, yağ asitleri ve fitohormon benzeri metabolitler bakımından zengindir (Chabili vd., 2024).

Mikroalgler; siyanobakteriler gibi prokaryotik fotosentetik organizmaların yanı sıra yeşil algler, öglenoidler, diatomeler ve diğer ökaryotik alg gruplarını içeren, farklı sucul ve karasal ortamlarda bulunabilen geniş bir fotosentetik mikroorganizma grubudur. Denizler ve tatlı su ekosistemlerinde gelişebilen bu organizmalar, primer üreticiler olarak sucul ekosistemlerin trofik yapısında temel bir role sahiptir (Barsanti ve Gualtieri, 2018; Kuşvuran ve Kuşvuran, 2021). Tarımsal açıdan mikroalgler, içerdikleri besin elementleri ve biyoaktif bileşikler nedeniyle bitki büyümesi, gelişmesi ve ürün performansının desteklenmesinde potansiyel kaynaklar olarak değerlendirilmektedir. Bunun yanında mikroalgler; biyokontrol ajanı, toprak düzenleyici, biyogübre, biyostimülant ve biyopestisit olarak kullanılabilme potansiyeline de sahiptir (Alvarez vd., 2021; Ferreira vd., 2021; Martini vd., 2021). Bununla birlikte, mikroalglerin tarımsal kullanımı bazı alanlarda henüz yaygınlaşmamıştır. Bu durumun başlıca nedenlerinden biri, mikroalg biyokütlesinin üretim maliyetinin görece yüksek olması ve bu nedenle bazı üretim sistemlerinde ekonomik uygulanabilirliğin sınırlı kalmasıdır (Borowitzka, 2013; Hultberg vd., 2013). Buna rağmen, mikroalg kökenli biyostimülantlara ilişkin güncel araştırmalar, bu ürünlerin tarımsal uygulamalarda alternatif ve sürdürülebilir girdiler olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Mikroalg bileşenlerinin yalnızca bitki büyümesini ve besin alımını desteklemekle kalmadığı, aynı zamanda bitkilerin abiyotik ve biyotik streslere karşı dayanıklılığını da artırabildiği bildirilmektedir (Stadnik ve Freitas, 2014).

Mikroalg biyokütlesi, düşük düzeylerde de olsa azot (N), fosfor (P), potasyum (K) ve kalsiyum (Ca) gibi bitki besin elementlerini içermekte; bunun yanında birincil metabolizma ürünleri olarak oksinler, sitokininler, betainler, amino asitler, vitaminler, poliaminler (spermin ve spermidin) ve polisakkaritler gibi bitki gelişimini teşvik eden bileşikler bakımından da zenginlik göstermektedir. Bu bileşikler arasında özellikle polisakkaritlerin fiziksel ve besinsel kalite parametrelerini iyileştirerek uyarıcı etki gösterebildiği bildirilmektedir (Ronga vd., 2019). Ayrıca mikroalglerin ikincil metabolizmasından kaynaklanan fitohormon benzeri bileşikler de bitki büyümesi ve gelişmesi üzerinde biyostimülant etki oluşturabilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle mikroalgler, bitkisel üretimde verim ve kaliteyi desteklemek, biyokütle üretimini artırmak, besin alımını iyileştirmek ve kuraklık, tuzluluk ya da çevresel kirlilik gibi stres faktörlerine karşı toleransı güçlendirmek amacıyla kullanılabilecek değerli biyolojik kaynaklar arasında yer almaktadır (Kuşvuran ve Kuşvuran, 2021). *Chlorella vulgaris* ekstraktlarının farklı konsantrasyonlarda uygulanması, şeker pancarında (*Beta vulgaris* L.) çimlenme sürecinin homojenliğini artırarak çimlenme performansını iyileştirmiştir. Bu durum, dünya şeker üretiminde önemli bir yere sahip olan şeker pancarı için mikroalg temelli biyostimülantların dikkate değer bir potansiyel taşıdığını göstermektedir (Puglisi vd., 2020). Benzer şekilde, *Chlorella sorokiniana* ekstraktının çeltik (*Oryza sativa* L.) tohumlarında çimlenmeyi sırasıyla 1 ve 2 gün hızlandırdığı bildirilmiştir. Bu etkinin, söz konusu mikroalg türünün fitohormon benzeri bileşik üretme kapasitesiyle ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. Stres koşullarına karşı dayanıklılık bakımından ise halotolerant mikroalg *Dunaliella salina* ekstraktının, NaCl kaynaklı tuz stresi altında buğdayda (*Triticum aestivum* L.) çimlenme oranını ve fide gelişimini artırdığı belirlenmiştir. Özellikle ekzopolisakkarit uygulamalarının tohum çimlenme oranını %96'ya kadar artırdığı, kök sistemi gelişimi ve fide boyunda ise %100'ün üzerinde artış sağlayabildiği bildirilmektedir (El Arroussi vd., 2015). Mikroalg uygulamalarının tuzluluk stresine karşı koruyucu etkileri farklı bitkilerde de gözlenmiştir. Guar bitkisine [*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.] yapraktan *Chlorella vulgaris* uygulanması, tuzluluk koşullarında bitkinin dayanıklılığını artırmış, sürgün uzunluğu, bitki ağırlığı, yaprak sayısı ve fotosentetik pigmentlerde artış sağlamıştır. Ayrıca bu uygulama fenol, flavonoid, K⁺ ve Ca²⁺ düzeylerinde en az %30'luk artışa; askorbat peroksidaz, katalaz, glutatyon redüktaz ve süperoksit dismutaz gibi antioksidan enzim aktivitelerinde ise en az %63'lük yükselişe yol açmıştır.

Bu bulgular, mikroalg temelli biyostimülanların bitkilerde hem büyüme ve beslenme süreçlerini destekleyebildiğini hem de oksidatif stresin hafifletilmesine katkı sağlayarak stres toleransını artırabildiğini ortaya koymaktadır (Kusvuran ve Can, 2020). Mısır (*Zea mays* L.)’da *Chlorella sorokiniana* uygulamasının tohum çimlenmesi üzerindeki etkisi incelenmiş, çimlenme, kök boyutu ve bitki gelişimi üzerinde genel olarak olumlu bir etkiye sahip olduğu (Bonifácio da Silva Marques vd., 2023), arpa (*Hordeum vulgare* L.)’da mikroalg uygulamalarının tuz stresi koşullarında bitki besin alımını artırarak büyüme ve gelişmede artış meydana geldiği ve tuza tolerans düzeyinin arttığı ifade edilmiştir (El-Akhdar vd., 2026).

Kitosan

Kitosan, toksik olmaması, biyolojik olarak parçalanabilir yapısı ve biyoyoumluluğu gibi özellikleri nedeniyle bitki büyümesi ve verimliliğinin artırılmasında geleneksel gübre ve pestisitlere alternatif olabilecek etkili ve sürdürülebilir bir biyostimülant olarak giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Picos-Corrales vd., 2023). Kitinden türetilen doğal kökenli bir biyopolimer olan kitosan, kitinin deasetilasyonu sonucunda elde edilmekte ve β -(1→4) bağlarıyla birbirine bağlanmış D-glukozamin ile N-asetil-D-glukozamin birimlerinden oluşmaktadır (Kritchenkov vd., 2017). Kitosanın biyostimülant etkinliği, büyük ölçüde fiziksel ve kimyasal özellikleriyle ilişkilidir. Özellikle molekül ağırlığı, deasetilasyon derecesi, çözünürlük, viskozite ve yapısal özellikler, bitki dokularıyla etkileşimini ve fizyolojik yanıt oluşturma kapasitesini belirleyen başlıca faktörler arasında yer almaktadır (Riseh vd., 2026). Bu özellikleri nedeniyle kitosan ve türevleri; antimikrobiyal ve antioksidan ajanlar, ilaç taşıma sistemleri, gen terapisi, gıda teknolojisi, biyonanoteknoloji, rejeneratif uygulamalar, atık su arıtımı ve elektrolit materyalleri gibi çok farklı alanlarda değerlendirilebilmektedir. Ayrıca kâğıt üretimi, kozmetik, absorpsiyon artırıcı sistemler, fotoğrafçılık, ahşap endüstrisi, çevre koruma, tarım, obezite tedavisi, kataliz araştırmaları, immünoterapi, geçirgenlik artırıcı uygulamalar, enerji üretimi ve hücre immobilizasyonu gibi çeşitli endüstriyel ve biyoteknolojik alanlarda da kullanım potansiyeline sahiptir (Alamdari vd., 2022).

Kitosan temelli biyostimülanlar, toprak sağlığını ve bitki gelişimini destekleme potansiyelleri nedeniyle son yıllarda giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu ürünler yapraktan püskürtme, tohum uygulaması, toprak

uygulamasý ve sulama suyu ile uygulama gibi farklı yöntemlerle bitkilere veya rizosfere verilebilmektedir. Yapraktan uygulama, kitosan kullanımýnda en yaygın yöntemlerden biridir. Bu yöntemde kitosan çözeltisi bitki yapraklarına püskürtülerek besin elementlerinin ve diğér yararlı bileşiklerin alým etkinliđinin artırılması hedeflenmektedir. Tohum uygulamasýnda ise ekim öncesinde tohumların kitosan çözeltisiyle kaplanması veya muamele edilmesi, çimlenme sonrası erken fide gelişimini destekleyebilmektedir. Toprak direnç uygulamasý ve sulama yoluyla uygulamalarda kitosan çözeltisi doğrudan kök bölgesine verilmekte, böylece toprak sađlığı, rizosfer aktivitesi ve besin elementi yarıyışlılıđı üzerinde olumlu etkiler oluşturulabilmektedir (Maliki vd., 2022; Riseh vd., 2026).

Kitosan temelli biyostimülanların en yaygın etkileri; tohum çimlenmesi ve fide tesisi, bitki büyümesinin teşvik edilmesi, stres toleransının artırılması, besin alým etkinliđinin iyileştirilmesi, hastalık ve zararlı baskısının azaltılması ile sonuçta ürün verimi ve kalitesinin desteklenmesi şeklinde özetlenebilir. Bu özellikleri nedeniyle kitosan bazlı biyostimülanlar, farklı tarla ve bahçe bitkilerinde uygulanabilen çok yönlü, çevre dostu ve sürdürülebilir biyostimülan grupları arasında değérlendirilmektedir (Riseh vd., 2026).

Kitosan ve oligosakkaritleri, azot ve karbon metabolizmasýnda görev alan çeşitli enzimlerin aktivitelerini artırarak fotosentetik etkinliđi desteklemekte, ayrıca fotosentetik sistemin ışık ve karanlık reaksiyonları üzerinde düzenleyici etkiler oluşturarak fotosentez kapasitesinin iyileşmesine katkı sağlamaktadır. Bu bileşikler, temel fotokimyasal süreçleri modüle ederek fotosentetik mekanizmanın uyarılmasýnda rol oynayabilmekte, stomatal düzenlemeyi etkileyerek gaz alışverişini destekleyebilmekte, karanlık reaksiyonlarda karbon fiksasyon etkinliđini artırabilmekte ve çeşitli metabolitlerin sentezini teşvik etmektedirler. Bunun yanı sıra kitosan ve türevleri, sekonder metabolit biyosentezini ve bazı enzim aktivitelerini artırarak bitkide fizyolojik aktivitenin güçlenmesine katkı sağlamaktadır (Alamdari vd., 2022).



Şekil 4. Kitosan uygulamalarının en önemli etkileri (Kuşvuran ve Kuşvuran, 2021)

Bitkisel üretim açısından kitosanın en dikkat çekici özelliklerinden birisi, savunma yanıtlarını uyarabilmesidir. Kitosan uygulamaları, patogeneze ilişkili bazı savunma genlerinin, özellikle kitinaz ve glukanaz gibi enzimleri kodlayan genlerin aktivasyonunu teşvik edebilmektedir. Ayrıca süperoksit dismutaz (SOD), peroksidaz (POD) ve katalaz (CAT) gibi reaktif oksijen türlerini temizleyen antioksidan enzimlerin aktivitesini artırarak oksidatif stresin azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir. Bunun yanında kitosan, kök uç bölgesinde oksin birikimini artırarak kök uzamasını ve kök gelişimini destekleyebilmekte; bu yönüyle hem stres toleransı hem de bitki büyümesi açısından önemli bir biyostimülant bileşeni olarak değerlendirilmektedir (Sun vd., 2023).

Mısır (*Zea mays* L.)’da kuraklık ve tuzluluk stresi koşullarında kitosan uygulamalarının katalaz (CAT), askorbat peroksidaz (APX) ve süperoksit dismutaz (SOD) gibi antioksidan enzimlerin aktiviteleri ile prolin birikimini artırdığı, buna bağlı olarak bitki büyüme ve gelişmesi ile verimde olumlu etkiler meydana getirdiği bildirilmiştir (Rabêlo vd., 2019; Agbodjato vd., 2022). Buğday (*Triticum aestivum* L.)’da kitosan temelli biyostimülant uygulamaları hem genel büyüme performansının iyileştirmiş

hem de kuraklık gibi abiyotik streslere karşı toleransın artırılması bakımından etkin bulunmuştur (Saleh vd., 2023). Benzer şekilde, kitosanın tohum uygulaması şeklinde kullanılması çimlenme oranını yükseltmiş, fide çıkışının daha homojen gerçekleşmesine ve erken dönem fide gelişiminin güçlenmesine olanak sağlamıştır (Maliki vd., 2022). Kitosanın diğer biyostimülanlar veya biyoaktif bileşiklerle birlikte kullanımı, farklı bitkilerde stres toleransı ve fizyolojik açısından önemli sonuçlar ortaya koymuştur.

Şeker pancarı (*Beta vulgaris* L.)’nda kitosan ve hümik asidin birlikte yaprakтан uygulanması, kuraklık stresi altında stomatal performansın iyileştirilmesine, antioksidan savunma sisteminin güçlendirilmesine, verim unsurlarının desteklenmesine ve şeker kalitesinin korunmasına katkı sağlamış (Makhlouf vd., 2022), tütünde ise kitosan-harpin nanopartiküllerinin toprak düzenleyici olarak uygulanması, patogeneze ilişkili proteinlerin birikimini artırarak daha uzun süreli savunma aktivasyonu sağlamakta ve sürdürülebilir salınım özelliği sayesinde bitkinin savunma yanıtlarının desteklendiği ifade edilmiştir (Kongala ve Praveen, 2023).

Mikrobiyal Biyostimülanlar

Bu grupta yer alan biyostimülan ürünlerde en yaygın kullanılan mikroorganizmalar; patojenik ve toksijenik özellik göstermeyen *Azotobacter* spp., *Rhizobium* spp. ve *Azospirillum* spp. gibi yararlı bakteriler ile farklı mikorizal fungus türleridir.

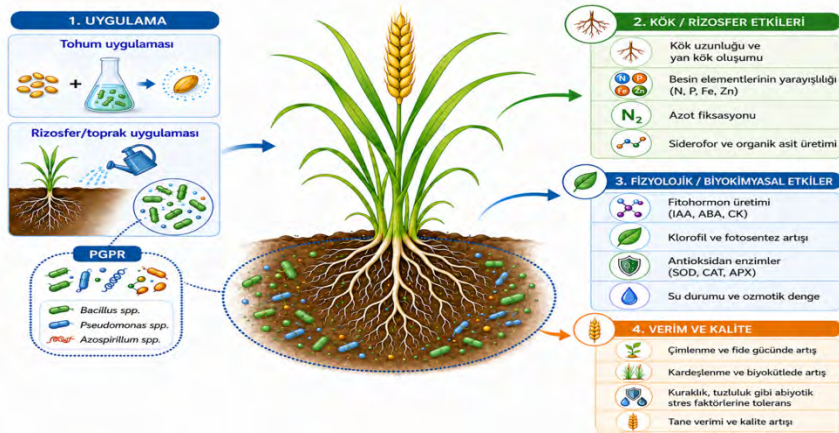
Bitki gelişimini teşvik eden rizobakteriler (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria, PGPR), bitki kök bölgesinde kolonize olarak kök-rizosfer etkileşimlerini düzenleyen ve bitki gelişimini farklı mekanizmalarla destekleyen yararlı mikroorganizmalardır. *Bacillus*, *Serratia*, *Arthrobacter*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Enterobacter*, *Ochrobactrum*, *Acinetobacter*, *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Streptomyces* ve *Stenotrophomonas* gibi bitki gelişimini teşvik eden bakteri cinsleri, düşük maliyetli ve çevre dostu tarımsal girdiler olarak değerlendirilmektedir. Bu mikrobiyom temelli biyostimülanlar, mineral elementlerin çözündürülmesi, azot fiksasyonu, fitohormon üretimi, sekonder metabolit sentezi, enzim salgılanması ve uçucu organik/inorganik bileşiklerin oluşturulması gibi çok yönlü mekanizmalarla bitki gelişimini desteklemektedirler. Bitki gelişimini teşvik eden bakteriler, Zn, P ve K gibi mineral elementlerin çözünürlüğünü artırarak besin elementlerinin bitki

tarafından alınabilirliğini iyileştirebilmekte; bunun yanında atmosferik azotun biyolojik olarak fiks edilmesine de katkı sağlamakta, ayrıca indol-3-asetik asit (IAA), absisik asit (ABA), etilen (ET), sitokinin (CK) ve jasmonik asit (JA) gibi fitohormonların üretimi yoluyla kök ve sürgün gelişimi, stres yanıtları ve bitki metabolizması üzerinde düzenleyici etkiler oluşturmaktadır. Mikrobiyal temelli biyostimülantların önemli bir diğer özelliği, bitkilerin biyotik ve abiyotik streslere karşı toleransını artırabilmeleridir. Bu etki; antioksidan savunma sistemiyle ilişkili genlerin aktivasyonu, fenolik bileşiklerin, savunma enzimlerinin, amino asitlerin ve organik asitlerin üretiminin desteklenmesi yoluyla gerçekleşebilmektedir. Böylece mikrobiyal biyostimülantlar yalnızca bitki büyümesini teşvik eden girdiler olarak değil, aynı zamanda stres yönetimi, besin kullanım etkinliği, rizosfer sağlığı ve sürdürülebilir üretim açısından çok işlevli biyolojik araçlar olarak değerlendirilmektedir (Kuşvuran ve Kuşvuran, 2021; Kaushal vd., 2023). Koskey vd. (2018) stres koşulları altındaki buğday (*Triticum aestivum* L.)’da *Azospirillum*, *Streptomyces*, *Bacillus*, *Trichoderma*, *Pseudomonas* ve *Rhizophagus irregularis* mikrobiyal bakteri uygulamalarının fosfor ve azot eksikliği olan alanlarda kimyasal gübrelerle kıyasla daha etkili olduğunu bildirmişlerdir. Kamran vd. (2017), şeker kamışı (*Saccharum officinarum*) ve buğday (*Triticum aestivum* L.)’dan izole edilen ve Zn (çinko) çözündürmede etkin oldukları belirlenen *Enterobacter cloacae*, *Pseudomonas fragi*, *Pantoea* sp. gibi PGPR’lerin, mineral madde eksikliği olan toprak koşullarında yetiştirilen buğdayda Zn (çinko) eksikliğini en aza indirmek için çok iyi bir potansiyele sahip olduklarını ifade etmişlerdir. Nitekim Zhao vd. (2018) rizobakteriyel bazlı biyostimülanların, tuz stresi altında buğdayda besin alımını artırabilen ve bitki büyümesini teşvik edebilen, kullanımı oldukça kolay agro-ekolojik araçlar olduğunu tespit etmişlerdir. Kusvuran vd. (2021) *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens* ve *Bacillus megaterium* bakteri türlerinin guar (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.)’da kuraklık stresine etkisini araştırdıkları çalışmalarında; bakteri uygulamalarının bitkilerin kuraklık stresine toleransını artırdığı ve her üç bakteri ırkının da incelenen özellikler bakımından değişen oranlarda (%71, %159 ve %169) etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Arpa (*Hordeum vulgare* L.)’da, *Bacillus subtilis* uygulaması ile bitki büyümesi ve verimde artış meydana gelmiş, fotosentetik etkinlik, antioksidan enzim aktiviteleri ve mineral madde alımı üzerinde olumlu etkiler oluşturmuştur (Zhu vd., 2023). Soya (*Glycine max* L.)’da, farklı

tohum uygulamalarının çimlenme ve erken fide gelişimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiş; çimlenme oranı, fide vigor indeksi, kök uzunluğu, taze sürgün ağırlığı, taze kök ağırlığı, kuru sürgün ağırlığı ve kuru kök ağırlığı gibi erken gelişim parametrelerini önemli ölçüde iyileştirdiği rapor edilmiştir (Marinković vd., 2025). Mısır (*Zea mays* L.)’da kuraklık stresi koşullarında bakteri uygulamalarının etkilerini incelenmiş, sonuçlar antioksidan aktivitelerin, özellikle askorbat peroksidaz ve katalazın, %20-40 oranında artarak oksidatif stresin daha etkili bir şekilde hafifletildiğini göstermiştir (Melo vd., 2026).

Mikorizalar, funguslar ile bitki kökleri arasında kurulan simbiyotik ilişkiler olup, fungusun taksonomik konumu ve konukçu bitki türüne bağlı olarak farklı formlarda gelişebilmektedir. Mikoriza tiplerinin dağılımı üzerinde iklim ve toprak koşulları ile konukçu bitkinin yayılışı belirleyici faktörler arasında yer almaktadır. Mikorizal birliktelikler, bitkilerde mineral madde alım etkinliğini önemli ölçüde artırabilmekte ve genel olarak endotrofik ve ektotrofik mikorizalar olmak üzere iki ana grupta değerlendirilmektedir.



Şekil 5. Bakteriyel biyostimülant uygulamalarının başlıca etkileri.

Arbusküler mikorizal funguslar (AMF), bitkiler üzerindeki olumlu etkileri; köklerin su ve besin elementlerine erişimini artırmaları, mineral beslenmeyi desteklemeleri, kök-rizosfer ilişkilerini güçlendirmeleri ve stres koşullarında bitki fizyolojisini düzenlemeleriyle ilişkilidir. Özellikle oksidatif stresin hafifletilmesi, su alımının hızlandırılması, besin elementi absorpsiyonunun artırılması ve stres yanıtı ya da sinyal yollarıyla ilişkili genlerin ifade düzeylerinde meydana gelen değişikliklerle açıklanmaktadır. Bu mekanizmalar sayesinde AMF uygulamaları,

kuraklık, tuzluluk ve besin noksanlığı gibi abiyotik stres koşullarında bitkilerin dayanıklılığını artırabilmektedir. Bununla birlikte AMF etkinliği; çevresel faktörler, toprak özellikleri, konukçu bitki türü, mevcut mikrobiyal topluluklar ve gübreleme düzeyi gibi değişkenlerden önemli ölçüde etkilenmektedir (Sun and Shahrajabian, 2023). Mısırdaki mikoriza uygulamaları, bitki boyu, kök boğazı çapı ve kuru kök biyokütlesini kontrole oranla %48-64 oranında artırmış, tane veriminde %65.28, kuru toprak üstü biyokütlede %51.26 ve kuru kök biyokütlesinde %136.36 oranında artış sağlanmıştır (Agbodjato vd., 2022).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Sınırlı doğal kaynaklar, artan çevresel baskılar ve iklim değişikliğine bağlı stres koşulları dikkate alındığında, tarla bitkilerinde sürdürülebilir üretim sistemlerinin geliştirilmesi giderek daha kritik hâle gelmektedir. Bu doğrultuda biyostimülantlar; verim ve kalite, besin kullanım etkinliği, toprak sağlığı ve iklim değişikliğine uyum açısından önemli potansiyel taşıyan tamamlayıcı tarımsal girdiler olarak öne çıkmaktadır. Bu ürünlerin etkisi, klasik gübrelerde olduğu gibi doğrudan besin sağlamaktan çok, bitkinin doğal fizyolojik süreçlerini, kök gelişimini, kök-rizosfer etkileşimlerini, besin alım mekanizmalarını ve stres yanıtlarını desteklemeye dayanmaktadır (Sible vd., 2021; Ruzzi vd., 2024). Bu yönüyle biyostimülantlar, sentetik gübreler ve diğer tarımsal kimyasalları tamamen ikame eden ürünler olmaktan ziyade, mevcut üretim sistemlerini daha verimli, dayanıklı ve çevre dostu hâle getirebilecek destekleyici girdiler olarak değerlendirilmelidir.

Biyostimülantların en önemli kullanım alanlarından biri, abiyotik stres koşullarında verim ve kalite kayıplarının azaltılmasıdır. Kuraklık, tuzluluk, yüksek sıcaklık, besin noksanlığı ve diğer çevresel stres faktörleri altında hümitik asitlerin fotosentez ve antioksidan savunmayı desteklemesi, PGPR'lerin stres etilenini azaltarak kök gelişimini sürdürmesi, AMF'nin fosfor ve su alımını artırması, deniz yosunu ve mikroalg ekstraktlarının ise osmoprotektan birikimi ile antioksidan sistemlere katkı sağlaması, biyostimülantların stres toleransındaki çok yönlü etkilerini ortaya koymaktadır (Kaushal vd., 2023; Chabili vd., 2024; Abu-Ria vd., 2025). Tahıllarda kök gelişimi, kardeşlenme, tane dolumu ve verim stabilitesi; baklagillerde nodülasyon, fosfor alımı ve protein üretimi; yem bitkilerinde biçim sonrası yeniden büyüme ve yem kalitesi; endüstri bitkilerinde ise yağ, lif, şeker, nişasta ve teknolojik kalite bileşenleri temel değerlendirme

ölçütleri arasında yer almalıdır (Akdağ vd., 2024; Ocwa vd., 2024; Sellami vd., 2025).

Bununla birlikte, biyostimülantların tarımsal üretimdeki kullanımını sınırlayan bazı önemli belirsizlikler bulunmaktadır. Ürünlerin bileşimindeki farklılıklar, hammaddenin kaynağı, üretim ve ekstraksiyon yöntemleri, formülasyon özellikleri, uygulama dozu, bitki türü, gelişme dönemi, çevre koşulları ve farklı ürün grupları için ortak uygulama protokollerinin eksikliği, saha sonuçlarında tutarsızlıklara neden olabilmektedir. Bu durum, biyostimülantların etki mekanizmalarının; morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal ve hormonal düzeylerde daha ayrıntılı biçimde açıklanması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Bu kapsamda transkriptom analizleri, biyostimülant uygulamalarına bağlı gen ekspresyon profillerinin geniş ölçekte incelenmesine olanak sağlayarak bitkilerde hedeflenen fizyolojik yollar, aktive olan sinyal ağları ve olası reseptör mekanizmalarına yönelik çalışmalar ile moleküler yaklaşımlar, yeni ticari biyostimülant formülasyonlarının sınıflandırılması, etki mekanizmalarının doğrulanması ve etkinliklerinin bilimsel temelde değerlendirilmesi açısından önemli araçlar olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- Abu-Ria, M.E., Shukry, W.M., Abo-Hamed, S.A., Ibraheem, F. and Elghareeb, E.M. (2025). Differential physiological responses of Zea mays and Sorghum bicolor to drought stress: Insights into the ameliorative role of humic acid at the reproductive and yield stages. *Journal of Plant Growth Regulation*, 44, 6061-6082.
- Agbodjato, N.A., Assogba, S.A., Babalola, O.O., Koda, A.D., Aguégué, R.M., Sina, H., Dagbénonbakin, G.D., Adjanohoun, A. and Baba-Moussa, L. (2022). Formulation of biostimulants based on arbuscular mycorrhizal fungi for maize growth and yield. *Frontiers in Agronomy*, 4, 894489.
- Akdağ, N., Sancak, C. and Kahramanoğulları, C.T. (2024). Biostimulants for sustainable agriculture in forage crops. *Soil Studies*, 13(2), 119–130.
- Alamdari, S., Mirzaee, O., Jahroodi, F.N., Tafreshi, M.J., Ghamsari, M.S., Shik, S.S., Ara, M.H.M., Lee, K.Y. and Park, H.H. (2022). Green synthesis of multifunctional ZnO/chitosan nanocomposite film using wild *Mentha pulegium* extract for packaging applications. *Surfaces and Interfaces*, 34, 102349.
- Ali, O., Ramsubhag, A. and Jayaraman, J. (2021). Biostimulant properties of seaweed extracts in plants: Implications towards sustainable crop production. *Plants*, 10(3), 531.
- Alvarez, A.L., Weyers, S.L., Goemann, H.M., Peyton, B.M. and Gardner, R.D. (2021). Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. *Algal Research*, 54, 102200.
- Asif, A., Ali, M., Qadir, M., Karthikeyan, R., Singh, Z., Khangura, R., Di Gioia, F. and Ahmed, Z. F. R. (2023). Enhancing crop resilience by harnessing the synergistic effects of biostimulants against abiotic stress. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1276117.
- Barsanti, L. and Gualtieri, P. (2018). Is exploitation of microalgae economically and energetically sustainable?. *Algal research*, 31, 107-115.
- Bhupenchandra, I., Chongtham, S.K., Devi, E.L., R.R., Choudhary, A.K., Salam, M.D., Sahoo, M.R., Bhutia, T.L., Devi, S.H., Thounaojam, A.S., Behera, C., Kumar, A., Dasgupta, M., Devi, Y.P., Singh, D., Bhagowati, S., Devi, C.P., Singh, H.R. and Khaba, C.I. (2022). Role of biostimulants in mitigating the effects of climate change on crop performance. *Frontiers in Plant Science*, 13, 967665.
- Billard, V., Ourry, A., Maillard, A., Garnica, M., Coquet, L., Jouenne, T., Cruz, F., Garcia-Mina, J.M., Yvin, J.C. and Etienne, P. (2014). Copper-deficiency in *Brassica napus* induces copper remobilization, molybdenum accumulation and modification of the expression of chloroplastic proteins. *PLoS ONE*, 9, e0109889.
- Bonifácio da Silva Marques, J., Troyner, J.S., Araújo, B., Machado, W. and Hiroshi Suguimoto, H. (2023). Chlorella sorokiniana as a biostimulator of maize seed germination. *Brazilian Journal of Agricultural Sciences/Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 18(2).
- Borowitzka, M.A. (2013). High-value products from microalgae—their development and commercialisation. *Journal of applied phycology*, 25(3), 743-756.
- Bradacova, K., Weber, N.F., Morad-Talab, N., Asim, M., Imran, M., Weinmann, M. and Neumann, G. (2016). Micronutrients (Zn/Mn), seaweed extracts, and plant growth-promoting bacteria as cold-stress protectants in maize. *Chem. Biol. Technol. Agric.*, 3, 1*10.
- Canellas, L.P., da Silva, R.M., Busato, J.G. and Olivares, F.L. (2024). Humic substances and plant abiotic stress adaptation. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 11, 66.
- Chabili, A., Minaoui, F., Hakkoum, Z., Douma, M., Meddich, A. and Loudiki, M. (2024). A comprehensive review of microalgae and cyanobacteria-based biostimulants for agriculture uses. *Plants*, 13(2), 159.

- Chaubey, C., Kumar, S., Dhyani, B.P., Kumar, M., Singh, S.P., Kumar, Y., and Shahi, U.P. (2025). Effect of Humic Acid and Nitrogen Levels on yield attributes and yield of Basmati Rice. *Ecology, Environment ve Conservation* (0971765X), 31, 159.
- Colla, G., Nardi, S., Cardarelli, M., Ertani, A., Lucini, L., Canaguier, R. and Roupshael, Y. (2015). Protein hydrolysates as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 28–38.
- Colla, G., Roupshael, Y., Canaguier, R., Svecova, E. and Cardarelli, M. (2014). Biostimulant action of a plant-derived protein hydrolysate produced through enzymatic hydrolysis. *Frontiers in Plant Science*, 5, 448.
- de Oliveira, F.A., de Medeiros, J.F., da Cunha, R.C., de Souza, M.W.L. and Lima, L.A. (2016). Uso de bioestimulante como agente amenizador do estresse salino na cultura do milho pipoca. *Rev. Ciência Agronômica*, 47, 307-315.
- Del Buono, D. (2020). Can biostimulants be used to mitigate the effect of anthropogenic climate change on agriculture? It is time to respond. *Sci. Total Environ.* 751, 141763.
- Dhanasekaran, P., Chittibabu, S., Mouzeyar, S., Boulaflous-Stevens, A., Delattre, C. and Roche, J. (2025). From waste to wonder: The potential of protein hydrolysates as plant biostimulants in agriculture. *Bioresource Technology Reports*, 32, 102333.
- Di Sario, L., Boeri, P., Matus, J.T. and Pizzio, G.A. (2025). Plant biostimulants to enhance abiotic stress resilience in crops. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(3), 1129.
- El Arroussi, H., Elbaouchi, A., Benhima, R., Bendaou, N., Smouni, A. and Wahby, I. (2015). Halophilic microalgae *Dunaliella salina* extracts improve seed germination and seedling growth of *Triticum aestivum* L. under salt stress. In *II World Congress on the Use of Biostimulants in Agriculture* 1148 (pp. 13-26).
- El-Akhdar, I., Elsakhawy, T. and Elakhdar, A. (2026). Defatted biomass of the green microalga *Chlorella* sp. as a sustainable biostimulant to enhance barley growth under saline conditions. *Scientific Reports*, 16(1), 15064.
- Elumalai, S., Alagarswamy, S., Janaki, P., Kuppusamy, S., Geethanjali, S. and Parasuraman, B. (2025). Exploring seaweed potential to enhance abiotic stress tolerance of crops. *Russian Journal of Plant Physiology*, 72(3), 86.
- European Union. (2019). Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products. Official Journal of the European Union, L 170, 1–114. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32019R1009> (E.T.: 15.06.2026).
- FAO. (2025a). Pesticides use and trade - 1990-2023. FAOSTAT Analytical Briefs, No. 109. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cd5968en> (E.T.: 15.06.2026).
- FAO. (2025b). Inorganic fertilizers – 2002-2023. FAOSTAT Analytical Briefs, No. 108. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cd5938en> (E.T.: 15.06.2026).
- Ferreira, A., Melkonyan, L., Carapinha, S., Ribeiro, B., Figueiredo, D., Avetisova, G. and Gouveia, L. (2021). Biostimulant and biopesticide potential of microalgae growing in piggy wastewater. *Environmental Advances*, 4, 100062.
- García-García, A.L., García-Machado, F.J., Borges, A.A., Morales-Sierra, S., Boto, A. and Jiménez-Arias, D. (2020). Pure organic active compounds against abiotic stress: A biostimulant overview. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1839.
- González-Morales, S., Solís-Gaona, S., Valdés-Caballero, M.V., Juárez-Maldonado, A., Loredotreviño, A. and Benavides-Mendoza, A. (2021). Transcriptomics of biostimulation of plants under abiotic stress. *Frontiers in Genetics*, 12.
- Hasbullah, D., Siregar, Z.A., Kusumawati, D., Garnawansah, G., Hamzah, B.H., Faridah, S. and Soetanti, E. (2026). Seaweed biostimulants in sustainable agriculture: A scientometric-

- systematic review of mechanisms, efficacy, and knowledge gaps. *SABRAO J. Breed. Genet.* 58(1) 453-462.
- Hultberg, M., Carlsson, A. S. and Gustafsson, S. (2013). Treatment of drainage solution from hydroponic greenhouse production with microalgae. *Bioresource technology*, 136, 401-406.
- Kamran, S., Shahid, I., Baig, D.N., Rizwan, M., Malik, K.A. and Mehnaz, S. (2017). Contribution of zinc solubilizing bacteria in growth promotion and zinc content of wheat. *Frontiers in Microbiology* 8: 2593.
- Kaushal, P., Ali, N., Saini, S., Pati, P. K. and Pati, A. M. (2023). Physiological and molecular insight of microbial biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1041413.
- Kongala, S.I. and Mamidala, P. (2023). Harpin-loaded chitosan nanoparticles induced defense responses in tobacco. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 5, 100293.
- Koskey, G., Mburu, S.W., Kimiti, J.M., Ombori, O., Maingi, J.M. and Njeru, E.M. (2018). Genetic characterization and diversity of Rhizobium isolated from root nodules of mid-altitude climbing bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Varieties. *Front. Microbiol.* 9: 968.
- Kritchenkov, A.S., Andranovič, S. and Skorik, Y.A. (2017). Chitosan and its derivatives: vectors in gene therapy. *Russian Chemical Reviews*, 86(3), 231-239.
- Kusvuran, A. and Can, A.G. (2020). Effects of microalga (*Chlorella vulgaris* Beijerinck) on seconder metabolites and antioxidative defense system improve plant growth and salt tolerance in guar [*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.]. *Legume Research*, 43(1), 56-60.
- Kusvuran, A., Dulger, I. and Kusvuran, S. (2021). Growth-promoting ability of Bacillus and Pseudomonas and their effect on induced tolerance in guar (*Cyamopsis tetragonoloba* [L.] Taub.) against drought stress. In: Demiroglu Topcu G, Seydosoglu S (Eds) *Sustainable Forage Production and Ecological Safety*, IKSAD Publishing House, Ankara, pp: 175-214.
- Kusvuran, A., Kaytez, I.A., Yilmaz, U. and Kusvuran, S. (2019). The effects of exogenous amino acid on growth, ionic homeostasis, biochemical composition and antioxidative activity of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.) seedlings. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(6), 15519-15530.
- Kuşvuran, A. ve Kuşvuran, Ş. (2021). Biyostimulantların abiyotik stres toleransı üzerindeki etkileri. *Sebzelerde Stres Toleransı ve Islah Stratejileri*. Editörler: Ellialtıoğlu, Ş.Ş., Daşgahn, H.Y., Kuşvuran, Ş. *Gece Kitaplığı*, pp: 430-466, Ankara.
- Lucini, L., Roupheal, Y., Cardarelli, M., Canaguier, R., Kumar, P. and Colla, G. (2015). The effect of a plant-derived biostimulant on metabolic profiling and crop performance of lettuce grown under saline conditions. *Scientia Horticulturae*, 182, 124-133.
- Makhlouf, B.S.I., Khalil, S.R.A.E. and Saady, H.S. (2022). Efficacy of humic acids and chitosan for enhancing yield and sugar quality of sugar beet under moderate and severe drought. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(2), 1676-1691.
- Maliki, S., Sharma, G., Kumar, A., Moral-Zamorano, M., Moradi, O., Baselga, J., Stadler, F.J. and García-Peñas, A. (2022). Chitosan as a tool for sustainable development: A mini review. *Polymers*, 14(7), 1475.
- Marinković, J., Miljković, D., Červenski, J., Vasiljević, M., Đorđević, V., Tamindžić, G. and Miladinović, J. (2025). Synergistic Effect of PGPR and Nutrient Complex on Soybean Seed Germination and Initial Seedling Growth. *Agriculture*, 15(19), 2022.
- Martini, F., Beghini, G., Zanin, L., Varanini, Z., Zamboni, A. and Ballottari, M. (2021). The potential use of Chlamydomonas reinhardtii and Chlorella sorokiniana as biostimulants on maize plants. *Algal research*, 60, 102515.
- Melo, J., Dias, T., Santos, A.M., Kamah, S., Castillo, S., Akdi, K. and Cruz, C. (2026). Microbial Biostimulants Improve Early Seedling Resilience to Water Stress. *Resources*, 15(2), 20.
- Mokrani, S., Nabti, E.H. and Cruz, C. (2020). Current advances in plant growth promoting bacteria alleviating salt stress for sustainable agriculture. *Applied Sciences*, 10(20), 7025.

- Mrid, R.B., Benmrid, B., Hafsa, J., Boukcim, H., Sobeh, M. and Yasri, A. (2021). Secondary metabolites as biostimulant and bioprotectant agents: A review. *Science of The Total Environment*, 146204.
- Nephali, L., Piater, L.A., Dubery, I.A., Patterson, V., Huyser, J., Burgess, K. and Tugizimana, F. (2020). Biostimulants for plant growth and mitigation of abiotic stresses: A metabolomics perspective. *Metabolites*, 10(12), 505.
- Ocwa, A., Mohammed, S., Mousavi, S. M. N., Illés, Á., Bojtor, C., Ragán, P., Ratonyi, T. and Harsányi, E. (2024). Maize grain yield and quality improvement through biostimulant application: a systematic review. *J. of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(2), 1609-1649.
- Picos-Corrales, L.A., Morales-Burgos, A.M., Ruelas-Leyva, J.P., Crini, G., García-Armenta, E., Jimenez-Lam, S.A., Ayon-Reyna, L.E., Rocho-Alonzo, F., Calderon-Zamora, L., Osuna-Martinez, U., Calderon-Castro, A., De-Paz-Arroyo, G. and Inzunza-Camacho, L.N. (2023). Chitosan as an outstanding polysaccharide improving health-commodities of humans and environmental protection. *Polymers*, 15(3), 526.
- Puglisi, I., Barone, V., Fragalà, F., Stevanato, P., Baglieri, A. and Vitale, A. (2020). Effect of microalgal extracts from *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus quadricauda* on germination of *Beta vulgaris* seeds. *Plants*, 9(6), 675.
- Rabhi, M.L., Ben Halima, N., Trabelsi, L. and Abdallah, F.B. (2025). Seaweed-derived biostimulants: Composition, mechanisms, applications and future perspectives. *Journal of Biotechnology*, 408, 201-216.
- Rabêlo, V.M., Magalhães, P.C., Bressanin, L.A., Carvalho, D.T., Reis, C.O.D., Karam, D., Dorigueto, A.C., dos Santos, M.H., dos Santos Santos Filho, R. and Souza, T.C.D. (2019). The foliar application of a mixture of semisynthetic chitosan derivatives induces tolerance to water deficit in maize, improving the antioxidant system and increasing photosynthesis and grain yield. *Scientific reports*, 9(1), 8164.
- Riseh, R.S., Vatankhah, M., Hassanisaadi, M. and Skorik, Y.A. (2026). Chitosan-based biostimulants for improving soil health, water and nutrient availability. *Science of The Total Environment*, 1013, 181305.
- Roche, D., Rickson, J.R. and Pawlett, M. (2024). Moving towards a mechanistic understanding of biostimulant impacts on soil properties and processes: A semi-systematic review. *Frontiers in Agronomy*, 6, 1271672.
- Ronga, D., Biazzi, E., Parati, K., Carminati, D., Carminati, E. and Tava, A. (2019). Microalgal biostimulants and biofertilisers in crop productions. *Agronomy* 9: 192.
- Rouphael, Y. and Colla, G. (2020). Editorial: Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, 40.
- Roy, D., Zakarya, M., Mondal, D., Bandhan, B., Bahadur, M., Islam, M., Gaber, A., Kabir, P., Hossain, A. ve Pramanik, S. (2025). Humic acid mediates drought tolerance in wheat through the modulation of morphophysiological traits, leading to improve the grain yield in wheat. *Phyton*, 94(3), 763.
- Ruzzi, M., Colla, G. and Rouphael, Y. (2024). Editorial: Biostimulants in agriculture II: Towards a sustainable future. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1427283.
- Saleh, A.M., El-Soud, W.M.A., Alotaibi, M.O., Beemster, G.T., Mohammed, A.E. and Abdelgawad, H. (2023). Chitosan nanoparticles support the impact of arbuscular mycorrhizae fungi on growth and sugar metabolism of wheat crop. *International Journal of Biological Macromolecules*, 235, 123806.
- Sellami, M.H., Di Mola, I. and Mori, M. (2025). Evaluating wheat response to biostimulants: A 25-year review of field-based research (2000–2024). *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1543981.

- Sharma, H.S.S., Fleming, C., Selby, C., Rao, J.R. and Martin, T. (2014). Plant biostimulants: A review on the processing of macroalgae and use of extracts for crop management to reduce abiotic and biotic stresses. *J. Appl. Phycol.*, 26, 465–490.
- Sible, C.N., Seebauer, J.R. and Below, F.E. (2021). Plant biostimulants: A categorical review, their implications for row crop production, and relation to soil health indicators. *Agronomy*, 11(7), 1297.
- Stadnik, M.J. and Freitas, M.B.D. (2014). Algal polysaccharides as source of plant resistance inducers. *Tropical Plant Pathology*, 39(2), 111-118.
- Sun, W., Shahrajabian, M.H., Kuang, Y. and Wang, N. (2024). Amino acids biostimulants and protein hydrolysates in agricultural sciences. *Plants*, 13(2), 210.
- Sun, W., Shahrajabian, M.H., Petropoulos, S.A. and Shahrajabian, N. (2023). Developing sustainable agriculture systems in medicinal and aromatic plant production by using chitosan and chitin-based biostimulants. *Plants*, 12(13), 2469.
- Sun, W. and Shahrajabian, M.H. (2023). The application of arbuscular mycorrhizal fungi as microbial biostimulant, sustainable approaches in modern agriculture. *Plants*, 12(17), 3101.
- Zhao, D., Zhao, H., Zhao, D., Zhu, X., Wang, Y., Duan, Y., Xuan, Y.H. and Chen, L. (2018). Isolation and identification of bacteria from rhizosphere soil and their effect on plant growth promotion and root-knot nematode disease. *Biol. Control*. 119: 12–19.
- Zhu, Y., Wang, L., Ma, J., Li, Y., Chen, F. and Peijnenburg, W. (2023). Comparative physiological and metabolomics analyses using Ag– NPs and HAS31 (PGPR) to alleviate Cr stress in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Environmental Pollution*, 333, 122010.

TIBBİ VE AROMATİK BİTKİLER TOHUMCULUĞU

Selma Devrim*, İsa Telci**

GİRİŞ

Bitkiler tarafından fotosentez ile üretilen organik maddeler dünyadaki tüm canlıların yegâne enerji kaynağıdır. Bitkilerin ürettiği bu organik bileşikler iki ana grup altında sınıflandırmaktadır. Bunlardan ilki yaşamsal öneme sahip birincil (primer metabolitler) diğeri daha çok biyoaktif özelliklerdeki ikincil (sekonder) metaloitlerdir. Bitkiler ve diğer canlılar için enerji kaynağı olan birincil metabolitlerin (karbonhidratlar, yağ asitleri ve amino asitler) ana kaynağı tahıllar, baklagiller, yağ bitkileri gibi kültür bitkileridir. Tıbbi ve aromatik bitkiler ise daha çok sekonder metabolitler sınıfındaki biyolojik aktif bileşikleri için üretilmektedir. Bu bitkilerde üretilen biyoaktif bileşikler ilaç, gıda, kozmetik, parfümeri, aromaterapi ve doğal sağlık ürünleri endüstrilerinin temel hammaddelerini oluşturmaktadır.

Tıbbi ve aromatik bitkilerin üretiminde verimle (herba tohum, meyve vd.) beraber hedeflenen biyoaktif bileşiklerin kompozisyonu ve miktarı ekonomik değerini belirleyen ana unsurlarıdır. Diğer bir ifadeyle tıbbi ve aromatik bitkilerin ekonomik değeri verimle beraber ürünün kalitesini belirleyen biyokatif sekonder bileşiklerin miktarına bağlı olarak şekillenir.

Bitkisel üretimde verim ve kalite bitkinin genetik yapısına, yetiştirildiği çevrenin iklim koşullarına ve yetiştiricilik uygulamalarına göre değişim göstermektedir. Özellikle bu grup bitkilerde verim ve kaliteyi belirleyen etkili maddeler (uçucu yağ, alkaloitler vd.) bitkinin genetik yapısı yanında çevresel koşullardan da önemli oranda etkilendiği bilinmektedir (Özgüven ve Kırıcı, 1999; Telci vd., 2011). Bu durumda tarımı yapılan bitkilerde sürdürülebilir üretim için uygun ekolojilerin belirlenmesi yanında üretim materyalinin (tohumluk) ıslah edilmiş çeşitlerle yapılmasını zorunlu kılar.

* Öğr. Gör. Dr., Düzce Üniversitesi, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Tıbbi ve Aromatik Bitkiler, Düzce, selmadevrim@duzce.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-1361-1241>

** Prof. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniv., Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri, Isparta, isatelci@isparta.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-3651-1641>

Son yıllarda doğal ürünlere yönelimin artması, tıbbi ve aromatik bitkilerin ekonomik önemini artırmakta üretim alanlarının genişlemesine neden olmaktadır. Doğadan aşırı ve kontrolsüz toplama, bitkilerin doğal popülasyonların azalmasına ve genetik kaynakların tehdit altına girmesine neden olmaktadır. Bu nedenle talebin fazla olduğu Tıbbi ve aromatik bitkilerde sürdürülebilir üretim için, genetik olarak saf ve üstün nitelikli çeşitlerin kullanılması önem taşımaktadır.

Tıbbi ve aromatik bitkilerin mevcut durumu

Tıbbi ve aromatik bitkiler (TAB), içerdiği sekonder metabolitler nedeniyle sağlık, gıda, kozmetik, parfümeri, tarım ve kimya sanayilerinde kullanılan, değerli tarımsal ürünler arasında yer almaktadır. Dünya genelinde doğal ürünlere olan talebin artması, bu bitkilerin ekonomik önemini son yıllarda daha da artırmaktadır. Özellikle doğal ürünlere yönelik tüketici tercihleri, TAB sektörünün küresel ölçekte hızlı bir büyümesine neden olmaktadır.

Günümüzde, WHO (2013) verilerine göre dünya nüfusunun önemli bir bölümünün geleneksel ve bitkisel tedavi yöntemlerinden yararlandığı anlaşılmaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde nüfusun büyük çoğunluğu (%80) tedavide bitkisel kaynaklı ürünlerden yararlandığı bilinmektedir. Bu durum, tıbbi bitkilerin sağlık başta olmak üzere pek çok sektörde stratejik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Günümüzde TAB ticaretinde Çin ve Hindistan üretim de ABD, İngiltere, Almanya, Fransa, Hollanda gibi ülkeler ise hem büyük alıcı hem büyük satıcı konumundadırlar. Küresel pazarda en çok kahve, susam, kırmızıbiber, sarımsak, karabiber, zencefil, yeşil çay ve vanilya gibi bitkilerin ticareti yapılmaktadır (Bayram vd., 2010).

Türkiye tıbbi ve aromatik bitki üretimi ve ticaretinde dünyada ilk 20 ülke içinde yer almaktadır (Yaldız vd., 2025). Özellikle kekik, kimyon ve defne başta olmak üzere anason, çörekotu, kişniş, rezene, gül, haşhaş, adaçayı ve çay gibi türlerde önde gelen üretici ülkedir. Ancak bu türlerden bazılarının doğadan toplanması doğal popülasyonları tehdit etmektedir. Defne, ıhlamur, biberiye, adaçayı, mahlep, meyan kökü ve ardıç ağırlıklı olarak doğadan toplanırken; kimyon, anason, kekik, çay, kişniş, rezene, nane ve çemenin tarımı yapılmaktadır. Bu bitkilerden defne, kekik ve siyah çayda Türkiye kış pazarda halen söz sahibi ülkelerdendir. Özellikle kekikte (*Origanum onites*) dünya ticaretinin neredeyse tamamına yakını Türkiye karşılamaktadır (Bayram vd.. 2010; Arslan vd. 2015).

Tıbbi ve aromatik bitkilerden elde edilen alkaloidler, uçucu yağlar, ekstraktlar, oleorezinler ve çeşitli biyolojik aktif bileşikler, küresel ticarete önemli bir paya sahiptir. Günümüzde ilaç sanayisinde kullanılan birçok etkin maddenin kökeni bitkisel kaynaklıdır. Bunların ticari önemi bakımından ilk sıralarda haşhaştan (*Papaver somniferum*) elde edilen morfin gelmektedir. Atropin (*Atropa belladonna*), digoksin (*Digitalis lanata*) ve paklitaksel (*Taxus spp.*) gibi önemli farmasötik bileşikler modern tıpta yaygın olarak kullanılan önemli biyokimyasallara verilecek örneklerdir. Ayrıca aromatik bitkilerden elde edilen uçucu yağlar, kozmetik, gıda, parfümeri temizlik ürünleri yanında biyopestisit olarak da değerlendirilme potansiyeli olan önemli bileşiklerdir.

Uçucu yağlar, tıbbi ve aromatik bitkilerin ekonomik açıdan en önemli sekonder metabolit gruplarından biridir. Çoğunlukla terpenler, terpenoidler ve çeşitli fenilpropanoit grubu aromatik bileşiklerden oluşmaktadır. Uçucu yağlar bitkinin türüne ve genetik yapısına bağlı olarak oldukça zengin kimyasal içeriğe sahiptirler.

Uçucu yağ sektöründeki küresel gelişim, tıbbi ve aromatik bitkilerin tarımsal ve ekonomik öneminin giderek arttığını göstermektedir. Baser ve Bonello (2025)'ya göre küresel uçucu yağ pazarının büyüklüğü 2023 yılında 23,74 milyar ABD doları olarak tahmin edilmiştir. Aynı çalışmada 2024–2030 döneminde pazarın yıllık bileşik büyüme oranının %7,6 tahmin edilmektedir.

Uçucu yağların küresel ticaretindeki dağılımı türlere göre farklılık göstermektedir. Baser ve Bonello (2025), portakal yağının (*citrus*) küresel pazarda ilk sırada yer aldığını ve toplam pazar payının yaklaşık %22'sini oluşturduğunu bildirmiştir. Portakal (*Citrus sinensis*), mentol nanesi (*Mentha arvensis*), okaliptüs (*Eucalyptus globulus*), limon (*Citrus limon*), lime (*Citrus aurantiifolia*), peppermint (*Mentha × piperita*), spearmint (*Mentha spicata*), geranium (*Pelargonium graveolens*), karanfil yaprağı (*Syzygium aromaticum*), citronella (*Cymbopogon winterianus*), yasemin (*Jasminum grandiflorum*), çay ağacı (*Melaleuca alternifolia*), biberiye (*Salvia rosmarinus*) ve lavanta (*Lavandula angustifolia*) yağları izlemektedir.

Türkiye'nin uçucu yağ potansiyeli

Türkiye, zengin florası, farklı iklim ve ekolojik koşulları ve çok sayıda tıbbi ve aromatik bitki türünün doğal yayılış alanı olması nedeniyle uçucu yağ bitkileri açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Özellikle

Lamiaceae, Apiaceae, Asteraceae ve Lauraceae familyalarına ait çok sayıda tür, uçucu yağ ve diğer biyoaktif bileşikler bakımından ekonomik önem taşımaktadır.

Lamiaceae familyasına ait kekik grubu Türkiye'nin uçucu yağ sektöründeki en güçlü ürün gruplarından biridir. Tarımsal veriler Türkiye'nin kekik üretimi ve ihracatında dünyada önemli bir yere sahip olduğu bilinmektedir. Kekiğin baharatın yanı sıra uçucu yağ, kekik suyu ve diğer katma değerli ürünler elde edilmesi nedeniyle önemli bir potansiyele sahip olduğu bilinmektedir.

Türkiye'de yürütülen ıslah çalışmalarında uçucu yağ oranı ve bileşiminin doğrudan seleksiyon kriteri olarak kullanılmaktadır. Yapılan ıslah çalışmalarıyla tescilli bazı kekik materyallerinde uçucu yağ oranlarının %5, karvakrol oranının ise %85 üzerinde değerlere ulaşılmıştır (Ceylan vd., 2011).

Türkiye'nin uçucu yağ üretimi büyük ölçüde gülyaağına dayanmaktadır. Burdur, Isparta, Afyon ve Denizli'de *Rosa damascena*'dan üretilen yağ dünyada "Türk Gülyaağı" olarak bilinmekte ve Türkiye en büyük gülyaağı üreticisi ülkelerinden biridir. Yılda yaklaşık 1,5 ton gülyaağı ve 7 ton a yakın konkret üretilmektedir (Bayram vd.,2010).

Tıbbi ve aromatik bitkilerde tohum ve tohumluk

Bitkisel üretim tür özeliğine bağılı olarak generatif ve vejetatif olarak iki ana yöntem ile yapılmaktadır. Tarımsal üretimde günlük dilde sıklıkla birbirinin yerine kullanılan "tohum" ve "tohumluk" terimleri, tıbbi ve aromatik bitkilerin (TAB) kültüre alınmasında birbirinden tamamen farklı biyolojik anlamlar taşımaktadır. Bu kavramlar incelenecek olduğunda; bitki çiçeklerinde dişi organının tozlanma ve döllenmesinden sonra meydana gelen, embriyosu ve yedek besin deposu bulunan generatif üreme organına **tohum**, bitkilerin generatif organları ile çelik, yumru, soğan, rizom, stolon gibi vejetatif organların tümüne birden **tohumluk** olarak isimlendirilir. Buna göre tohumluk kavramı tohumla üretimin yanı sıra vejetatif üretimi de kapsar. Yani tohumluk, tıbbi bitki yetiştiriciliğinin en önemli tarımsal girdisini bir anlamda temelini oluşturur. Özelliklerine göre tıbbi bitkilerin generatif ve/veya vejetatif organları tohumluk olarak kullanılabilir (Arslan vd., 2015).

Tıbbi aromatik bitkilerde generatif üretim (tohum) iki farklı yöntem ile yapılmaktadır. Bunlar kimyon, kişniş, rezene, çörekotu, anason, haşhaş,

keten, kenevir, ekinezya, datura, çemen, çay ve adaçayı gibi bitkilerin tohumlarının doğrudan tarlaya ekimi yapılmaktadır. Diğer yöntem olan fesleğen, güzel avratotu, kapari, kekik, oğulotu, papatya, tütün, yayla çayı, yüksükotu gibi bitkilerin tohumlardan elde edilen fidelerin tarlaya dikimi yapılmaktadır (Baydar, 2019). Tıbbi ve aromatik bitkilerin bazı türlerinde tescilli tohumluklar bulunsada daha çok doğal bitki populasyonları ve yerel (köy) çeşitler genetik çeşitlilik barındırmasından dolayı en önemli üretim kaynaklardır (Arslan vd., 2015).

Generatif üretim kaynağı olarak kullanılan tohumlukta bazı niteliklerin olması gerekmektedir. Bunlar fiziksel, biyolojik ve genetik olmak üzere üç başlık altında toplanmaktadır. Fiziksel nitelik tohumluk partisinin içinde bulunan saf tohum dışındaki diğer kültür bitkisi tohumları, yabancı ot tohumları, cansız yabancı maddeler ve hastalıklı tanelerin miktarıdır. Özellikle iyi bir tohumlukta kastedilen tohumluk safiyetinin yüksek olması istenmektedir. Biyolojik değeri ise tarlaya ekilen tohumun kaç bitki meydana getireceğini ve tohumların çimlenme ve sürme değerleri ile belirlenir. Fakat tohumlar iyi gelişmemişse çimlenme oranı düşer, sürme hızı azalır. Genetik değerini ise verim, kalite ile hastalıklara karşı dayanıklılığı belirler.

Tıbbi aromatik bitkilerin büyük bir çoğunluğunun üretim materyali olarak kullanılan vejetatif kısımları ile yapılan üretimde ise yağ gülü, şerbetçiotu, biberiye, çay, defne, adaçayı, lavanta, nane, sardunya, yasemin gibi sap, sürgün ve yaprak çeliklerinden köklendirilmesiyle yapılmaktadır. Ayrıca kök taç bölgesinden köklü olarak sürgünler (lavanta, adaçayı, gül, kekik, biberiye vb.), rizom ve stolon gibi toprak altı ve toprak üstü sürünücü gövdeler (zencefil, zerdeçal, kökboya, meyankökü, nane gibi) üretim materyali olarak kullanılmaktadır (Şekil 1.). Ayrıca geofitler ve soğanlı bitkilerde (salep, salep, nergis, sümbül, anomen, gölsoğanı, kardelen, lale, orkide, süsen, zambak vd.) soğan, korm, pul ve yumru gibi organlar bitki üretim materyalleridir (Baydar 2019).

Tıbbi ve aromatik bitkilere ait çeşitlerin yarıdan fazlası populasyonlardan, yerel çeşitlerden veya introduksiyon materyallerinden toplu, teksele veya klon seleksiyonu gibi basit seleksiyon yöntemleriyle elde edilmişlerdir. Özellikle Lamiaceae üyelerinde yaygın olarak klonal seleksiyon ıslahı ile birçok hat ve çeşit geliştirilebilmiştir (Arslan vd., 2015).



Şekil 1. Çörekotu (Tohum) ve Nane Bitkilerinde (Çelik) Üretim Materyali

Türkiye de kültürü yapılan ve doğadan toplanan bitkiler

Türkiye, sahip olduğu geniş biyolojik çeşitlilik ve farklı ekolojik kuşaklar sayesinde tıbbi ve aromatik bitkiler açısından oldukça zengin bir flora sahiptir (Boztaş vd., 2021; Yıldız vd., 2025). Tıbbi ve aromatik bitkilerin önemi ve endüstriyel kullanımları her geçen gün artmaktadır. Bu bitkilere olan ihtiyaç doğadan toplanarak veya tarımsal üretimi yapılarak karşılanmaktadır. Doğadan toplanan bitkilerin devamlı olarak doğadan bilinçsizce sökülmesi doğal vejetasyonun bozulmasına, nadir ve endemik bitki türlerinin yok olmasına neden olmaktadır (Özhatay ve Atay, 1997). Türkiye’de sınırlı sayıda tıbbi ve aromatik bitkilerin üretimi yapılmakta olup bu bitkilerin kültüre alınması önem arz etmektedir. Bununla birlikte doğa tahribatının önlenmesi, toplamaların kontrollü ve bilinçli bir şekilde yapılması ve en önemlisi bu bitkilerin kültüre alınması ile mümkündür (Bayram vd.,2010). İlgili tabloda da açıkça görüldüğü üzere, ülkemizde ekonomik değere sahip tıbbi bitkilerin tedarik süreci iki ana koldan ilerlemektedir (Tablo 1).

Tablo1. Türkiye de Kültürü Yapılan ve Doğadan Toplanan Bazı Tıbbi ve Aromatik Bitkiler

Kültürü yapılan bitkiler	Doğadan toplanan bitkiler
Çay yaprakları	Keçiboynuzu, baharatlar vb. toplamı
Haşhaş (Kapsül)	Defne yaprağı işlenmemiş
Kekik	Kekik, işlenmemiş (<i>Thymus</i> sp)
Kimyon	Keçiboynuzu meyvesi
Sarımsak (Kuru)	Mersin yaprağı
Biber (Kuru)	Adaçayı (<i>Salvia</i> sp.)
Anason	Reçine
Çörek Otu	Teknik hammadde (Sığıla yağı ve Reçine) toplamı

Lavanta	Laden (<i>Cistus</i> sp.)
Gül (Yağlık)	Kuşdili bitkisi (biberiye)
Keçiboynuzu	İhlamur çiçeği ve yaprağı
Adaçayı	Erika (funda-kök)
Nane	Orman gülü
Çemen	Eğrelti otu (<i>Dryopteris</i>)
Rezene	Isırgan otu (<i>Urtica</i> sp.)
Süpürge Otu	Çalba (<i>Ballota cristata</i> , <i>B. saxatilis</i>)
Kişniş	Ökse otu
Şerbetçi Otu	Lavanta (<i>Lavandula stoechas</i>)
Oğul otu	Oğul otu (melisa)
Salep	Sarmaşık (<i>Hedera</i>)
Kapari	Sığla Yağı
Kudret narı	
Isırgan otu	

Türkiye’de kültürü yapılan bitkiler arasında haşhaş, kimyon, kekik, anason, çörek otu, gül (Yağlık), nane, kırmızı biber, rezene, haşhaş, çörek otu ve çemen gibi bitkiler bulunmaktadır. Bunların yanında defne yaprağı, ihlamur, sığla yağı ve laden gibi türler halen doğadan toplanarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte kekik, lavanta, adaçayı, ısırgan otu ve oğul otu (melisa) gibi hem doğadan toplanan hem de kültürü yapılan türler de mevcuttur. Tıbbi ve aromatik bitkilerin büyük bir bölümü hâlâ doğal ortamından toplanarak değerlendirildiğinden, bu materyalin genetik özellikleri belirsiz ve değişkendir; söz konusu belirsizlik istenilen verim ve kalitenin elde edilmesini zorlaştırmakta, pazarda standartlaşmayı engellemekte ve ekonomik kayıplara yol açmaktadır (Yaldız vd., 2025). Artan küresel talep ve fitoterapi alanındaki gelişmeler göz önüne alındığında, tıbbi bitkilerin doğadan toplanması yerine planlı bir şekilde kültüre alınması çok boyutlu bir zorunluluk haline gelmiştir. Günümüzde desteklemeler sonucunda Anadolu adaçayı, papatya, nane, defne, devediken, biberiye, salep orkidesi, yaban mersini, sarı kantaron, kapari, lavanta, melisa, dağ çayı, ısırgan otu, çarkıfelek çiçeği, kuşburnu, altın otu, tarhun, kekik ve civanperçemi gibi bitkiler tarımsal üretim alanlarında yetiştirilmeye başlanmıştır. Bunların yansısı kekik, defne yaprağı, anason ve kimyon gibi bitkilerde dünya ticaretinde söz sahibi ülkeler arasında yer almaktadır. Bunlardan defne ticaretinde Türkiye önemli bir yere sahip olup “gerçek defne yaprağı Türkiye’den gelir” ifadesi ile vurgulanmaktadır (Bayram vd., 2010).

Bundan dolayı son yıllarda mevcut durumu korumak ve bu artan pazarda yer almak için piyasanın ürünleri, istediği miktar ve kalite standartlarında sunmamız gerekmektedir. Ancak bu durum tıbbi ve aromatik bitkileri doğadan toplama yöntemiyle yapılması mümkün

değildir. Dünya pazarları ve ilaç sanayii etken madde miktarı ve kalitesi yüksek ve bu yönleriyle “standart” ürün talep etmektedir. Günümüzde yeterli miktarda standart ve kaliteli ürün temini doğal bitkilerin toplanmasıyla mümkün olamamakta, bu bitkilerin düzenli olarak kültürü, seleksiyon ve ıslah çalışmalarıyla istenilen niteliklere ulaştırılması gerekmektedir.

Tıbbi ve aromatik bitkilerde ıslah edilmiş çeşitler

Günümüzde hızlı bir şekilde doğal ürünlere yönelimin artması ile birlikte tıbbi ve aromatik bitkilerden elde edilen önemli maddelerin miktarının ve kalite kriterlerinin artırılması önemlidir. Bu nedenle, sektörün ihtiyaç duyduğu yüksek verim ve kalite özelliklerine sahip, standart çeşitlerin geliştirilmesi ve üretiminin yaygınlaştırılması büyük önem taşımaktadır. Tıbbi ve aromatik bitkilerin zengin genetik çeşitliliği bitki ıslahçıları için avantaj sağlamaktadır. Türkiye’de tıbbi ve aromatik bitki ıslahı, Kamu Araştırma Enstitüleri, Toprak Mahsülleri Ofisi, özel sektör ve üniversiteler öncülüğünde sınırlı sayıda tür üzerinde yürütülmektedir. Doğal popülasyonlar ve yerel çeşitlerdeki bu geniş genetik varyasyon, basit seleksiyon yöntemleri ile bile kısa sürede istenen özelliklere sahip yeni çeşitlerin geliştirilmesine olasıdır (Yaldız vd., 2025). Tıbbi ve aromatik bitkilerde ıslah çalışmalarında, diğer kültür bitkilerinde olduğu gibi seleksiyon, melezleme, mutasyon ve poliploidi gibi geleneksel ıslah yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler sayesinde istenilen özelliklere sahip yeni çeşitler elde edilmeye çalışılmaktadır (Kırıcı vd. 2020).

Tablo 2. Türkiye’de Tescil Edilmiş Tıbbi ve Aromatik Bitkilere Ait Çeşit Listesi*

Tescil tarihi	Çeşit Adı	Tür adı	Latince ismi
2014	Birlik 124	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Birlik 128	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
2017	Ege Özbaş	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Kerimoğlu	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Çiftçi	Çemen	<i>Trigonella foenum graecum</i> L.
	Dino	Fesleğen (Tıbbi)	<i>Ocimum basilicum</i> L.
	Limoni	Fesleğen (Tıbbi)	<i>Ocimum basilicum</i> L.
	Morfes	Fesleğen (Tıbbi)	<i>Ocimum basilicum</i> L.
2018	Tınmaz	Kekik	<i>Origanum vulgare</i> L. subsp. <i>hirtum</i>
	Başer	Kekik	<i>Origanum vulgare</i> L. subsp. <i>hirtum</i>
	Timo	Kekik	<i>Thymus vulgaris</i> L.
	Mado Nazlı	Çayır Salebi	<i>Ranunculus ficaria</i> L.
	Sarı	Şevketibostan	<i>Scolymus hispanicus</i> L.
	Elif	Adaçayı	<i>Salvia officinalis</i> L.

	Gürbaşak	Dağ Çayı	<i>Sideritis perfoliata</i> Mill.
	Melis	Melisa (Oğulotu)	<i>Melissa officinalis</i> L.
	Tutar	Ekinezya	<i>Echinacea purpurea</i> L.
	Oğuz	Kekik	<i>Origanum onites</i> L.
	Karik	Adaçayı	<i>Salvia fruticosa</i> L.
2019	Turgut	Şekerotu	<i>Stevia rebaudiana</i>
	Tütüncü	Şekerotu	<i>Stevia rebaudiana</i>
	Canık	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Po1	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
2020	SAM 1	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Diyar 2017	Kapari	<i>Capparis ovata</i>
	Yeni 37	Anason	<i>Pimpinella anisum</i>
	Ege 53	Anason	<i>Pimpinella anisum</i>
	Altın 8	Anason	<i>Pimpinella anisum</i>
	TTL 201	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Nail	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	SAM 2	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Turgut82	Şekerotu	<i>Stevia rebaudiana</i>
	Güney04	Şekerotu	<i>Stevia rebaudiana</i>
	Levent93	Şekerotu	<i>Stevia rebaudiana</i>
	Tekin 2017	Kekik	<i>Origanum onites x Origanum syriacum</i> var. <i>Bevanii</i>
2021	Erasma	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Narlı	Kenevir	<i>Cannabis sativa</i> L.
	Vezir	Kenevir	<i>Cannabis sativa</i> L.
	Özgüven	Nane (Japon Nanesi)	<i>Mentha arvensis</i> L.
	OZE S1	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	OZE S2	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Karabey	Anason	<i>Pimpinella anisum</i>
	Yörük	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Zeybek	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Kınay	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	OZE B1	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Marem	Lavanta	<i>Lavandula</i> L.
	Felekabad	Lavanta	<i>Lavandula</i> L.
	Aslanca	Lavanta	<i>Lavandula</i> L.
2022	TTL 301	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	TTL 102	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	TTL 203	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Uysal	Adaçayı	<i>Salvia fruticosa</i> L.
	Turgut	Adaçayı	<i>Salvia fruticosa</i> L.
	Beyhekim	Adaçayı	<i>Salvia officinalis</i> L.
	Sancar Bey	Kişniş	<i>Coriandrum sativum</i> L.
2023	Talgar 23	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Uluğ Bey	Kekik	<i>Origanum vulgare</i> L. subsp. <i>hirtum</i>
	Arımar77	Kekik	<i>Origanum vulgare</i> L. subsp. <i>hirtum</i>
	Sultan	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Efe	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	ATC 55	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	EVKAF	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.

	EGE 23	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	ATC 60	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	EGE BRL	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	EGE VRG	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	TTL 103	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	TTL 302	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	OZE Z1	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Adido	Kimyon	<i>Cuminum cyminum</i> L.
2024	Doa	Biberiye	<i>Rosmarinus officinalis</i> L.
	Gülbaba	Biberiye	<i>Rosmarinus officinalis</i> L.
	Zerdecan	Zerdeçal	<i>Curcuma longa</i>
	Semanta	Zencefil	<i>Zingiber officinale</i> Roscoe
	Yusuf1941	Çörekotu	<i>Nigella sativa</i> L.
	Özkara	Çörekotu	<i>Nigella sativa</i> L.
	Günbaş	Çörekotu	<i>Nigella sativa</i> L.
	İlk Başak	Rezene	<i>Foeniculum vulgare</i> var. <i>dulce</i>
	Eslem 77	Biberiye	<i>Rosmarinus officinalis</i> L.
	Şeyda	Çivit Otu	<i>Isatis constricta</i> Davis
	Basma 2020	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Sarıbağlar 2020	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
2025	Koçum07	Kinoa	<i>Chenopodium quinoa</i>
	Koşar	Çörekotu	<i>Nigella sativa</i> L.
	Zerdesena	Zerdeçal	<i>Curcuma longa</i>
	Basma 2022	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Sarıkaya	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
2026	Balyumru	Aydın Salebi	(<i>Serapias vomeracea</i> (Burm.fill.) Brig.)
	Bolyumru	Muğla salebi	<i>Orchis sancta</i> L.
	Arzu Hanım	Haşhaş	<i>Papaver somniferum</i> L.
	Ferda hanım	Haşhaş	<i>Papaver somniferum</i> L.
	ETAE 2024	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Ateş mavisi	Mavi Çemen Otu	<i>Trigonella caerulea</i> (L.) Ser.
	TTL 105	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	TTL 107	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	TTL 109	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	TTL 402	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	ETA 1881	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	ETA 1923	Tütün	<i>Nicotiana tabacum</i> L.

*Yaldız vd., 2025; TTSM, 2026

Tıbbi ve aromatik bitkilerde 1996 yılı itibari ile Tohumluk Tescil ve Sertifikasyon Merkezi Müdürlüğü (TTSM) tarafında çeşit tescili başlamış olup yukarıda verilen tablo 2014-2026 yıllarını kapsamaktadır. 2026 yılı Tohumluk Tescil ve Sertifikasyon Merkezi Müdürlüğü (TTSM) tescilli çeşitler ve üretim izinli çeşitler listesinde 5 adet adaçayı, 4 adet anason, 1 adet Aydın Salebi, 3 adet biberiye, 1 adet çayır Salebi, 1 adet çemen, 1 adet çivit otu, 5 adet çörekotu, 1 adet dağ çayı, 1 adet ekinezya, 3 adet fesleğen (tıbbi), 8 adet haşhaş, 1 adet kapari, 7 adet kekik, 2 adet kenevir, 2 adet kimyon, 6 adet kinoa, 1 adet kişniş, 3 adet lavanta, 1 adet mavi çemen otu, 1 adet melisa (oğulotu), 1 adet muğla salebi, 1 adet nane (japon nanesi), 1

adet rezene, 1 adet safran, 5 adet şekerotu, 7 adet şerbetçiotu, 1 adet şevketibostan, 47 adet tütün, 1 adet zencefil, 2 adet zerdeçal çeşidi tescil edilmiştir (Yaldız vd., 2025; TTSM, 2026). Yukarıda da ifade edildiği gibi bu bitkilerin ıslahı, Kamu Araştırma Enstitüleri, Toprak Mahsülleri Ofisi, üniversiteler ve özel sektör öncülüğünde tescil işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Tıbbi ve aromatik bitkilerin diğer ıslah edilen bitki türleriyle karşılaştırılması

Tıbbi ve aromatik bitkiler, diğer kültür bitkilerine göre üretimi daha az alanlarda yapılması ile birlikte çok daha fazla sayıda kültüre alınmış veya alınma potansiyeli yüksek olan türleri barındırmaktadır. Bu türden bitkilerin büyük bir çoğunluğunun doğadan toplanması ve nihayetinde geç kültüre alınmış olmaları ıslah ve çeşit geliştirme çalışmalarını geciktirmiştir. Doğal bitki populasyonları ve yerel çeşitler, bitkilerin genetik çeşitliliğinin en zengin olduğu kaynaklardır. Bu kaynaklar, ıslah çalışmalarında yeni çeşitler geliştirmek için vazgeçilmez bir kaynaktır. TAB'daki tür sayısının fazlalığı nedeniyle her türe özgü ıslah yöntemi geliştirilmesinde; (1) üreme biyolojisi ile sekonder metabolit biyosentezinin yeterince aydınlatılmamış olması ve (2) biyoaktif madde içeriğinin morfogenetik, ontogenetik ve diurnal varyabilite göstermesi önemli sorunlar arasındadır (Baydar, 2019; Kırıcı vd., 2020). Ayrıca her türün özel genetik yapısına uygun ıslah programı kurmanın zaman alıcı ve maliyetli olması ile biyokimyasal profil analizlerin pahalı olması süreci yavaşlatmaktadır (Yaldız vd., 2025). Ayrıca değerli türlerin çoğunun hâlâ doğadan toplanıyor olması Türkiye'nin zengin biyoçeşitliliğini tehdit altına sokmakta, bu da yoğun biçimde toplanan türlerin kültüre alınmasını ve yetiştiriciliğinin yaygınlaştırılmasını zorunlu hale getirmektedir (Bayram vd., 2010; Turgut vd., 2023). İklim değişikliğine bağlı kuraklık ve sıcaklık artışı, bitkisel üretim deseninin değişmesine neden olacağından kurağa ve sıcağa dayanıklı bitkilerin seçimi ve marjinal alanları değerlendirme arayışı bazı tıbbi ve aromatik bitkileri ön plana çıkarmıştır. Bütün güçlüklerle rağmen populasyonlardaki geniş varyasyon ıslahçı için önemli bir kolaylıktır; basit seleksiyon yöntemleriyle bile görece kısa sürede çeşit düzeyine ulaşılabilir.

Tıbbi ve aromatik bitki tohumculuğunda başlıca sorunlar

Tıbbi ve aromatik bitki tohumculuğunda başlıca sorunları aşağıda sıralanmıştır.

- Tıbbi ve aromatik bitki tohumculuğunun en temel sorunu, standart, güvenilir ve sertifikalı genetik materyale (tohum, fide, çelik) erişimdeki büyük eksikliktir,
- Tescilli çeşit elde etmek yerine yerel populasyon veya doğadan toplanmış materyalle üretilmektedir. Bu durumun doğal populasyonlarda baskı oluşturmaktadır,
- Bazı türlerde kemotip varyasyon ıslah ve standart ürüne ulaşmayı zorlaştırmaktadır,
- Birçok tıbbi ve aromatik bitkinin yabancı tozlaşması ve çeşit saflığını koruyacak izolasyon mesafesinde yetiştirilmemesi sonraki generasyonda genetik açılımlara neden olmaktadır,
- Birçok tıbbi ve aromatik bitki tohumlarında dormansinin görülmesi,
- Bazı türlerde türler arası kolay melezleme ve tür karışıklığının fazla olması,
- Aynı bitkide tohumların farklı zamanlarda olgunlaşması nedeniyle tekdüze tohumluk elde edilme zorluğu,
- Tıbbi ve aromatik bitkilerde genelde tohumluk üretimi için yeterli mekanizasyonun olmaması,
- TAB üretimin genelde küçük aile işletmelerinde yapılması, özel sektörün ıslah ve tohumluk üretimine mesafeli yaklaşması,
- Yıllar arasındaki keskin fiyat dalgalanmaları,
- Üreticilerin bilgilendirilmesine yönelik yayım ve danışmanlık hizmetinin sınırlı olması önemli sorunlar arasında değerlendirilebilir.

Sonuç olarak, Türkiye'nin zengin tıbbi ve aromatik bitki genetik kaynaklarının ekonomik değere dönüştürülebilmesi için tohumculuk sektörünün temelini oluşturan nitelikli genetik materyal ve standart tohumluk üretim sisteminin güçlendirilmesi gerekmektedir. Gelecekte TAB tohumculuğunda başarı; yalnızca daha fazla tohum üretmekten ziyade, doğru tür ve çeşidin, genetik ve kimyasal özellikleri tanımlanmış, kalite kriterleri belirlenmiş ve izlenebilir üretim materyali olarak üreticiye ulaştırılmasına bağlı olacaktır. Bu nedenle Türkiye'de TAB türlerine özgü çeşit geliştirme, tohumluk üretimi, sertifikasyon, kalite kontrol, mekanizasyon ve pazarlama sistemlerinin beraber ele alınması; yerel genetik kaynakların korunması ve değerlendirilmesi ile özel sektörün ıslah ve tohumculuk faaliyetlerine daha etkin katılımının sağlanması, sürdürülebilir ve rekabetçi bir TAB tohumculuk sektörünün oluşturulmasının temel koşulları olarak değerlendirilmelidir.

KAYNAKÇA

- Arslan, N., Baydar, H., Kızıl, S., Karık, Ü., Şekeroğlu, N. ve Gümüşçü, A. (2015). Tıbbi aromatik bitkiler üretiminde değişimler ve yeni arayışlar. *Türkiye Ziraat Mühendisliği VIII. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı-I* içinde (s. 483-507). Ankara: TMMOB Ziraat Müh. Odası.
- Baser, K. H. C. ve Bonello, J. M. (2025). Global trade of essential oils. *Journal of Essential Oil Research*, 37(2), 208-214. DOI: 10.1080/10412905.2025.2470791.
- Baydar, H. (2019). *Tıbbi ve aromatik bitkiler bilimi ve teknolojisi*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- Bayram, E., Kırıcı, S., Tansı, S., Yılmaz, G., Arabacı, O., Kızıl, S. ve Telci, İ. (2010). Tıbbi ve aromatik bitkiler üretiminin artırılması olanakları. *Türkiye Ziraat Mühendisliği VII. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı-I* içinde (s. 437-457). Ankara: TMMOB Ziraat Müh. Odası.
- Boztaş, G., Avcı, A. B., Arabacı, O. ve Bayram, E. (2021). Tıbbi ve aromatik bitkilerin dünyadaki ve Türkiye'deki ekonomik durumu. *Theoretical and Applied Forestry*, 1(1), 27-33. DOI: 10.53463/tafor.2021vol1iss1pp27-33.
- Ceylan, A., Bayram, E. ve Geren, H. (1999). Investigation on agronomical and quality characteristics of improved clones in *Origanum onites* (L.) breeding. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 23 (11), 1163-1168.
- Kırıcı, S., Bayram, E., Tansı, S., Arabacı, O., Baydar, H., Telci, İ., İnanc, M., Kaya, D. A. ve Özel, A. (2020). Tıbbi ve aromatik bitkilerin üretiminde mevcut durum ve gelecek. *Türkiye Ziraat Mühendisliği IX. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı* içinde (s. 505-528). Ankara: TMMOB Ziraat Mühendisleri Odası.
- Özgüven, M. ve Kırıcı, S. (1999). Farklı ekolojilerde nane (*Mentha*) türlerinin verim ile uçucu yağ oran ve bileşenlerinin araştırılması. *Turkish Jou. of Agri. and Forestry*, 23(4), 465-472.
- Özhatay, N. ve Atay, S. (1997). Kekik in trade in Turkey. *Proceedings of the XI World Forestry Congress*, 13-22 October 1997, Antalya içinde (Cilt 3, s. 234-237).
- Telci, İ., Kacar, O., Bayram, E., Arabacı, O., Demirtaş, İ., Yılmaz, G., Özcan, İ., Sönmez, Ç. ve Göksu, E. (2011). The effect of ecological conditions on yield and quality traits of selected peppermint (*Mentha piperita* L.) clones. *Industrial Crops and Products*, 34, 1193-1197.
- Telci, İ. (2001). *Farklı nane (Mentha spp.) klonlarının bazı morfolojik, tarımsal ve teknolojik özelliklerinin belirlenmesi üzerinde bir araştırma* (Doktora tezi). Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- TTSM. (2026). *Tohumluk Tescil ve Sertifikasyon Merkez Müdürlüğü kayıt listeleri*. <https://www.tarimorman.gov.tr/BUGEM> (Erişim tarihi: 30/08/2026).
- Turgut, K., Baydar, H. ve Telci, İ. (2023). Cultivation and breeding of medicinal and aromatic plants in Turkey. Á. Máthé ve K. Turgut (Ed.), *Medicinal and aromatic plants of Turkey* içinde (s. 131-167). Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-031-43312-2_7.
- WHO. (2013). *WHO traditional medicine strategy 2014-2023*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241506096> (Erişim tarihi: 28.08.2026).
- Yaldız, G., Kaçar, O., Bahadır, N. P., Batı Ay, E., Çamlıca, M., Tunçtürk, M. ve Şekeroğlu, N. (2025). Tıbbi ve aromatik bitkilerin üretiminde mevcut durum ve sürdürülebilirlik. *Türkiye Ziraat Mühendisliği X. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı-I* içinde (s. 516-546). Ankara: TMMOB Ziraat Mühendisleri Odası.

ORGANİK TARIMDA MİKROORGANİZMALARIN ROLÜ VE ÖNEMİ

Sancar Bulut*, Melike Köse**

1. GİRİŞ

Geleneksel tarım uygulamalarında yoğun kimyasal gübre ve pestisit kullanımı, toprak sağlığının bozulması, su kaynaklarının kirlenmesi, biyoçeşitliliğin azalması ve ekosistemin zarar görmesi gibi çok boyutlu çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bu sorunlara karşı sürdürülebilir ve ekolojik bir alternatif olarak gelişen organik tarım, sentetik girdilerin kullanımını reddeden, toprak sağlığını ve biyolojik çeşitliliği merkeze alan bütüncül bir üretim sistemine dayanmaktadır.

Organik tarım sistemlerinin başarısının temelinde, toprak verimliliğini artıran, bitki büyümesini teşvik eden, hastalık ve zararlıları doğal yollarla baskılayan yararlı mikroorganizmalar kritik bir rol oynamaktadır. Bu derlemede, organik tarımda kullanılan başlıca mikroorganizma grupları - Bitki Büyümesini Teşvik Eden Rizobakteriler (PGPR), mikoriza mantarları, biyolojik azot fikse eden bakteriler ve biyokontrol ajanları - kapsamlı bir şekilde tanıtılmakta; bu mikroorganizmaların besin elementi alımını iyileştirme, fitohormon üretimi, biyolojik mücadele, abiyotik stres toleransını artırma ve toprak yapısını iyileştirme gibi çok yönlü işlevleri ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Ayrıca, biyogübre ve biyopestisitlerin kullanımı ile ilgili güncel yaklaşımlar, karşılaşılan zorluklar, Türkiye'deki yasal düzenlemeler ve gelecekteki bakış açıları tartışılmaktadır. Sonuç olarak, mikroorganizmaların sunduğu ekosistem döngüsünün organik tarımın sürdürülebilirliği açısından vazgeçilmez olduğu vurgulanmakta ve bu alandaki araştırma-geliştirme faaliyetlerinin artırılması gerektiği belirtilmektedir.

* Prof. Dr., Kayseri Üniversitesi, Safiye Çıkrıkçıoğlu Meslek Yüksekokulu Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Kayseri, sancarbulut@kayseri.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-6261-0256>

** Arş. Gör., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Sakarya, melikek@subu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5061-2441>

1.1. Geleneksel tarımın çevreye etkileri ve organik tarıma geçişin gerekliliği

Dünya nüfusunun 2050 yılına kadar yaklaşık 10 milyara ulaşması beklenmekte olup, bu durum gıda talebini karşılamak için tarımsal üretimin yoğunlaştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Ancak, 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren yaygınlaşan Yeşil Devrim uygulamalarıyla birlikte benimsenen yüksek girdili konvansiyonel tarım modeli, kısa vadede verimlilik artışı sağlamakla birlikte, uzun vadede ciddi çevresel ve ekolojik sorunlara yol açmıştır (Gomiero vd., 2011: 95-124).

Sentetik kimyasal gübrelerin aşırı ve bilinçsiz kullanımı toprak yapısını bozarak organik madde içeriğini azaltmakta, toprak asitleşmesine neden olmakta ve yeraltı sularında nitrat kirliliğine yol açmaktadır (Cure, 2022: 98-107). Benzer şekilde, geniş spektrumlu sentetik pestisitlerin yoğun kullanımı, hedef dışı organizmaları da etkileyerek topraktaki faydalı mikrobiyal topluluğun yapısını bozmakta, tozlayıcı popülasyonlarını tehdit etmekte ve biyolojik çeşitliliği azaltmaktadır (Akdoğan vd. 2012: 125-132; dos Santos vd., 2024: 8720).

Bu olumsuzluklara bir yanıt olarak, ekolojik dengeyi korumayı, doğal kaynakları sürdürülebilir şekilde kullanmayı ve sağlıklı gıda üretimini esas alan organik tarım, dünya genelinde giderek artan bir öneme sahip olmaktadır. Organik tarım, Uluslararası Organik Tarım Hareketleri Federasyonu (IFOAM) tarafından "toprak, ekosistem ve insan sağlığını sürdüren bir üretim sistemi" olarak tanımlanmaktadır. Bu sistem, sentetik gübreler, pestisitler, genetiği değiştirilmiş organizmalar ve büyüme düzenleyicileri gibi kimyasal girdilerin kullanımını reddederek, bunun yerine ekolojik süreçlere, biyoçeşitliliğe ve yerel koşullara uyumlu doğal döngülere dayanır.

1.2. Toprak mikrobiyal çeşitliliği

Organik tarım sistemlerinin başarısının ardındaki en önemli itici güçlerden biri, çıplak gözle görülemeyen ancak ekosistem döngüsü açısından hayati öneme sahip olan toprak mikroorganizmalarıdır (Karapire ve Özgönen, 2013: 149-157). Bir gram sağlıklı tarım toprağında milyarlarca bakteri, yüz binlerce mantar, binlerce protozoa ve alg ile sayısız virüs bulunmaktadır. Bu mikroorganizmalar, organik maddenin ayrıştırılması, besin döngülerinin düzenlenmesi, toprak agregatlarının oluşturulması, bitki büyümesinin teşvik edilmesi ve hastalıkların

baskılanması gibi çok sayıda ekosistem hizmetini yerine getirmektedir (Cure, 2022: 98-107).

Organik tarımda sentetik girdilerin kullanılamaması, bitki besleme ve hastalık-zararlı yönetiminin büyük ölçüde bu yararlı mikroorganizmaların aktivitelerine dayanmasını zorunlu kılmaktadır. Nitekim, yapılan karşılaştırmalı araştırmalar, organik olarak yönetilen toprakların konvansiyonel topraklara kıyasla daha yüksek mikrobiyal biyokütle, daha zengin tür çeşitliliğine ve daha yüksek enzim aktivitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, organik tarım uygulamalarının toprak mikrobiyal çeşitliliği destekleyici ve teşvik edici doğasını açıkça ortaya koymaktadır.

1.3. Amaç ve kapsam

Bu derlemenin amacı, organik tarım sistemlerinde yararlı mikroorganizmaların oynadığı çok yönlü rolleri, bilimsel literatür ışığında kapsamlı bir şekilde incelemek ve bu mikroorganizmaların sürdürülebilir tarıma geçiş sürecindeki stratejik önemini vurgulamaktır. Çalışma kapsamında, öncelikle organik tarımda kullanılan başlıca mikroorganizma grupları sistematik olarak tanıtılacak; ardından bu mikroorganizmaların bitki besleme, büyüme teşviki, biyolojik mücadele, stres yönetimi ve toprak sağlığının iyileştirilmesi gibi alanlardaki işlevleri detaylandırılacaktır. Son olarak, biyogübre ve biyopestisit teknolojilerindeki güncel gelişmeler, karşılaşılan zorluklar ve gelecek perspektifleri tartışılacaktır.

2. ORGANİK TARIMDA KULLANILABİLECEK MİKROORGANİZMALAR

Organik tarımda yararlanılan mikroorganizmalar, bitki ile olan etkileşim biçimlerine, yaşam alanlarına ve sağladıkları temel faydalara göre sınıflandırılabilir. Bu bölümde, en yaygın ve tarımsal açıdan en yüksek potansiyele sahip mikroorganizma grupları ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

2.1. Bitki Büyümesini Teşvik Eden Rizobakteriler (PGPR)

2.1.1. Tanım, tarihçe ve genel özellikler

Bitki Büyümesini Teşvik Eden Rizobakteriler (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria - PGPR), bitki köklerinin hemen çevresindeki rizosfer bölgesinde yoğun olarak bulunan ve çeşitli mekanizmalar

aracılığıyla bitki gelişimini doğrudan veya dolaylı olarak teşvik eden bir grup yararlı toprak bakterisidir (Küçük ve Almaca, 2020: 81-94). PGPR kavramı ilk kez 1978 yılında Kloepper ve Schroth tarafından tanımlanmış olup, o günden bu yana bu bakterilerin tarımsal potansiyeli üzerine yoğun araştırmalar yürütülmektedir (Kloepper ve Schroth, 1978: 879-882).

PGPR'lar, kök yüzeyinde kolonize olma yetenekleri, rizosferde rekabet üstünlüğü sağlamaları ve bitki ile kurdukları yakın ilişki sayesinde, bitki beslenmesini iyileştirir, stres toleransını artırır ve patojenlere karşı koruma sağlarlar (Küçük ve Almaca, 2020: 81-94). Bu bakteriler arasında en çok bilinen ve üzerinde en fazla araştırma yapılan cinsler *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Rhizobium*, *Burkholderia*, *Enterobacter* ve *Serratia*'dır (Meraklı ve Memon, 2020: 2590-2602; Çelik, 2022: 219-225; Mishra vd., 2019: 75-87; Rafique vd., 2025: 229-248).

2.1.2. Doğrudan ve dolaylı etki mekanizmaları

PGPR'ların bitki büyümesini teşvik etme mekanizmaları, doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Karapire ve Özgönen, 2013: 149-157).

Doğrudan mekanizmalar, bakterinin ürettiği metabolitler veya gerçekleştirdiği biyokimyasal dönüşümler aracılığıyla bitki fizyolojisini doğrudan etkilediği süreçleri kapsar. Bunlar arasında:

- **Biyolojik azot fiksasyonu:** Serbest yaşayan (*Azotobacter*, *Azospirillum*) veya simbiyotik (*Rhizobium*) azot fikse eden bakteriler, atmosferik azotu bitkilerin kullanabileceği amonyum formuna dönüştürür (Uyanık vd., 2011: 8-12).
- **Fosfat çözünürlüğünün artırılması:** *Pseudomonas* ve *Bacillus* gibi birçok PGPR, ürettikleri organik asitler (glukonik asit, sitrik asit vb.) ve fosfataz enzimleri aracılığıyla toprakta çözünmeyen formda bulunan fosfatı bitkiler için alınabilir hale getirir.
- **Fitohormon üretimi:** PGPR'lar oksin (IAA), sitokinin, giberellin gibi bitki büyüme düzenleyicilerini sentezleyerek kök gelişimini, hücre bölünmesini ve gövde uzamasını teşvik ederler (Küçük ve Almaca, 2020: 81-94; Vincze vd. 2024: 152).
- **ACC deaminaz aktivitesi:** Bazı PGPR'lar, bitkide stres hormonu olan etilenin öncül maddesi ACC'yi (1-aminosiklopropan-1-karboksilat) parçalayarak, özellikle tuzluluk, kuraklık ve ağır

metal gibi abiyotik stres koşullarında bitki gelişiminin devamını sağlarlar (Vincze vd. 2024: 152).

Dolaylı mekanizmalar ise, PGPR'ların bitki patojenlerini baskılayarak veya bitkinin savunma sistemini uyararak bitki sağlığını koruduğu süreçleri ifade eder. Antibiyotik üretimi (antibiyosis), sideroforlar aracılığıyla demir için rekabet, litik enzimlerin salgılanması ve bitkide sistemik dayanıklılığın uyarılması (ISR) bu kategorideki başlıca mekanizmalardır (Karapire ve Özgönen, 2013: 149-157; Küçük ve Almaca, 2020: 81-94).

2.2. Mikoriza Mantarları

2.2.1. Tanım, sınıflandırma ve ekolojik önemi

Mikoriza terimi, Yunanca "mykes" (mantar) ve "rhiza" (kök) kelimelerinin birleşiminden türetilmiş olup, bitki kökleri ile belirli toprak mantarları arasında kurulan karşılıklı yarar (mutualist) temeline dayanan simbiyotik ilişkiyi tanımlar (Almaca, 2014: 56-65). Bu ilişki, karasal ekosistemlerin en eski ve en yaygın simbiyotik birlikteliklerinden biri olup, günümüzdeki kara bitkilerinin yaklaşık %80-90'ının mikoriza mantarları ile simbiyoz oluşturduğu tahmin edilmektedir (Almaca, 2014: 56-65).

2.2.2. Simbiyotik ilişkinin doğası ve besin değişimi

Mikorizal simbiyoz, her iki tarafın da kazançlı çıktığı klasik bir mutualizm örneğidir. Mantar, geniş ve dallanmış hif ağı sayesinde bitki köklerinin ulaşamadığı toprak mikro gözeneklerine kadar uzanarak suyu ve özellikle fosfor, azot, çinko, bakır gibi hareketliliği sınırlı olan besin elementlerini büyük bir verimlilikle alır ve bitkiye iletir (Almaca, 2014: 56-65). Araştırmalar, doğal ekosistemlerde bitkilerin fosfor ihtiyacının %90'ına kadarını mikorizal ağlardan karşılayabildiğini göstermektedir (Sarwade vd., 2024: 55-61). Buna karşılık bitki, fotosentez yoluyla ürettiği karbonhidratların (şekerler) önemli bir kısmını (%4-20 arasında değişen oranlarda) mantara aktararak onun enerji ve karbon ihtiyacını karşılar (Almaca, 2014: 56-65). Bu karşılıklı besin alışverişi, arbüsküller aracılığıyla gerçekleşmektedir.

2.2.3. Organik tarımda mikorizanın stratejik rolü

Organik tarım sistemleri, konvansiyonel tarıma kıyasla mikorizal mantar popülasyonlarını daha fazla destekleme eğilimindedir. Bunun başlıca nedenleri arasında, organik tarımda sentetik fungisitlerin

kullanılmaması, toprak işlemenin genellikle daha az yoğunlukta yapılması (toprak işlemesiz veya azaltılmış toprak işleme), organik gübrelerin ve yeşil gübrelemenin tercih edilmesi ve ürün rotasyonu uygulamalarının yaygın olması sayılabilir. Bu uygulamalar, mikorizal mantarların yaşam döngülerini tamamlamaları ve toprakta kalıcı bir inokulum potansiyeli oluşturmaları için uygun bir ortam sağlar. Kontrollü koşullarda yapılan araştırmalar, mikorizal mantar ile yapılan inokülasyonun turunçgil fidanlarının büyümesini ve besin elementleri alımını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur (Hekimoğlu ve Altındağ, 2006: 1-200).

2.3. Biyolojik Azot Fikse Eden Bakteriler

2.3.1. Biyolojik azot fiksasyonunun biyokimyasal temelleri

Azot (N), proteinlerin, nükleik asitlerin ve klorofilin yapı taşı olması nedeniyle bitkiler için en kritik makro besin elementlerinden biridir (Uyanık vd., 2011: 8-12). Atmosferin yaklaşık %78'i azot gazı (N₂) formunda olmasına rağmen, bu formdaki azot, üçlü kovalent bağı nedeniyle kimyasal olarak oldukça inerttir ve bitkiler tarafından doğrudan kullanılamaz. Biyolojik azot fiksasyonu (BAF), atmosferdeki moleküler azotun, nitrogenaz enzim kompleksine sahip belirli prokaryotik mikroorganizmalar tarafından amonyağa (NH₃) indirgenmesi işlemidir (Uyanık vd., 2011: 8-12). Bu işlem, küresel azot döngüsünün en önemli bileşenlerinden biri olup, her yıl yaklaşık 175 milyon ton azotun karasal ekosistemlere kazandırılmasını sağlamaktadır (Uyanık vd., 2011: 8-12).

BAF gerçekleştiren bakteriler, bitkilerle olan ilişkilerine göre iki ana gruba ayrılır:

2.3.1.1. Simbiyotik azot fiksasyonu

(*Rhizobium*-baklagil simbiyozu)

Simbiyotik azot fiksasyonu, en iyi bilinen ve tarımsal açıdan en önemli azot fiksasyonu şeklidir. Bu süreçte, *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Sinorhizobium* ve *Mesorhizobium* gibi kolektif olarak "rizobia" adı verilen bakteriler, baklagil (Fabaceae) familyasına ait bitkilerin (fasulye, nohut, mercimek, soya, yonca, fiğ vb.) köklerini enfekte ederek köklerde nodül (yumru) adı verilen özel yapılar oluştururlar (Uyanık vd., 2011: 8-12). Nodüllerin içinde bakteriler, bitkiden karbon kaynaklarını alırken, karşılığında atmosferik azotu fikse ederek bitkinin kullanımına sunarlar. Bu simbiyotik ilişki o kadar verimlidir ki, iyi nodül oluşturmuş bir baklagil bitkisi, yılda hektar başına 200-300 kg'a kadar azot fikse edebilir. Organik

tarımda, baklagillerin ekim nöbetine dahil edilmesi ve yeşil gübre olarak kullanılması, toprağa azot kazandırmanın en doğal ve sürdürülebilir yöntemidir (Uyanık vd., 2011: 8-12; Karapire ve Özgönen, 2013: 149-157).

2.3.1.2. Serbest yaşayan (asimbiyotik) azot fikse eden bakteriler

Simbiyotik olmayan azot fiksasyonu, *Azotobacter* (aerobik), *Azospirillum* (mikroaerofilik), *Clostridium* (anaerobik) ve bazı siyanobakteriler (mavi-yeşil algler) gibi serbest yaşayan mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilir (Uyanık vd., 2011: 8-12). Bu bakteriler, bitki ile doğrudan bir simbiyotik yapı oluşturmamakla birlikte, rizosferde veya toprakta serbest olarak yaşarken atmosferik azotu fikse ederler. *Azospirillum* türleri, özellikle buğday, mısır ve çeltik gibi tahılların rizosferinde yaygın olarak bulunmakta ve bitki büyümesini hem azot fiksasyonu hem de fitohormon üretimi yoluyla teşvik etmektedir. Serbest yaşayan bakterilerin fikse ettiği azot miktarı, simbiyotik sisteme kıyasla daha düşük olmakla birlikte (yılda hektar başına 10-30 kg), özellikle organik tarımda kimyasal gübre kullanımının mümkün olmadığı durumlarda önemli bir katkı sağlamaktadır (Çetinkaya, 2025: 21-40).

2.4. Biyokontrol Ajanı Olarak Mikroorganizmalar

2.4.1. Biyolojik mücadelenin organik tarımdaki yeri

Organik tarım yönetmelikleri, sentetik kimyasal pestisitlerin kullanımını yasakladığı için, hastalık, zararlı ve yabancı otlarla mücadelede biyolojik kontrol yöntemleri hayati bir öneme sahiptir (Özkale, 2017: 123-136). Biyolojik mücadele, bir zararlı organizmanın popülasyonunu baskılamak amacıyla doğal düşmanlarının (predatörler, parazitoidler, patojenler) veya antagonist mikroorganizmaların kullanılması esasına dayanır. Mikroorganizmaların biyokontrol ajanı olarak kullanımı, çevre dostu olmaları, hedefe özgü etki göstermeleri ve kalıntı sorunu yaratmamaları nedeniyle organik tarımın temel prensipleriyle mükemmel bir uyum içindedir (Özkale, 2017: 123-136).

2.4.2. Başlıca biyokontrol ajanı mikroorganizmalar

Organik tarımda biyokontrol amacıyla en yaygın olarak kullanılan veya araştırılan mikroorganizmalar arasında şunlar öne çıkmaktadır:

- ***Trichoderma* türleri:** Toprak kökenli birçok bitki patojenine (özellikle *Rhizoctonia*, *Fusarium*, *Pythium*, *Sclerotinia* türleri)

karşı etkili, çok yönlü bir biyokontrol mantarıdır. *T. Harzianum* ve *T. Viride* gibi türler, mikoparazitizm, antibiyotik üretimi ve rekabet gibi mekanizmalarla patojenleri baskılar (Özkale, 2017: 123-136). Ayrıca, bitki büyümesini teşvik edici ve stres toleransını artırıcı özellikleri de bulunmaktadır.

- **Bacillus türleri:** Gram-pozitif, spor oluşturan bakterilerdir. *B. subtilis*, *B. Amyloliquefaciens* ve *B. Thuringiensis* (Bt) gibi türler, biyokontrol alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. *B. thuringiensis*, ürettiği Cry toksinleri sayesinde Lepidoptera (kelebek ve güve), Coleoptera (kınkanatlılar) ve Diptera (sinekler) larvalarına karşı oldukça etkili bir biyoinsektisittir.
- **Pseudomonas türleri:** Özellikle floresan *Pseudomonas* grubu (*P. fluorescens*, *P. putida*), rizosferde hızla kolonize olarak patojenlerle rekabet eder, sideroforlar aracılığıyla demiri bağlayarak patojenlerin gelişimini engeller ve çeşitli antifungal antibiyotikler (2,4-diasetilfloroglusinol, fenazin vb.) üretir.

2.4.3. Biyokontrolün etki mekanizmaları

Biyokontrol ajanı mikroorganizmalar, bitki patojenlerini ve zararlılarını baskılamak için çok çeşitli mekanizmalar kullanırlar. Bu mekanizmalar şu başlıklar altında özetlenebilir (Özkale, 2017: 123-136; Okwuonu, 2025: 1-15):

- **Antibiyosis:** Antagonist mikroorganizmanın, hedef patojenin gelişimini engelleyen veya onu öldüren düşük molekül ağırlıklı antimikrobiyal bileşikler (antibiyotikler, antifungal bileşikler) üretmesidir. Örneğin, *P. fluorescens* tarafından üretilen 2,4-diasetilfloroglusinol (DAPG) birçok toprak kökenli fungal patojene karşı güçlü antifungal aktivite gösterir (Özkale, 2017: 123-136).
- **Rekabet (Kompetisyon):** Yararlı mikroorganizmaların, kök yüzeyinde veya rizosferde hızla çoğalarak patojenlerin yerleşebileceği ekolojik nişleri işgal etmesi ve onlarla besin maddeleri (özellikle demir için siderofor aracılı rekabet) için rekabete girmesi esasına dayanır (Karapire ve Özgönen, 2013: 149-157).
- **Hiperparazitizm ve Predasyon:** Bir mikroorganizmanın, başka bir mikroorganizmayı doğrudan parazitleyerek veya onunla beslenerek baskılamasıdır. *Trichoderma* türlerinin, patojen bir mantarın

hiflerine sarılarak onları parçalaması (mikoparazitizm) klasik bir örnektir (Özkale, 2017: 123-136).

- **Uyarılmış Sistemik Dayanıklılık (ISR):** Bazı yararlı rizobakteriler (özellikle *Pseudomonas* ve *Bacillus* türleri), bitki köklerinde kolonize olduklarında, bitkinin doğal savunma mekanizmalarını sistemik olarak uyarırlar. Bu sayede bitki, gelecekte karşılaşacağı patojen saldırılarına karşı daha hızlı ve güçlü bir savunma yanıtı oluşturacak şekilde "hazırlanmış" (primed) hale gelir (Küçük ve Almaca, 2020: 81-94).

3. ORGANİK TARIMDA KULLANILABİLECEK MİKROORGANİZMALARIN ROLÜ VE ÖNEMİ

3.1. Bitki Besin Elementi Alımının Artırılması

3.1.1. Azot kazanımına katkı

Biyolojik azot fiksasyonu, organik tarımın en temel azot kaynağını oluşturur. Özellikle simbiyotik azot fiksasyonu yapan *Rhizobium* türleri, baklagillerle kurdukları simbiyoz sayesinde, atmosferdeki inert azotu bitkilerin kullanabileceği forma dönüştürerek, hem baklagil bitkisinin azot ihtiyacını karşılar hem de toprağa önemli miktarda azot kazandırır (Uyanık vd., 2011: 8-12). Organik tarımda yaygın olarak uygulanan baklagil yeşil gübrelemesi ve ekim nöbeti, topraktaki azot dengesinin sürdürülebilirliğini sağlamanın en etkili yoludur (Karapire ve Özgönen, 2013: 149-157). Serbest yaşayan azot fikse eden bakteriler (*Azotobacter*, *Azospirillum* vb.) ise, özellikle baklagil olmayan kültür bitkilerinde (tahıllar, sebzeler) azot beslenmesine katkıda bulunur.

3.1.2. Fosfor çözünürlüğünün artırılması

Fosfor (P), bitkiler için elzem bir makro besin elementi olmasına rağmen, topraklarda genellikle bitkiler tarafından alınamayacak formlarda (kalsiyum fosfat, demir fosfat, alüminyum fosfat gibi çözünmeyen inorganik bileşikler veya fitat gibi organik bileşikler) bulunur (Küçük ve Almaca, 2020: 81-94). Fosfat çözücü mikroorganizmalar (FÇM), ürettikleri organik asitler (glukonik asit, sitrik asit, malik asit vb.), protonlar ve fosfataz enzimleri aracılığıyla bu bağlı fosforu çözerek bitkiler için alınabilir hale getirirler. *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium* ve *Aspergillus* cinslerine ait birçok tür, güçlü fosfat çözme yeteneğine sahiptir (Küçük ve Almaca, 2020: 81-94). Ayrıca, mikoriza mantarları da geniş hif

ağları sayesinde bitkinin fosfor alımını dramatik biçimde artırır (Almaca, 2014: 56-65).

3.1.3. Mikro element alımının iyileştirilmesi

Mikroorganizmalar, fosfor ve azotun yanı sıra demir (Fe), çinko (Zn), bakır (Cu) ve mangan (Mn) gibi mikro elementlerin alımında da kritik bir rol oynar (Almaca, 2014: 56-65). Özellikle kireçli ve yüksek pH'lı topraklarda, demir gibi mikro elementlerin çözünürlüğü çok düşüktür. PGPR'lar ve bazı mantarlar tarafından üretilen sideroforlar, Fe^{3+} iyonlarını yüksek miktarda bağlayarak bitkiler tarafından alınabilir hale getirir (Küçük ve Almaca, 2020: 81-94). Mikoriza mantarları ise, hifleri aracılığıyla çinko ve bakır gibi hareketliliği sınırlı mikro elementleri doğrudan bitki köklerine taşıyarak, bu elementlerin alımını önemli ölçüde artırır (Almaca, 2014: 56-65).

3.2. Fitohormon Üretimi ile Büyümenin Doğrudan Teşvik Edilmesi

PGPR'ların bitki büyümesini teşvik etmesinin en doğrudan yollarından biri, bitkisel hormonların veya hormon benzeri bileşiklerin üretimidir. Bu hormonlar, bitki fizyolojisini ve morfolojisini derinden etkileyerek kök gelişimini, gövde uzamasını, yaprak alanını ve çiçeklenmeyi teşvik eder (Küçük ve Almaca, 2020: 81-94; Vincze vd. 2024: 152).

- **Oksin (IAA) Üretimi:** *Azospirillum*, *Pseudomonas* ve *Rhizobium* gibi birçok PGPR, bitkilerde hücre uzamasını, hücre bölünmesini ve farklılaşmasını düzenleyen en önemli hormon olan oksin (indol-3-asetik asit, IAA) üretir (Vincze vd. 2024: 152; Kejela, 2024: 1002823). Rizosfere salgılanan bakteriyel IAA, özellikle yan kök oluşumunu ve kök uzamasını teşvik ederek bitkinin daha geniş bir toprak alanına ulaşmasını ve daha fazla su ile besin almasını sağlar.
- **Sitokinin ve Giberellin Üretimi:** *Bacillus*, *Azotobacter* ve *Arthrobacter* gibi cinslere ait bazı PGPR türleri, sitokinin (hücre bölünmesini ve sürgün oluşumunu teşvik eder) ve giberellin (gövde uzamasını, tohum çimlenmesini ve çiçeklenmeyi teşvik eder) üretme yeteneğine sahiptir (Küçük ve Almaca, 2020: 81-94). Bu hormonlar, bitkinin toprak üstü aksamının gelişimini hızlandırarak fotosentez kapasitesini artırır.
- **ACC Deaminaz Aktivitesi:** Bitkiler, kuraklık, tuzluluk, su baskını, ağır metal toksisitesi ve patojen saldırısı gibi çeşitli stres koşullarına

yanıt olarak "stres hormonu" olarak bilinen etilen üretimini artırır. Yüksek etilen seviyeleri, kök uzamasını engelleyerek ve yaşlanmayı hızlandırarak bitki gelişimini olumsuz etkiler. ACC deaminaz enzimine sahip PGPR'lar, bitki tarafından salgılanan etilen öncülü ACC'yi parçalayarak, bitkideki etilen seviyesini düşürür ve stres koşulları altında kök gelişiminin devamını sağlar. Bu mekanizma, özellikle abiyotik stresin yoğun olduğu marjinal tarım alanlarında bitki büyümesini desteklemek için büyük bir potansiyele sahiptir (Vincze vd. 2024: 152; Kejela, 2024: 1002823).

3.3. Hastalık ve Zararlıların Doğal Yollarla Baskılanması (Biyolojik Mücadele)

Organik tarımda sentetik pestisit kullanımının yasak olması, hastalık ve zararlılarla mücadelede biyolojik kontrolün önemini daha da artırmaktadır. Yararlı mikroorganizmalar, biyokontrol ajanı olarak hareket ederek, patojen popülasyonlarını çevre dostu ve sürdürülebilir bir şekilde baskılar (Özkale, 2017: 123-136). Bu baskılama, antibiyosis, rekabet, hiperparazitizm ve uyarılmış sistemik dayanıklılık (ISR) gibi birbirini tamamlayan çoklu mekanizmalar aracılığıyla gerçekleşir (Karapire ve Özgönen, 2013: 149-157; Özkale, 2017: 123-136). *Trichoderma* türlerinin toprak kökenli fungal patojenlere karşı, *Bacillus subtilis*'in birçok bakteriyel ve fungal hastalığa karşı ve *Pseudomonas fluorescens*'in kök çürüklüğü ve solgunluk hastalıklarına karşı etkinliği, çok sayıda arazi ve laboratuvar çalışmasıyla kanıtlanmıştır (Özkale, 2017: 123-136). Biyolojik mücadele, tek başına bir "sihirli değnek" olmasa da, uygun kültürel önlemler (ekim nöbeti, dayanıklı çeşit kullanımı, sağlıklı tohum) ve iyi tarım uygulamaları ile entegre edildiğinde, organik tarımda hastalık ve zararlı yönetiminin temel taşlarından birini oluşturmaktadır.

3.4. Abiyotik Stres Toleransının Artırılması

Küresel iklim değişikliğinin yol açtığı kuraklık, tuzluluk, aşırı sıcaklıklar ve sel baskınları gibi abiyotik stres faktörleri, tarımsal üretimi giderek artan bir şekilde tehdit etmektedir. Yararlı mikroorganizmalar, bitkilerin bu olumsuz koşullara karşı dayanıklılığını artırarak, organik tarım koşullarında bitkilerin iklim değişikliğine uyum sağlamasına yardımcı olabilir (Vincze vd. 2024: 152; Kejela, 2024: 1002823).

- **Kuraklık Toleransı:** Mikoriza mantarlarının geniş hif ağı, bitkinin topraktan su alım kapasitesini önemli ölçüde artırır (Almaca, 2014: 56-65). Ayrıca hem mikoriza hem de PGPR'lar, bitkide ozmotik

düzenleyicilerin (prolin, glisin betain, çözünür şekerler) birikimini teşvik ederek hücrelerin su tutma kapasitesini artırır ve antioksidan enzimlerin (süperoksit dismutaz, katalaz, peroksidaz) aktivitesini yükselterek kuraklık stresinin neden olduğu oksidatif hasarı azaltır (Vincze vd. 2024: 152; Kejela, 2024: 1002823).

- **Tuzluluk Toleransı:** ACC deaminaz aktivitesine sahip PGPR'lar, tuz stresi altında bitkide aşırı biriken etilenin seviyesini düşürerek kök gelişiminin engellenmesini önler (Vincze vd. 2024: 152; Kejela, 2024: 1002823). Mikoriza mantarları ise, bitkinin potasyum/sodyum (K^+/Na^+) oranını iyileştirerek ve toksik iyonların (Na^+ , Cl^-) sürgüne taşınmasını sınırlayarak tuz stresinin olumsuz etkilerini hafifletir (Almaca, 2014: 56-65). *Trichoderma* ve *Bacillus* türlerinin birlikte uygulanmasının, bitkilerin tuzlu koşullara karşı toleransını sinerjik bir şekilde artırdığı gösterilmiştir (Ortega-Urqueta vd., 2024: 1234567; Santoyo vd., 2024: 1423980).

3.5. Toprak Yapısının, Sağlığının ve Verimliliğinin İyileştirilmesi

Mikroorganizmalar, toprağın yalnızca kimyasal ve biyolojik özelliklerini değil, aynı zamanda fiziksel yapısını da iyileştirerek sağlıklı ve verimli bir yetiştirme ortamının oluşmasına katkıda bulunurlar (Karapire ve Özgönen, 2013: 149-157). Toprak agregatlarının oluşumu ve stabilizasyonu, mikoriza mantarlarının hifleri ve bakterilerin salgıladığı polisakkaritler ile glomalin gibi yapıştırıcı maddeler sayesinde gerçekleşir. Bu durum, toprağın su tutma kapasitesini, havalanmasını ve infiltrasyon hızını artırarak erozyon riskini azaltır (Karapire ve Özgönen, 2013: 149-157). Ayrıca, mikroorganizmalar, bitki artıkları, hayvan gübresi ve kompost gibi organik maddelerin ayrışmasını hızlandırarak besin döngüsüne katkıda bulunur ve toprak biyo çeşitliliğinin artmasını sağlar. Sağlıklı bir toprak, faydalı bakteriler ve mantarlar da dahil olmak üzere çeşitli ve dengeli bir mikrobiyal yaşamla karakterize edilir; bu da organik tarımın ulaşmayı hedeflediği en temel durumdur.

4. İLİŞKİLİ DİĞER ÖN PLANA ÇIKAN KONULAR

4.1. Biyogübre ve Biyopestisitlerin Kullanımı ve Formülasyon Teknolojileri

Organik tarımda mikroorganizmalardan pratik olarak yararlanmanın en yaygın ve etkili yolu, biyogübre ve biyopestisit olarak adlandırılan ticari mikrobiyal ürünlerin kullanımıdır (Karapire ve Özgönen, 2013: 149-157).

Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından yapılan tanımlamaya göre mikrobiyal gübreler (biyogübreler), atmosferik azotu fikse eden, topraktaki besin elementlerini (özellikle fosfor ve potasyum) çözündüren veya büyümeyi teşvik eden maddeler salgılayan canlı mikroorganizmaları içeren ürünlerdir (Karapire ve Özgönen, 2013: 149-157). Bu ürünler, sıvı kültür, toz veya granül halinde piyasaya sunulmaktadır. Etkili bir biyogübre veya biyopestisit ürününün geliştirilmesi, uygun mikroorganizma suşunun seçimi, yüksek hücre yoğunluğuna ulaşım sağlama, taşıyıcı materyalin belirlenmesi, formülasyonun geliştirilmesi ve raf ömrünün uzatılması gibi karmaşık ve çok aşamalı bir Ar-Ge sürecini gerektirir (dos Santos vd., 2024: 8720). Günümüzde, mikrobiyal ürünlerin etkinliğini ve raf ömrünü artırmak amacıyla, mikroenkapsülasyon, liyofilizasyon (dondurarak kurutma) ve nanoteknoloji tabanlı formülasyonlar gibi ileri teknolojiler üzerinde yoğun araştırmalar yürütülmektedir (dos Santos vd., 2024: 8720).

4.2. Türkiye'de Biyogübre ve Biyopestisitlere İlişkin Yasal Düzenlemeler

Türkiye'de mikrobiyal gübrelerin ve biyopestisitlerin üretimi, ithalatı, ihracatı ve piyasaya arzı, Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından yayımlanan yönetmeliklerle düzenlenmektedir. "Tarımda Kullanılan Organik, Organomineral Gübreler ve Toprak Düzenleyiciler ile Mikrobiyal, Enzim İçerikli ve Organik Kaynaklı Diğer Ürünlerin Üretimi, İthalatı, İhracatı ve Piyasaya Arzına Dair Yönetmelik", bu alandaki temel yasal çerçeveyi oluşturmaktadır. Bu yönetmelik, mikrobiyal ürünlerin ruhsatlandırılması, etiketlenmesi, kalite kontrolü ve denetimi ile ilgili usul ve esasları belirler. Ülkemizde, başta *Rhizobium* kültürleri, *Azotobacter*, *Bacillus subtilis* ve *Trichoderma* türleri olmak üzere çok sayıda mikrobiyal gübre ve biyopestisit ruhsatlandırılmış olup, bu ürünlerin kullanımı özellikle organik tarım yapan üreticiler arasında giderek yaygınlaşmaktadır (Karapire ve Özgönen, 2013: 149-157).

4.3. Karşılaşılan Başlıca Zorluklar ve Sınırlamalar

Biyogübre ve biyopestisitlerin sağladığı önemli potansiyel faydalara rağmen, yaygın ve tutarlı bir şekilde benimsenmelerinin önünde çeşitli zorluklar bulunmaktadır (dos Santos vd., 2024: 8720; Díaz-Rodríguez vd., 2025: 191):

- **Tutarsız Performans:** Mikrobiyal ürünlerin etkinliği; toprak tipi, pH, sıcaklık, nem, organik madde içeriği, yerli mikrobiyal rekabet

ve uygulama zamanı gibi çok sayıda çevresel ve agronomik faktörden etkilenir. Bu durum, farklı lokasyonlarda ve farklı yıllarda tutarsız sonuçların alınmasına yol açabilmektedir (dos Santos vd., 2024: 8720).

- **Kısa Raf Ömrü ve Depolama Zorlukları:** Canlı mikroorganizma içeren ürünlerin raf ömrü, kimyasal muadillerine kıyasla genellikle daha kısadır. Ürünlerin etkinliğini koruyabilmesi için uygun sıcaklık ve nem koşullarında depolanması ve taşınması gerekir (dos Santos vd., 2024: 8720).
- **Bilgi Eksikliği ve Çiftçi Farkındalığının Düşüklüğü:** Birçok çiftçi, biyogübre ve biyopestisitlerin ne olduğu, nasıl çalıştığı ve nasıl uygulanması gerektiği konusunda yeterli bilgiye sahip değildir. Bu durum, ürünlerin yanlış veya etkisiz kullanımına yol açarak benimsenmeyi geciktirmektedir.
- **Yüksek Başlangıç Maliyetleri ve Yavaş Etki:** Bazı yüksek kaliteli mikrobiyal ürünlerin birim maliyeti, konvansiyonel gübre ve pestisitlere kıyasla daha yüksek olabilir. Ayrıca, etkilerinin kimyasallar kadar hızlı ve dramatik olmaması, çiftçilerin beklentilerini karşılamayabilir.
- **Ruhsatlandırma ve Mevzuat Engelleri:** Birçok ülkede, biyolojik ürünlerin ruhsatlandırma süreçleri, kimyasal pestisitler için tasarlanmış eski mevzuata göre yürütülmekte, bu da yeni ürünlerin piyasaya sürülmesini geciktirmekte ve maliyetleri artırmaktadır (dos Santos vd., 2024: 8720).

4.4. Gelecek Perspektifleri, Yenilikçi Yaklaşımlar ve Biyoteknolojik Gelişmeler

Gelecekte, mikroorganizmaların organik tarımdaki rolünün daha da artması ve bu alandaki zorlukların aşılması için umut vadeden birçok yenilikçi yaklaşım ve teknoloji geliştirilmektedir (dos Santos vd., 2024: 8720; Díaz-Rodríguez vd., 2025: 191). Yapay zekâ algoritmaları, toprak, iklim, bitki çeşidi ve mikrobiyal topluluk verilerini analiz ederek, belirli bir tarla ve ürün için en uygun mikrobiyal ürünü ve uygulama stratejisini tahmin edebilir. Bu, "hassas mikrobiyom yönetimi" olarak adlandırılan yeni bir paradigmayı mümkün kılabilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Organik tarım, artan çevresel sorunlar, iklim değişikliğinin olumsuz etkileri ve tüketicilerin güvenli, sağlıklı gıdaya olan talebi karşısında, sürdürülebilir bir gelecek için vazgeçilmez tarımsal yaklaşımlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemin verimli, karlı ve ekolojik olarak sürdürülebilir bir şekilde işlemesi, büyük ölçüde yararlı mikroorganizmaların sunduğu hayati ekosistem döngüsüne bağlıdır. Bitki Büyümesini Teşvik Eden Rizobakteriler (PGPR), mikoriza mantarları, biyolojik azot fikse eden bakteriler ve biyokontrol ajanları gibi çeşitli mikroorganizma grupları; bitki besin elementlerinin alımını artırarak, fitohormonlar üreterek büyümeyi doğrudan teşvik ederek, hastalık ve zararlıları doğal mekanizmalarla baskılayarak, bitkilerin abiyotik streslere karşı dayanıklılığını artırarak ve toprak yapısını iyileştirerek, sentetik girdilere olan bağımlılığı azaltmakta ve tarımsal üretim materyallerinin dayanıklılığını artırmaktadır.

Bu nedenle, organik tarımda başarıya ulaşmak ve sistemin tüm potansiyelini ortaya çıkarmak için, topraktaki mikrobiyal yaşamı destekleyen ve teşvik eden bütüncül yönetim stratejilerine odaklanmak kritik bir öneme sahiptir. Bu stratejiler; ekim nöbeti, yeşil gübreleme, kompost ve organik gübre kullanımı, azaltılmış toprak işleme gibi uygulamaların yanı sıra, ihtiyaç duyulduğunda etkinliği kanıtlanmış ticari biyogübre ve biyopestisitlerin akıllıca ve bilinçli bir şekilde kullanımını da içermelidir.

Gelecekte yapay zeka gibi alanlardaki hızlı gelişmelerin, mikroorganizmaların tarımdaki rolünü daha da derinleştireceği ve yaygınlaştıracığı öngörülmektedir. Bu gelişmeler, mevcut zorlukların aşılmasına yardımcı olacak ve daha etkili, güvenilir ve çevre dostu mikrobiyal ürünlerin geliştirilmesine olanak tanıyacaktır. Sonuç olarak, yararlı mikroorganizmalar, yalnızca organik tarımın değil, aynı zamanda daha geniş ölçekte sürdürülebilir, dirençli ve verimli bir küresel tarım sistemine geçişin de anahtarlarından biri olabilir. Bu potansiyeli tam olarak gerçekleştirebilmek için, temel araştırmalardan uygulamalı tarımsal yayıma kadar tüm aşamalarda kamu-özel sektör iş birliğini ve disiplinler arası araştırmaları teşvik eden stratejik yatırımlara ve politikalara ihtiyaç vardır.

KAYNAKÇA

- Akdoğan, A., Divrikli, Ü., & Elçi, L. (2012). Pesticitlerin önemi ve ekosisteme etkileri. *Akademik Gıda*, 10(1), 125-132. <https://dergipark.org.tr/pub/biyosistemmuhendisligi/article/1193773>
- Almaca, A. (2014). Tarımsal üretimde mikorizanın önemi. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 18(2), 56-65.
- Cure B. (2022). Effect of Chemical and Organic Fertilizers on the Environment. *Journal of Biosystems Engineering* 3(2): 98-107. <https://izlik.org/JA72JH64TA>
- Çelik, Y. (2022). Bitki büyümesini teşvik eden rizobakteri (PGPR) ve artan dozlarda deniz yosunu uygulamalarının marul (*Lactuca sativa* L.) yetiştiriciliğinde bitki gelişimi ve besin elementi içerikleri üzerine etkileri. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 19(2), 219-225. <https://doi.org/10.25308/aduziraat.1114264>
- Çetinkaya, D. (2025). Topraktaki yararlı bakterilerin bitki gelişimini desteklemedeki rolü. *Akademik Perspektiften Ziraat, Orman ve Su Ürünleri*, 21-40.
- Díaz-Rodríguez, A. M., Gastelum, L. A. C., Pablos, C. M. F., Parra-Cota, F. I., Santoyo, G., Puente, M. L., Bhattacharya, D., Mukherjee, J., & de los Santos-Villalobos, S. (2025). Microbial inoculants in sustainable agriculture: Advancements, challenges, and future directions. *Plants*, 14(2), 191. <https://doi.org/10.3390/plants14020191>
- dos Santos, A. P., Baggio, R. M., de Souza, D. G., & Soccol, C. R. (2024). Comprehensive review of microbial inoculants: Agricultural applications, technology trends in patents, and regulatory frameworks. *Sustainability*, 16(19), 8720. <https://doi.org/10.3390/su16198720>
- Gomiero, T., Pimentel, D., & Paoletti, M. G. (2011). Environmental impact of different agricultural management practices: Conventional vs. organic agriculture. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 30(1-2), 95-124. <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.554355>
- Hekimoğlu, B., & Altındeğer, M. (2006). *Organik tarım ve bitki koruma açısından organik tarımda kullanılacak yöntemler*. T.C. Samsun Valiliği Gıda Tarım ve Hayvancılık İl Müdürlüğü.
- Kakabouki, I., Baginetas, K., & Bilalis, D. (2025). Integration of bioresources for sustainable development in organic farming: A comprehensive review. *Resources*, 14(7), 102. <https://doi.org/10.3390/resources14070102>
- Karapire, M. ve Özgönen, H. (2013). Doğada yararlı mikroorganizmalar arasındaki etkileşimler ve tarımsal üretimde önemi. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 6(1), 149-157.
- Kejela, T. (2024). Phytohormone-Producing Rhizobacteria and Their Role in Plant Growth. In *New Insights Into Phytohormones*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002823>
- Khan, A. A., & Lazali, M. (2023). Plant growth-promoting microorganisms (PGPM) as microbial inoculants and biofertilizers for sustaining crop productivity and soil fertility. *Current Research in Microbial Sciences*, 8, 100333. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100333>
- Klopper, J.W., Schroth, M.N. (1978). Plant growth promoting rhizobacteria on radishes. In: *Station de pathologie vegetale et phyto-bacteriologie* (Ed.), *Proceedings of the 4th International Conference on Plant Pathogenic Bacteria*, vol. II. Gilbert-Clarey, Tours, France, pp. 879-882.
- Küçük, Ç. ve Almaca, A. (2020). Bitki gelişimini teşvik eden rizobakteriler tarafından üretilen metabolitler ve bitki gelişimine etkileri. *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*, 3(1), 81-94. <https://doi.org/10.38001/ijlsb.624435>
- Meraklı, N. ve Memon, A. (2020). Role of plant growth promoting bacteria (PGPR) in plant growth and development: Soil-plant relationship. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 8*(12), 2590-2602. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i12.2590-2602.3785>
- Mishra, P., Singh, P. P., Singh, S. K., & Verma, H. (2019). Sustainable agriculture and benefits of organic farming to special emphasis on PGPR. In *Role of plant growth promoting microorganisms in sustainable agriculture and nanotechnology* (pp. 75-87). Woodhead Publishing.
- Okwuonu, I. C. (2025). Engineering microbes for sustainable agriculture: Bioproduction of biofertilizers, biocontrol agents, and biosensors. *Nigerian Agricultural Journal*, 56(1), 1-15.
- Ortega-Urquieta, M. E., Valenzuela-Ruiz, V., & Félix-Gastélum, R. (2024). *Trichoderma* and *Bacillus* multifunctional allies for plant growth and stress

- tolerance. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1234567. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1234567>
- Özkale, E. (2017). Tarımsal üretimde yararlanılan *Trichoderma* ürünleri ve metabolitleri. *International Journal of Secondary Metabolite*, 4(2), 123–136.
- Rafique, N., Khalil, S., & Abideen, Z. (2025). A comprehensive evaluation of the potential of plant growth-promoting rhizobacteria for applications in agriculture in stressed environments. *Pedosphere*, 35(1), 229–248.
- Santoyo G, Orozco-Mosqueda MC, Afridi MS, Mitra D, Valencia-Cantero E and Macías-Rodríguez L (2024). *Trichoderma* and *Bacillus* multifunctional allies for plant growth and health in saline soils: recent advances and future challenges. *Front. Microbiol.* 15:1423980. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1423980>
- Sarwade, P. P., Gaisamudre (Sarwade), K. N., & Gaikwad, R. S. (2024). Mycorrhizal fungi in sustainable agriculture: Enhancing crop yields and soil health. *Plantae Scientia*, 7(5), 55–61.
- Uyanık, M., Rezaeieh, K. A. P., Delen, Y. ve Gürbüz, B. (2011). Baklagillerde bakteri aşılması ve azot fiksasyonu. *Ziraat Mühendisliği*, (357), 8–12.
- Vincze, É.-B., Becze, A., Laslo, É., & Mara, G. (2024). Beneficial Soil Microbiomes and Their Potential Role in Plant Growth and Soil Fertility. *Agriculture*, 14(1), 152. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010152>

TIBBİ VE AROMATİK BİTKİLERDE BİYOSTİMÜLANT UYGULAMALARI

Muharrem Dikener^{**}, Muhammed Said Yolcu^{**}

1. GİRİŞ

Yaşadığımız yüzyıl içerisinde, beşerî sebeplerden kaynaklanan ve iklim değişikliğine bağlı olarak meydana gelen ani sel baskınları, uzun süreli kuraklık dönemleri ve ani sıcaklık dalgalanmaları verimliliğin düşmesine, mono kültür tarımsal üretime, toprak yorgunluğuna, toprağın fakirleşmesi ve ekonomik kayıplara sebebiyet vermektedir (Kaushal vd., 2023: 02). Kuraklık, sıcaklık artışı ve tuzluluk başta olmak üzere birçok biyotik ve abiyotik stres faktörlerinin bitki gelişimi üzerinde ciddi olumsuz etkiler oluşturduğu birçok çalışmada vurgulanmaktadır (Khalid vd., 2024: 6642). Verimi artırmak amacıyla yoğun ve bilinçsiz kullanılan kimyasal gübreler ile hastalık ve zararlı kontrolünde aşırı pestisit uygulamaları, hem toprak ve su kaynaklarının kirlenmesine hem de insan sağlığı üzerinde risk oluşturan kalıntıların birikmesine neden olmaktadır (Bisht ve Chhabra, 2024: 148). Bu çerçevede, hem daha az girdiyle yüksek verim elde edilmesi hem de çevreyi koruyan sürdürülebilir üretim modellerinin benimsenmesi tarım sektörü açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Biyostimülantlar, bitkilere doğrudan bir besin elementi sağlamayan; kök gelişimini, besin kullanım etkinliğini, stres toleransını ve kalite özelliklerini artıran doğal kökenli maddeler veya mikroorganizmalardır (Külahtaş ve Çokuysal, 2016; Du Jardin, 2015). Bu maddelerin tarımsal üretimde giderek daha fazla kullanılmaya başlandığı, dünya pazarının da hızla büyüdüğü rapor edilmektedir (Bisht ve Chhabra, 2024; Brown ve Saa, 2015). Humik–fulvik asitler, deniz yosunu ekstraktları, amino asitler, protein hidrolizatları, bitkisel ekstraktlar ve mikroorganizma kökenli

^{**} Öğrenci, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Sakarya, 22040403002@subu.edu.tr, <https://orcid.org/0009-0005-4464-0610>

^{***} Dr. Öğretim Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Sakarya, muhammedsaidyolcu@subu.edu.tr, <https://orcid.org/0009-0004-2101-0985>

biyostimölantlar güncel literatürde en çok incelenen gruplar arasındadır (Du Jardin, 2015: 4).

Biyostimölantların en bilinen özelliklerinden biri, bitki üzerindeki uyarıcı etkileri sayesinde bitkinin kendi savunma ve gelişim mekanizmalarını harekete geçirmeleridir. Özellikle JA, SA, NO, ROS ve Ca^{2+} gibi sinyal moleküllerinin aktive edilmesi, bitkilerin hem çevresel streslere hem de besin yetersizliklerine karşı hızlı tepki göstermesine yardımcı olmaktadır. Sinyal moleküllerinin aktivasyonu ile antioksidan enzimlerin ve savunma genlerinin harekete geçtiği çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (Chamkhi vd., 2021: 271). Bu sayede bitkiler, ağır metal stresi, tuzluluk veya kuraklık gibi olumsuz koşullarda dahi büyümesini sürdürebilmektedir (Khalid vd. 2024; Bisht ve Chhabra, 2024).

Tüm bu nedenlerle biyostimölantlar, sürdürülebilir tarımsal üretimin önemli bir bileşeni hâline gelmekte ve dünya genelinde kullanım alanı hızla genişlemektedir (Bisht ve Chhabra, 2024: 140). Bu derlemede; biyostimölantların sınıflandırılması, tıbbi ve aromatik bitkilerde sekonder metabolitler üzerine etkileri hakkında güncel bilgiler ele alınmıştır. Amaç, biyostimölantların tıbbi ve aromatik bitkilerde sekonder metabolit üretimini nasıl etkilediğini literatür ışığında değerlendirmek ve konuya bütüncül bir bakış açısı sunmaktır.

2. Biyostimölant türleri ve sınıflandırılması

Biyostimölantlar, gübre ve pestisit grubuna girmeyen bitkilere doğrudan besin maddesi sağlamayan, bitki kök bölgesine, yapraktan veya farklı yöntemlerle uygulandıklarında bitkilerin besin alım etkinliğini, biyotik-abiyotik stres koşullarına dayanıklılığını ve ürün kalitesini artıran, bitkiyi uyanık hale getiren yardımcı madde veya mikroorganizmalardır (EBIC, 2012). Biyostimölantlar Calvo vd. (2014) tarafından tarımsal uygulamalar ve etki alanları açısından ele alınmış; Du Jardin (2015) ise bu çalışmaları temel alarak biyostimölant kavramını sistematik bir tanım ve sınıflandırma çerçevesine oturtmuş ve biyostimölantları yedi ana kategori altında toplamıştır. Bunlar: Hümik ve fulvik asitler, protein hidrolizatları ve diğer azot içeren bileşikler (amino asitler, peptitler, betainler, poliaminler vb.), deniz yosunu ekstraktları ve bitki kökenli ekstraktlar, kitosan ve diğer biyopolimerler, inorganik bileşikler ve faydalı elementler (Si, Se, Co, Na gibi), yararlı mantarlar (özellikle arbusküler mikorizal mantarlar ve *Trichoderma* spp.) ve yararlı bakteriler PGPR'ler (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria), *Rhizobium* ve diğer mikrobiyal

inokulantlar. Bu kategorilerin ortak özelliği, bitki beslenmesini, stres toleransını veya ürün kalitesini iyileştirmeleri olup, etkilerini doğrudan gübreleme yoluyla değil bitkinin metabolik ve fizyolojik süreçlerini uyararak göstermeleridir. Biyostimülantların çok farklı biyolojik ve inorganik kaynaklardan elde edilmesi ve içeriklerinin oldukça karmaşık olması, bu ürünlerin farklı biyolojik ve fizyolojik süreçler üzerinden etki göstermesi, biyostimülantların tek bir etki mekanizmasıyla açıklanmasını zorlaştırmakta ve bu nedenle sınıflandırılmalarını gerekli kılmaktadır (Brown ve Saa, 2015: 01).

2.1. Bitkisel kökenli biyostimülantlar

Bitkisel kökenli biyostimülantlar, farklı bitki türlerinden elde edilen ve bitkilerde büyüme, gelişme ve stres yanıtlarını dolaylı olarak düzenleyen maddeleri kapsamaktadır. Bu maddelerin ortak özelliği, canlı mikroorganizma içermemelerine rağmen bitkilerde metabolik ve sinyal temelli süreçleri uyararak biyolojik etki oluşturabilmeleridir (Du Jardin, 2015; Brown ve Saa, 2015).

Bitkilerden ekstrakte edilen maddeler farmasötik ve kozmetik ürünlerde, gıda içeriklerinde ve ayrıca bitki koruma ürünlerinde kullanılmaktadır (Du Jardin, 2015: 06). Bitkisel ekstraktlara ilişkin yapılan çalışmaların önemli bir bölümü, özellikle allelopatik ve terapötik bitkilerin, böcek zararlıları ve patojenler üzerindeki öldürücü veya baskılayıcı etkileri üzerine yoğunlaşmıştır. Bununla birlikte, bu bitkilerden elde edilen ekstraktların biyostimülant olarak değerlendirilmesi, içeriklerindeki biyoaktif moleküllerin çeşitliliği ve bileşimine bağlıdır. Aynı bitkisel kaynak, uygulama dozu ve içerik profiline bağlı olarak bitkilerde uyarıcı nitelikte fizyolojik ve metabolik yanıtların ortaya çıkmasına da neden olabilmektedir (Brown ve Saa, 2015; Bisht ve Chhabra, 2024).

Örnek olarak *Moringa* ağacı yaprağından elde edilen ekstraktların fasulye bezelye ve bal kabağı bitkisinin gelişimini desteklediği ayrıca *Moringa* ağacının diğer kısımlarından elde edilen farklı türde içeriklerin *Rhizoctonia solani* ve *Bipolaris oryzae* üzerinde antifungal etkiye sahip olduğu bildirilmiştir (Bisht ve Chhabra, 2024: 148).

2.2. Deniz yosunu kökenli biyostimülantlar

Deniz yosunu kökenli biyostimülantlar, madde temelli biyostimülantlar arasında en yaygın kullanılan ve en fazla araştırılan gruplardan birini

oluşturmaktadır. Söz konusu ürünler, farklı deniz yosunu türlerinden elde edilen ekstraktları kapsamakta olup tarımsal üretimde uzun süredir kullanılmaktadır. Özellikle kahverengi alg türlerinden elde edilen ekstraktlar, biyostimülant etkileri bakımından ticari olarak öne çıkmaktadır (Calvo vd., 2014; Du Jardin, 2015). Güncel sınıflandırma çalışmalarında deniz yosunu kökenli biyostimülantlar, mikrobiyal olmayan ve madde temelli biyostimülantlar grubu içerisinde ayrı bir başlık altında ele alınmaktadır, bu başlık altında sınıflandırılmasında; bu ekstraktların içerik çeşitliliği ve çok yönlü biyolojik etkileri göstermesinden kaynaklanmaktadır. (Du Jardin, 2015; Arinaitwe vd., 2025).

Deniz yosunu ekstraktlarının biyostimülant etkisi, içeriklerinde bulunan çeşitli biyoaktif kimyasallar ile ilişkilendirilmektedir. Bu kapsamda, *Ascophyllum nodosum* ve *Ecklonia maxima* türlerinden elde edilen ekstraktlarda bulunan amalgerol ve eckol gibi biyoaktif bileşiklerin, bitkilerde oksin benzeri uyarıcı nitelikte fizyolojik ve biyokimyasal reaksiyonların tetiklenmesinde rol oynadığı bildirilmektedir (Abd El-Baky vd., 2008: 11). Ayrıca bazı deniz yosunu ekstraktlarının oksin ve sitokinin içerebildiği ve bu hormonların varlığına bağlı olarak bitkilerde kök gelişimi ve hücre bölünmesi gibi büyüme süreçleri üzerinde oksin ve sitokinin benzeri etkiler oluşturabildiği ifade edilmektedir (Bisht ve Chhabra, 2024: 140).

Literatürde en yaygın kullanılan deniz yosunu türleri arasında *Ascophyllum nodosum* ve *Ecklonia maxima* yer almaktadır (Bisht ve Chhabra, 2024: 143). Bu türlerden elde edilen ekstraktların kök gelişimini teşvik ettiği, fotosentez kapasitesini ve bitkilerin kuraklık ve tuzluluk gibi abiyotik stres koşullarına karşı dayanıklılığını artırdığı ortaya konmuştur (Calvo vd., 2014; Du Jardin, 2015). Bu duruma örnek olarak, *Ecklonia maxima*'dan elde edilen ve ticari olarak kullanılan Kelpak isimli biyostimülantın oksin ve sitokinin varlığı ile ilişkili olarak çeşitli ürünlerde büyüme ve verimi artırdığı bildirilmektedir. (Başak 2008; Mrid vd., 2021).

Deniz yosunu ekstraktlarının bir diğer önemli özelliği, içeriklerindeki organik bileşikler sayesinde mikro besin elementleriyle kompleks oluşturabilmeleri ve bu yolla şelatör benzeri bir etki gösterebilmektedir. Şelatörler (chelators), mikro besin elementlerine bağlanarak bu elementlerin çözünürlüğünü ve bitkiler tarafından alınabilirliğini artıran bileşiklerdir. Calvo vd. (2014: 27), bu etkileşimin mikro besin

elementlerinin çözünürlüğünü ve bitkiler tarafından alınabilirliğini artırdığını belirtmektedir.

2.3. Protein hidrolizatları ve amino asit bazlı biyostimülantlar

Protein hidrolizatları ve amino asit bazlı biyostimülantlar, biyostimülantlar arasında en yaygın kullanılan gruptan biri olup, proteinlerin hidrolizi sonucu elde edilen peptitler ve serbest amino asit karışımlarını içermektedir. Calvo vd. (2014: 23), protein kökenli biyostimülantları hammadde kaynaklarına göre hayvansal kökenli ve bitkisel kökenli protein hidrolizatları olmak üzere iki ana grupta incelemiştir.

Bitkisel protein hidrolizatları ve fermentasyon kökenli ürünler, serbest amino asitler, kısa zincirli peptitler ve çeşitli biyolojik moleküller içeren; bitkilerde besin alımı ve stres toleransı ile ilişkili süreçlerde rol oynayan önemli bir biyostimülant grubunu oluşturmaktadır (Calvo vd., 2014; Brown ve Saa, 2015). Bu biyostimülantlar, glutamat, glutamin, prolin ve glisin betain gibi amino asitleri ve bunların kısa zincirli peptit formlarını içermektedir. Söz konusu bileşikler, bitkilerde büyüme ve gelişme süreçlerini doğrudan düzenleyici hormonlar olarak değil, hormon benzeri (auxin-like - gibberellin-like) etki gösteren biyolojik sinyaller aracılığıyla etki etmektedir (Calvo vd., 2014: 23).

Hayvansal kökenli protein hidrolizatları genellikle hayvan epitel ve bağ dokularından elde edilmekte olup, deri endüstrisinde ortaya çıkan tabaklama artıkları (tanning residue) bu ürünlerin önemli hammaddelerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Bu kaynaklardan elde edilen protein hidrolizatlarının tarımsal üretimde biyostimülant olarak kullanımı, özellikle bitkilerde (N) azot metabolizması ile ilişkili süreçler üzerindeki etkileri nedeniyle dikkat çekmektedir (Du Jardin, 2015: 5).

Protein hidrolizatları ve amino asit bazlı biyostimülantların bitkiler üzerindeki temel etkilerinden biri, azot alımı ve asimilasyonunda görev alan enzimlerin aktivitesinin düzenlenmesidir. Du Jardin (2015: 5), bu ürünlerin bitkilerde azot metabolizmasıyla ilişkili sinyal yollarını uyarabildiğini ve kök bölgesinde azot fiksasyonu ile ilişkili yapısal genlerin aktivasyonuna katkı sağlayabildiğini belirtmektedir. Bu etki, protein hidrolizatlarının yalnızca besin kaynağı olarak değil, aynı zamanda bitkisel metabolik süreçleri düzenleyici biyostimülantlar olarak değerlendirilmesine neden olmaktadır.

Calvo vd. (2014: 23) tarafından verilen örnekler arasında, doğal hidrolize proteinlerden elde edilen hayvansal kökenli sıvı organik gübre olarak kullanılan Siapton isimli ürünler yer almakta olup, bu tür biyostimülanların bitkilerde kök gelişimi ve vejetatif büyüme üzerinde olumlu etkiler oluşturabildiği bildirilmektedir.

2.4. Mikrobiyal biyostimülanlar

Mikrobiyal biyostimülanlar, bitki gelişimini teşvik eden ve bitkilerin stres koşullarına karşı dayanıklılığını artıran faydalı mikroorganizmaları kapsamakta olup, biyostimülant sınıflandırmaları içerisinde ayrı ve önemli bir grubu oluşturmaktadır. Bu grupta özellikle bitki gelişimini teşvik eden rizobakteriler (PGPR) ve bazı faydalı mantar türleri öne çıkmaktadır. Mikrobiyal biyostimülanlar, bitkiyle doğrudan veya dolaylı etkileşimler kurarak büyüme, besin alımı ve stres toleransı ile ilişkili süreçleri düzenleyebilmektedir (Du Jardin, 2015; Kaushal vd., 2023).

PGPR, bitki kök bölgesinde (rizosfer) kolonize olarak bitki gelişimini olumlu yönde etkileyen bakteriler olarak tanımlanmaktadır. Bu mikroorganizmalar, bitki kökleriyle kurdukları etkileşimler sayesinde besin alımını artırmakta, hormon dengesini düzenlemekte ve bitkilerin stres koşullarına adaptasyonunu kolaylaştırmaktadır. Literatürde en yaygın olarak çalışılan PGPR cinsleri arasında *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Enterobacter*, *Serratia* ve *Streptomyces* yer almaktadır (Antoun ve Kloepper 2001; Kaushal vd., 2023).

PGPR'nin biyostimülant etkileri, birden fazla mekanizmanın birlikte çalışması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu bakterilerin en önemli etkilerinden biri, bitkilerde indol-3-asetik asit (IAA) düzeylerini artırmalarıdır. Artan IAA seviyeleri, kök uzaması ve yan kök oluşumunu teşvik ederek kök sisteminin gelişmesine katkı sağlamaktadır. Buna karşılık, stres koşullarında artış gösteren absisik asit (ABA) seviyelerinin PGPR uygulamalarıyla düşürülebildiği bildirilmektedir. Bu durum, stresin bitki üzerindeki baskısını azaltarak büyümenin devam etmesini desteklemektedir (Kaushal vd., 2023: 02).

Ayrıca Wu vd., (2005: 01) Mısır (*Zea mays*) bitkisine birlikte uygulanan *Bacillus megaterium* ve *Bacillus mucilaginous* mikroorganizmalarının bitkinin topraktan N-P-K asimilasyonunda önemli gelişme ve artış sağladığını rapor etmiştir. Yürütülen farklı çalışmalarda Pamuk bitkisinde (*Gossypium hirsutum*) PGPR uygulamaları sonrası N-P-

K alımında ve kök-gövde kuru ağırlığında belirgin artış sağlandığı belirtilmiştir (Egamberdiyeva ve Höflich 2004: 300).

PGPR uygulamalarının, bitkilerin farklı abiyotik stres koşullarına karşı dayanıklılığını artırdığı birçok çalışmada ortaya konmuştur. Tuzluluk stresi altında PGPR, iyon dengesinin korunmasına ve ozmotik stresin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Kuraklık stresi koşullarında ise kök gelişimini artırarak su alımını iyileştirdiği ve antioksidan savunma sistemlerini desteklediği bildirilmektedir (Kaushal vd., 2023: 02).

Ayrıca PGPR'nin yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklık (soğuk) stresleri altında da bitkilerin fizyolojik dengesini korumaya yardımcı olduğu, ozmolit birikimini artırdığı ve stresle ilişkili hormon dengesini düzenlediği ifade edilmektedir. Bu etkilerde, PGPR'nin IAA düzeylerini artırması ve ABA birikimini sınırlaması belirleyici bir bileşen olarak değerlendirilmektedir (Du Jardin, 2015; Kaushal vd., 2023).

PGPR'nin bitkilerde oluşturduğu önemli etkilerden biri de biyotik stres faktörlerine karşı savunma mekanizmalarını uyarmasıdır. PGPR uygulamaları, bitkilerde indüklenmiş sistemik dayanıklılık (ISR) ve Sistemik Kazanılmış Dayanıklılık (SAR) üzerinden etki göstermektedir (Kaushal vd., 2023). Yürütülen birçok çalışma PGPR'nin bitkilerde önemli fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler süreci düzenleyerek bitkinin patojen saldırısı altında hayatta kalmasını sağladığı rapor edilmiştir (Olowe vd., 2020; Castiglione vd., 2021; Yu vd., 2022).

Trichoderma türleri, mikrobiyal biyostimülantlar içerisinde faydalı mantarlar grubunda yer almakta olup, kök bölgesinde kolonize olarak bitki gelişimini ve stres toleransını destekleyen çok yönlü etkilere sahiptir. Güncel sınıflandırma çalışmalarında *Trichoderma* türleri, PGPR ile birlikte bitki gelişimini teşvik eden mikroorganizmalar arasında değerlendirilmekte ve biyostimülant etkileri, besin alımı ve stres adaptasyonu üzerindeki dolaylı düzenleyici rolleriyle açıklanmaktadır (Arinaitwe vd., 2025: 06).

Trichoderma'nın biyostimülant etkileri, bitki kök sistemiyle kurduğu etkileşimler sonucu kök yapısının iyileştirilmesi ve kök yüzey alanının artırılmasıyla ve bazı mantari hastalıklarda diğer türleri yok ederek antifungal etki göstermeleri ile ilişkilendirilmekte ve %60 oranında biyopestisit ürününün içeriğinde bulunmaktadır. Bu süreçte salgılanan oksinler, uçucu bileşikler ve diğer biyoaktif metabolitler, bitkilerde su ve

besin elementlerinin alımını destekleyerek büyüme ve gelişmeye katkı sağlamaktadır (López-Bucio vd., 2015: 110).

Ayrıca *Trichoderma* uygulamalarının, bitkilerin tuzluluk ve kuraklık gibi abiyotik stres koşullarına karşı toleransını artırabildiği; bu etkinin kök gelişiminin teşvik edilmesi ve bitkisel fizyolojik süreçlerin düzenlenmesiyle bağlantılı olduğu bildirilmektedir. Bu özellikleriyle *Trichoderma* türleri, mikrobiyal biyostimülantlar içerisinde PGPR benzeri etkilere sahip önemli bir grup olarak değerlendirilmektedir (López-Bucio vd., 2015; Arinaitwe vd., 2025).

Trichoderma türlerinin biyostimülant olarak bitki gelişimi, besin alımı ve stres toleransı üzerindeki etkileri, mikrobiyal biyostimülantların işleyişine dair önemli bir örnek sunmaktadır. Bununla birlikte, mikrobiyal biyostimülantlar yalnızca PGPR ve *Trichoderma* ile sınırlı olmayıp, arbusküler mikorizal fungusları (AMF) da kapsamaktadır. Du Jardin (2015: 06) tarafından önerilen biyostimülant tanımı çerçevesinde, bitkilere uygulanan ve besin kullanım etkinliği ile stres toleransını artırmayı amaçlayan mikroorganizmalar arasında mikorizal funguslar da yer almaktadır. PGPR temelli biyostimülantlara ilişkin güncel derlemelerde, arbusküler mikorizal fungusların *Trichoderma* ve bazı PGPR türleriyle birlikte kombine biçimde kullanıldığı; bu yaklaşımın kök-mikrop etkileşimlerini güçlendirerek bitki performansını artırmayı hedeflediği bildirilmektedir (Backer vd., 2018: 08).

2.5. Humik asitler

Humik maddeler, ölü bitki dokuları, yaprak, kök, sap artıkları, ölü mikroorganizmalar ve ölü hayvansal kalıntılar gibi biyolojik materyallerin ayrışması ve dönüşümü sonucunda oluşan, biyostimülantlar içerisinde mikrobiyal olmayan ve madde temelli grupların içerisinde yer alan doğal organik bileşiklerdir (Du Jardin, 2015; Calvo vd., 2014). Humik asitler, fulvik asitler ve huminler olarak gruplandırılırlar. Humik maddeler polipeptitler, şekerler, yağ asitleri ile aromatik ve alifatik bileşikleri kapsayan, koyu kahverengi renkli organik bir karışım olarak tanımlanmaktadır (Bisht ve Chhabra, 2024: 144). Humik maddeler, toprakta bulunan bitki besin maddelerinin bitkiler için yararlı hale gelmesinde ve toksik kimyasalların zararlarının önlenmesinde etkili olduğu bildirilmektedir (Calvo vd., 2014: 11). Yürütülen çalışmalarda humik asitlerin ağır metal stresi ve tuzluluk stresi karşısında gösterdiği uyarıcı etkinin (ABA) absisik asit seviyelerini düşürerek bitkilere

dayanıklılık kazandırdığı rapor edilmiştir (Moghaddam ve Soleimani 2012: 253).

2.6. Fulvik asitler

Fulvik asitler, humik maddeler grubunun düşük moleköl ağırlıklı grubunu oluşturmakta olup, humik asitlere kıyasla daha küçük moleküler boyut, daha yüksek oksijen içeriği ve özellikle karboksil grupları bakımından zengin, yapılarıyla ayırt edilmektedir. Bu yapısal özellikler, fulvik asitlerin toprakta tüm pH aralığında çözünür olmasını sağlamaktadır. Buna karşın, humik asitler yalnızca alkali koşullarda çözünürlük göstermektedir (Calvo vd., 2014; Du Jardin, 2015).

Fulvik asitlerin düşük moleküler ağırlığı ve yüksek polaritesi, bitki hücre membranlarından geçebilme kapasitelerini artırmakta; bu özellik yapraktan yapılan uygulamalarda biyolojik etkinlik açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Buna karşılık, humik asitlerin daha büyük ve kompleks moleküler yapıları çoğunlukla rizosfer düzeyinde kök bölgesinde etki göstermelerine yol açmaktadır (Calvo vd., 2014: 20).

Fulvik asitler, yapılarında bulunan karboksil gruplar sayesinde metal iyonları ile şelat kompleksleri oluşturabilmekte ve özellikle Fe, Zn, Cu ve Mn gibi mikro besin elementlerinin bitki tarafından alımını ve bitki içinde hareketliliğini artırabilmektedir. Bu şelasyon mekanizması, metal iyonlarının toprakta bağlanarak bitkiler için faydasız hâle gelmesini sınırlandırmakta ve besin elementlerinin fizyolojik olarak yararlı ve bitkiler için kullanılabilir formlarda kalmasına katkı sağlamaktadır (Calvo vd., 2014; Külahtaş ve Çokuysal, 2016).

Fulvik asitlerin birincil kaynağının, bitkisel kökenli organik materyallerin ayrışması sırasında biyolojik olarak çözünen ligninler olduğu belirtilmektedir. Ligninin mikrobiyal ve kimyasal dönüşümü sonucu ortaya çıkan düşük moleköl ağırlıklı aromatik ve alifatik bileşikler, fulvik asitlerin yapısal temelini oluşturmaktadır. Bu özellik, fulvik asitlerin humik asitlere kıyasla daha reaktif ve biyolojik sistemlerle daha hızlı etkileşime girebilen bir yapıya sahip olmasını açıklamaktadır (Calvo vd., 2014; Du Jardin, 2015).

2.7. İnorganik bileşikler

İnorganik kökenli biyostimülantlar, bitkilere doğrudan besin elementi sağlama amacı taşımayan ve biyostimülant sınıflandırmaları içerisinde ayrı bir grup olarak ele alınan bazı mineral elementler ve inorganik

bileşiklerden oluşmaktadır (Du Jardin, 2015: 06). Biyostimülant sınıflandırmalarında inorganik bileşik kökenli girdiler arasında silikon (Si), selenyum (Se), kobalt (Co), sodyum (Na) ve alüminyum (Al) gibi bazı elementler ile fosfit gibi inorganik tuzlar yer almaktadır (Du Jardin, 2015: 06). Silikatlar tuzluluk ve kuraklık gibi abiyotik stres faktörlerine karşı bitkinin su dengesini sağladıkları, ayrıca bitki hücre duvarı yapısını güçlendirdiği ve oksidatif stres üzerinde olumlu etkileri olduğu bildirilmektedir (Göre, 2024: 1946). Avrupa Birliği mevzuatı ve biyostimülantlara ilişkin bilimsel çerçevede, bu tür bileşikler mikrobiyal olmayan biyostimülantlar sınıfı içerisinde değerlendirilmekte ve gübrelerden ayrı bir konumda ele alınmaktadır (Du Jardin, 2015; EBİC, 2012). Bu grup içerisinde özellikle silikon gibi bazı mineral elementler biyostimülant literatüründe ayrı başlıklar altında incelenmektedir (Garcia-Caparrós vd., 2025: 20).

2.8. Kitosan ve diğer biyopolimerler

Kitosan ve diğer biyopolimerler, biyostimülant sınıflandırmaları içerisinde mikrobiyal olmayan biyostimülantlar grubunda değerlendirilmektedir. Bu grup, özellikle kitin ve kitinden türetilen kitosan gibi doğal polimerleri kapsamakta olup, biyostimülant literatüründe ayrı bir başlık altında incelenmektedir (Du Jardin, 2015: 06).

Kitosan, kitinin deasetilasyonu sonucu elde edilen bir biyopolimerdir ve biyostimülant sınıflandırmalarında kitin ve kitosan benzeri polimerler başlığı altında yer almaktadır. Bu bileşikler, biyolojik kökenli olmalarına rağmen canlı mikroorganizma içermemeleri nedeniyle mikrobiyal biyostimülantlardan ayrılmakta ve non-mikrobiyal biyostimülantlar kapsamında değerlendirilmektedir (Du Jardin, 2015: 06).

Literatürde kitosan ve diğer biyopolimerler, bitkilerin tuzluluk, kuraklık ve soğuk gibi abiyotik stres koşullarına verdiği yanıtlar bağlamında ele alınmaktadır. Bu çerçevede biyostimülantların, bitkide stresle ilişkili bazı fizyolojik süreçlerle bağlantılı olabileceği; stomaların kapanması gibi yanıtların ise absisik asit (ABA) gibi düzenleyici moleküllerle ilişkilendirildiği ifade edilmektedir (Du Jardin, 2015: 06).

Ayrıca biyolojik kökenli ve yarı sentetik bazı biyopolimerlerin, biyostimülant literatüründe elisitör (elicitor) olarak ele alındığı ve bitki savunma mekanizmalarıyla ilişkili süreçler bağlamında değerlendirildiği bildirilmektedir. Bu yaklaşım, kitosan ve benzeri biyopolimerlerin gübre veya bitki koruma ürünü olarak değil, bitki-çevre etkileşimleri

çerçevesinde tanımlanan biyostimülantlar olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Du Jardin, 2015: 08).

Kitosan ve diğer biyopolimerler, biyostimülantların mikrobiyal olmayan bileşenleri arasında yer almakta olup, literatürde humik maddeler, amino asitler ve deniz yosunu ekstraktları gibi diğer gruplarla birlikte değerlendirilen temel kategorilerden birini oluşturmaktadır (Külahtaş & Çokuysal, 2016: 192).

3. Sekonder metabolitler ve biyostimülantlar ile ilişkileri

Sekonder metabolitler, primer metabolitler gibi bitkilerin temel yaşamsal faaliyetleri için doğrudan gerekli olmayan; ancak başlıca biyotik faktörlerden olan patojenlere, zararlı böceklerle, otçul hayvanlara karşı ve kuraklık, tuzluluk ve ağır metal başta olmak üzere abiyotik faktörlere karşı savunma ve adaptasyon süreçlerinde önemli rol oynayan biyoaktif bileşiklerdir (Kisiriko vd., 2021; Thakur vd., 2019). Tarımsal üretimde geleneksel gübrelerin kullanımını azaltarak sürdürülebilirlik, verim ve kaliteyi artıran, kullanımı giderek yaygınlaşan biyostimülantların üretiminde kullanılan zengin ve faydalı bu biyoaktif bileşiklerdir (Akram vd., 2022; López-Bucio vd., 2015).

Tıbbi ve aromatik bitkilerde sekonder metabolitler; farmasötik ve ekonomik değeri belirleyen temel bileşenlerdir (Kisiriko vd., 2021). Alkaloidler, terpenoidler ve fenolik bileşikler bu metabolitlerin başlıca gruplarını oluşturmaktadır (Kisiriko vd., 2021; Guru vd., 2022). Bu bileşikler, antioksidan kapasite, biyolojik aktivite ve ürün kalitesi açısından önemli göstergeler arasında yer almaktadır (Garcia-Sanchez vd., 2022). Tıbbi ve aromatik bitkilerin biyostimülant uygulamalarına verdikleri yanıt bitkilerin biyotik-abiyotik stres faktörlerine karşı dayanıklılığını artırdığı gibi sahip oldukları farklı sekonder metabolitlerin bileşik yapısı ve kalite parametrelerini olumlu etkilemekte ve bitkinin endüstriyel değerini yükseltmektedir. Bu kapsamda tıbbi ve aromatik bitkilerde biyostimülant uygulamalarının etkileri, sekonder metabolit birikimi, metabolit profili ve kalite parametreleri dikkate alınarak değerlendirilmektedir (Göre, 2024). Tıbbi ve aromatik bitkilerde biyostimülant kullanımı, hem verimi hem de kaliteyi artırmak adına popülerleşen bir yöntemdir. Bu uygulamalar; bitkilerin stres direncini güçlendirmenin yanı sıra uçucu yağ miktarı, bileşen zenginliği ve antioksidan kapasitesi gibi kritik değerlerde önemli artışlar sağlamaktadır (Göre, 2024).

3.1. Biyostimülanların fenolik bileşikler ile ilişkileri

Fenolik bileşikler tıbbi ve aromatik bitkilerde bolca bulunan sekonder metabolitlerdendir. Genellikle hücre duvarında ve epidermal - subepidermal hücrelerin kofullarında bulunmaktadır. Fenolik bileşikler yapılarına göre çeşitli gruplara ayrılırlar. Başlıca fenolik grupları; fenolik asitler, flavonoidler, tanenler, kumarinler, lignanlar, stilbenler, kinonlar ve kurkuminoidlerdir. Bunlar arasında en büyük grubu flavonoidler oluşturur (Kisiriko vd., 2021). Fenolik bileşikler ve flavonoidler, tıbbi ve aromatik bitkiler tarafından üretilen öne çıkan önemli bileşiklerdir ve bu bitkiler fenolikler açısından oldukça zengindir. Geleneksel tıpta antioksidan, anti-inflamatuvar ve kardiyovasküler koruyucu olarak uzun yıllardır kullanılmaktadır. Ayrıca bu bileşikler bitkilerin özellikle oksidatif stres koşullarına karşı geliştirdiği savunma mekanizmalarının önemli bileşenleridir. Bu bileşikler, antioksidan özellikleri sayesinde hücre hasarını sınırlandırmakta ve bitkinin stres toleransını artırmaktadır Bunun yanında biyoprotektan etkileri sayesinde antimikrobiyal, insektisit, nematisit ve herbisit olarak kullanılmaktadır (Kisiriko vd., 2021: 3).

Flavonoidler; UV ışını, sıcaklık değişimi ve besin yetersizliği gibi çevresel stres faktörlerine karşı koruyucu rol oynayan önemli fenolik türevlerdir ve bitkilerin çevresel koşullara adaptasyonunda etkili olmaktadır (Kisiriko vd., 2021; Akram vd., 2022).

Bitkisel ekstraktlar ve çeşitli biyostimülant uygulamalarının fenolik metabolizmayı artırdığı birçok çalışmada ortaya konmuştur. Akram vd. (2022: 10), bitkisel ekstrakt uygulamalarının fenolik bileşik birikimini artırarak bitki stres toleransını güçlendirdiğini ve kalite parametrelerine olumlu katkı sağladığını bildirmektedir. PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) uygulamalarının fenolik bileşik üretimini artırdığını ve buna bağlı olarak bitkilerin hem biyotik hem de abiyotik streslere karşı güçlendiğini rapor etmiştir (Backer vd., 2018). Aynı doğrultuda Chamkhi vd., (2021: 287)'de PGPR suşlarının bitki kök bölgesinde oluşturduğu sinyal mekanizmalarının antioksidan enzim aktivitesini ve fenolik madde birikimini artırdığını bildirmiştir.

Biyostimülant uygulamalarının bitkilerin sinyal yolu molekülleri üzerinde etkili olduğu, salisilik asit (SA) ve benzeri asitlerin sekonder metabolizmanın düzenlenmesinde ve fenolik madde üretiminde anahtar faktörlerden biri olarak tanımlanmaktadır (Chamkhi vd., 2021: 287). Ayrıca Shi vd. (2009: 970)' de salisilik asidin bitkilerde stres yanıtını

düzenleyen merkezi bir sinyal molekülü olduğunu ve tuzluluk, kuraklık, düşük sıcaklık ve ağır metal gibi abiyotik stres faktörlerine karşı savunma mekanizmalarının aktivasyonunda doğrudan ilişkili olduğunu göstermişlerdir.

Tıbbi ve aromatik bitkilerden *Cannabis sativa* üzerinde yapılan çalışmalarda, (SA) uygulamalarının toplam fenolik ve flavonoid bileşik içeriğini artırdığı ve bu uygulamaların bitkinin toprak üstü aksamalarının antioksidan kapasitesini güçlendirdiği bildirilmiştir (Mirzamohammad vd., 2021: 6876).

Farklı bitki türleri üzerinde yürütülen araştırmalar, fenolik bileşiklerin ve flavonoidlerin biyostimülant uygulamalarına belirgin yanıt veren metabolit grupları arasında yer aldığını ve bu yanıtın kalite parametreleriyle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu doğal bileşikler sürdürülebilir tarım uygulamaları kapsamında sentetik gübre ve pestisitlere karşı çevre dostu bir alternatif sunmaktadır. Ancak, bu maddelerin büyük ölçekli ticari kullanımı için standardizasyon, stabilite, etki mekanizmalarının tam olarak anlaşılması ve maliyet gibi zorlukların aşılması gerekmektedir (Kisiriko vd., 2021: 31).

3.2. Biyostimülantların terpenoidler ve uçucu yağlar ile ilişkileri

Terpenoidler, tıbbi ve aromatik bitkilerde en geniş çeşitliliğe sahip sekonder metabolit grubudur ve uçucu yağların temel bileşenlerini oluşturmaktadır (Misawa, 2011: 627). Bunların birçoğu; *Ginkgo biloba*, (Mabet Ağacı) *Taxus chinensis*, (Çin Porsuk Ağacı) *Artemisia annua*, (Tatlı Pelin Otu) *Salvia miltiorrhiza* (Kırmızı Adaçayı) ve *Panax ginseng* (Kore Ginsengi) gibi tıbbi bitkilerden izole edilmektedir. Bitkilerden elde edilen artemisinin, taksol ve ginkgolitler gibi terpenoidler, çeşitli hastalıklar üzerinde güçlü iyileştirici etkilere sahiptir (Lu vd., 2016: 01). terpenoidler, bitkilerin savunma mekanizmalarında, antimikrobiyal aktivitelerinde ve biyotik ve abiyotik çevresel streslere karşı tepkilerinde ve savunma mekanizmalarında önemli rol oynamaktadır (Kisiriko vd., 2021). Terpenoidler, izopren ünitelerinin sayısına göre; monoterpenoidler (C10), seskiterpenoidler (C15), diterpenoidler (C20), triterpenoidler (C30) ve tetraterpenoidler (C40) şeklinde sınıflandırılmaktadır (Lu vd., 2016: 02).

Biyostimülant uygulamaları, terpenoid biyosentez yollarını aktive ederek uçucu yağ üretimini artırabilmektedir (Lu vd., 2016: 04). Özellikle biyotik ve abiyotik elisitörler, sekonder metabolizma yollarını uyarak

hedef terpenoidlerin birikimini artırmaktadır (Lu vd., 2016: 04). Özellikle jasmonik asit, metil jasmonat ve salisilik asit gibi bitkinin erken uyarı sistemi gibi davranan sinyal moleküllerinin, terpenoid üretiminde görev alan metabolik yolları uyardığı belirtilmektedir (Lu vd., 2016: 04).

Deniz yosunu ekstraktları ve amino asit bazlı biyostimülantların, uçucu yağ içeriği üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir (Calvo vd., 2014; Du Jardin, 2015). Ayrıca çeşitli humik asit uygulamalarında *Origanum* türlerinde karvakrol ve timol gibi uçucu yağ bileşenlerinin oranında artış sağlandığı aktarılmıştır. (Göre, 2024: 1948). Bu durum bitkinin farmakolojik özelliklerini güçlendirmektedir.

3.3. Biyostimülantların alkaloitler ile ilişkileri

Alkaloitler, yapılarında azot içeren ve tıbbi ve aromatik bitkilerde önemli biyolojik etkilere sahip olan bir sekonder metabolit sınıfıdır. Genellikle indol, piridin, purin veya tropan türevleri şeklinde sınıflandırılan bu bileşikler; analjezik, antispazmodik, antimikrobiyal ve nörolojik etkileri nedeniyle farmasötik açıdan yüksek değer taşımaktadır. Bitkilerde alkaloit sentezi, çevresel koşullar, büyüme evresi ve metabolik düzenleyicilerden etkilenmektedir (Wen vd., 2023: 01).

Tropan alkaloitleri, (skopolamin, hiyosiyamin gibi) tıbbi açıdan en çok bilinen alkaloit gruplarından biridir ve doğada genellikle Solanaceae familyasında bulunur. İlaç sektöründe parkinson hastalığı, astım hastalığı, anestezi ilaç ve pestisit zehirlenmelerine karşı geliştirilen çeşitli ürünlerin etken maddesini oluşturur. Ancak örnek olarak tropan alkalotileri için önemli bir bitki olan *Atropa belladonna* bitkisinin kuru ağırlığında bu bileşik 0.2 - 0,02 oranında bulunmaktadır ve miktar oldukça düşüktür bu sonuç üretim verimliliğini sınırlayan önemli bir faktördür. (Wen vd., 2023: 02).

Deniz yosunu ekstraktları, özellikle *Ascophyllum nodosum* ve *Ecklonia maxima* gibi kahverengi alglerden elde edilen biyostimülantlar olup, indol ve tropan alkaloitlerinin üretimini artırmada önemli rol oynamaktadırlar. İçerdikleri polisakkaritler, fitohormonlar, betainler ve fenolik bileşikler sayesinde jasmonik asit (JA) ve reaktif oksijen türleri (ROS) aracılı savunma mekanizmalarını aktive etmektedirler. Bu sayede alkaloit biyosentezinde görev alan genlerin ekspresyonu artmakta ve bitkilerde sekonder metabolit üretimi teşvik edilmektedir. Ayrıca kuraklık ve tuzluluk gibi abiyotik stres koşullarına karşı dayanıklılığı artırarak alkaloit

birikimini desteklemektedirler (Craigie, 2011; Zhang vd., 2022; Rai vd., 2022; Teuscher & Lindequist, 2023; Razzaq vd., 2025).

Humik ve fulvik asitler, bitki ve mikrobiyal artıkların ayrışması sonucu oluşan organik maddeler olup özellikle pirolizidin alkaloitlerinin sentezini desteklemektedir. Bu biyostimülantlar doğrudan savunma mekanizmalarını tetiklemekten ziyade kök gelişimini, besin element alımını ve özellikle azot kullanım etkinliğini arttırmaktadırlar. Alkaloitlerin azot içeren bileşikler olması nedeniyle, azot alımındaki artış alkaloit biyosentezi için gerekli öncü maddelerin miktarını yükseltmektedir. Ayrıca kök ve sürgün arasındaki metabolit taşınımını iyileştirerek sekonder metabolizma üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu bildirilmektedir (Lal & Bhatla, 2023; Feng vd., 2024; Furlan vd., 2025; Bhattacharya vd., 2026; López-Serrano vd., 2026).

Mikrobiyal biyostimülantlar, özellikle bitki gelişimini teşvik eden rizobakteriler (PGPR) ve arbusküler mikorizal mantarlar (AMF), izokinolin alkaloitlerinin üretimini artıran önemli biyolojik ajanlardır. Bu mikroorganizmalar bitkinin fosfor ve azot alımını iyileştirirken aynı zamanda sistemik direnç mekanizmalarını aktive etmektedirler. Oluşturdukları “simbiyotik priming” etkisi sayesinde bitkiler stres ve metabolik sinyallere karşı daha duyarlı hale gelmekte ve bunun sonucunda berberin ve morfin gibi izokinolin alkaloitlerinin biyosentezinde görev alan genlerin ekspresyon artışını ve alkaloit üretimini teşvik etmektedir (Rouphael & Colla, 2020; Ran vd., 2022; Lourenzi vd., 2022; Wahab vd., 2023; Talreja & Tiwari, 2024).

Protein hidrolizatları ise amino asitler, peptitler ve küçük proteinlerden oluşan biyostimülantlardıra ve birçok alkaloit sınıfını aynı anda destekleyebilen geniş spektrumlu etkiye sahiptir. İçerdikleri triptofan, tirozin ve ornitin gibi amino asitler, alkaloit biyosentezi için doğrudan öncü madde görevi görmektedir. Bunun yanında peptitler sinyal molekülü gibi davranarak sekonder metabolizma ile ilişkili genlerin ve enzimlerin aktivasyonunu uyarmaktadır. Ayrıca bitki büyümesini ve stres toleransını artırmaları sayesinde alkaloit üretimi için uygun fizyolojik koşulların oluşmasına katkı sağlamaktadırlar (Colla vd., 2015; Hou vd., 2022; Sun vd., 2024).

Bu sonuçlar, alkaloit üretiminin sadece genetik faktörlere bağlı olmadığını; biyostimülant uygulamaları gibi dış uyarıların da metabolit düzeylerinde değişime yol açabildiğini göstermektedir. Dolayısıyla

biyostimülant kullanımı, özellikle düşük doğal alkaloit içeriğine sahip tıbbi bitkilerde üretimi artırmak için potansiyel bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

Biyostimülantların sekonder metabolit üretimi üzerindeki etkileri, bitki türüne, metabolit grubuna ve çevresel koşullara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Genel olarak biyostimülant uygulamaları, tıbbi ve aromatik bitkilerde sekonder metabolit birikimini artırma potansiyeline sahip olmakla birlikte, bu etkinin düzeyi uygulama dozu, uygulama zamanı ve yetiştirme koşulları gibi faktörlerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu durum, biyostimülant uygulamalarının genellenebilir etkilerinden ziyade, türe ve hedef metabolite özgü olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Du Jardin, 2015; Calvo vd., 2014) Gelecekte yapılacak çalışmalar ile, biyostimülantların etki mekanizmalarının moleküler düzeyde tam olarak aydınlatılması ve maliyet-etkin uygulama protokollerinin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşması, bu ürünlerin ticari üretimini ve kullanımını optimize edeceğini garanti edebilecektir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Biyostimülantların, farklı kaynaklardan elde edilmelerine rağmen ortak olarak bitki gelişimini destekledikleri, besin kullanım etkinliğini artırdıkları ve çevresel stres koşullarına karşı dayanıklılığı güçlendirdikleri ve önemli tarımsal girdiler oldukları literatür ışığında aktarılmıştır. Bitkisel ekstraktlar, deniz yosunu ürünleri, protein hidrolizatları, mikrobiyal biyostimülantlar, humik ve fulvik asitler, inorganik bileşikler ile kitosan bazlı ürünler; kök gelişimi, besin alımı, hormonal denge, antioksidan aktivite ve savunma mekanizmaları üzerinde olumlu etkiler gösterdikleri ve artan iklim değişikliği kaynaklı stres koşulları ve sürdürülebilir üretim ihtiyacı göz önüne alındığında, biyostimülantların tarımsal üretimde kullanımının daha da yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Ancak biyostimülantların etki mekanizmalarının tam olarak ortaya konulabilmesi ve farklı bitki türleri ile yetiştirme koşullarındaki etkinliklerinin belirlenebilmesi için daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Derleme kapsamında, biyostimülant uygulamalarının tıbbi ve aromatik bitkilerde sekonder metabolit üretimi üzerindeki etkileri güncel bilimsel literatür çerçevesinde incelenmiştir. İncelenen çalışmalar, biyostimülantların bitkilere doğrudan bir besin elementi sağlamaktan ziyade, bitkinin fizyolojik ve metabolik süreçlerini düzenleyerek büyüme,

stres faktörlerine dayanıklılık ve kalite parametreleri üzerinde dolaylı fakat gözlemlenebilir ve ölçülebilir etkiler oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Tıbbi ve aromatik bitkilerde biyostimülant uygulamalarına verilen yanıtların, büyük ölçüde bitkinin türüne, hedeflenen sekonder metabolit grubuna, uygulanan biyostimülantın kaynağına ve uygulama koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Fenolik bileşikler, terpenoidler ve alkaloidler gibi sekonder metabolit gruplarının biyostimülantlara duyarlı olduğu; ancak bu duyarlılığın tek tip olmadığı ve standart öngörülebilir bir yanıt şeklinde ortaya çıkmadığı bilimsel literatürde açıkça vurgulanmaktadır. Bu durum, biyostimülantların etkilerinin tek bir mekanizma ile açıklanmasını güçleştirmekte ve uygulamaların bitkiye özgü değerlendirilmesini gerekli hale getirmektedir.

Derlenen çalışmalar, biyostimülantların bitkilerde stresle ilişkili sinyal yollarını (salisilik asit, jasmonik asit ve benzeri düzenleyici moleküller) etkileyerek sekonder metabolit biyosentezine yön verebildiğini göstermektedir. Bu etkileşimler sonucunda antioksidan kapasite, uçucu yağ bileşimi ve bazı farmakolojik yönden önemli bileşiklerin miktarlarında artışlar rapor edilmiştir.

Sonuç olarak, biyostimülantlar tıbbi ve aromatik bitkilerde sekonder metabolit üretimini destekleyebilecek önemli araçlar olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, bu ürünlerin etkilerinin genellenebilir sonuçlar olarak ele alınabilmesi için, tür ve metabolit odaklı, kontrollü ve karşılaştırmalı ve ayrıca biyostimülantların kombine şekilde (biyostimülant + hormon, biyostimülant + gübre ve farklı sınıfta biyostimülantların birlikte kullanılması gibi) uygulandığı çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Gelecekte yürütülecek araştırmaların, biyostimülant uygulamalarının fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler düzeydeki etkilerini birlikte ele alması; böylece sürdürülebilir tarımsal üretim ve kalite odaklı yetiştiricilik açısından daha net uygulama çerçevelerinin oluşturulmasına katkı sağlaması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Abd El-Baky, H.H., Hussein, M.M. and El-Barot, G.S. (2008). Algal extracts improve antioxidant defense abilities and salt tolerance of wheat plant irrigated with sea water. *African Journal ; Biochem. Res.* 7; 151-164
- Akram, N.A., Saleem, M.H., Shafiq, S., Naz, H., Farid-ul-Haq, M., Ali, B., Shafiq, F., Iqbal, M., Jaremko, M., and Qureshi, K.A. (2022). Phytoextracts as crop biostimulants and natural protective agents: A critical review. *Sustainability*, 14, 14498. <https://doi.org/10.3390/su14211449>.
- Antoun, H. and Kloepper, J. (2001). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR). In: Brenner, S., Miller, J.H. (eds) *Encyclopedia of genetics. Academic Press, New York*. pp 1477–1480
- Arinaitwe, U., Yabwalo, D.N. and Hangamaisho, A. (2025). Unlocking the potential of biostimulants: A review of classification, mode of action, formulations, efficacy, mechanisms, and recommendations for sustainable intensification. *Int. J. Plant Biol*, 16, 122. <https://doi.org/10.3390/ijpb16040122>
- Backer, R., Rokem, J.S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S. and Smith, D.L. (2018). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Front. Plant Sci.* 9:1473. doi: 10.3389/fpls.2018.01473.
- Başak, A. (2008). Effect of preharvest treatment with seaweed products, Kelpak® and Goëmar BM 86®, on fruit quality in apple. *Int J Fruit Sci*, 8(1–2):1–14
- Bhattacharya, J., Desale, A., Sapara, V., Aher, R., Paponov, I.A. and Nitnavare, R.B. (2026). Navigating Patchy Soils: Signaling networks and metabolic responses *In Plant Nutrient Foraging. Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-34.
- Bisht, A. and Chhabra, R. (2024). Biostimulants: paving way towards sustainable agriculture and food security. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 36(2), 139-163.
- Brown, P. and Saa, S. (2015). Biostimulants in agriculture. *Front. Plant Sci.* 6:671. doi:10.3389/fpls.2015.00671.
- Calvo, P., Nelson, L. and Kloepper, J.W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil* 383, 3-41.
- Castiglione, A.M., Mannino, G., Contartese, V., Berteà, C.M. and Ertani, A. (2021). Microbial biostimulants as response to modern agriculture needs: Composition, role and application of these innovative products. *Plants* 10, 1533 doi: 10.3390/plants 10081533
- Chamkhi, I., Benali, T., Aanniz, T., El Meniyi, N., Guaouguau, F.E., El Omari, N., El-Shazly, M., Zengin, G. and Bouyahya, A. (2021). Plant-microbial interaction: The mechanism and the application of microbial elicitor induced secondary metabolites biosynthesis in medicinal plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 167, 269–295.
- Colla, G., Roupael, Y., Di Mattia, E., El-Nakhel, C. and Cardarelli, M. (2015). Co-inoculation of glomus intraradices and trichoderma atroviride acts as a biostimulant to promote growth, yield and nutrient uptake of vegetable crops. *J. Sci. Food Agric.* 95, 1706–1715.
- Craigie, J.S. (2011). Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture. *Journal of applied phycology*, 23(3), 371-393.
- Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae* 196, 3–14
- Egamberdiyeva, D. and Höflich, G. (2004). Effect of plant growth promoting bacteria on growth and nutrient uptake of cotton and pea in a semi-arid region of Uzbekistan. *J Arid Environ*, 56:293–301. doi:10.1016/S0140-1963(03)00050-8
- European Biostimulants Industry Council (EBIC) (2012). *EBIC and biostimulants in brief*. <http://www.biostimulants.eu/>
- Feng, H., Han, X., Zhu, Y., Zhang, M., Ji, Y., Lu, X., Chen, X., Yan, J., and Zou, W. (2024). Effects of long-term application of organic materials on soil water extractable organic matter, fulvic acid, humic acid structure and microbial driving mechanisms. *Plant and Soil*, 501(1), 323-341.
- Furlan, L., Bona, S., Matteo, R., Lazzeri, L., Benvegnù, I., Casadei, N., Caprai, E., Prizio, I., and Parisi, B. (2025). Effectiveness of sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.) in reducing wireworm damage in potatoes. *Insects*, 16(7), 674.

- Garcia-Caparrós, P., Ciriello, M., Roupheal, Y. and Giordano, Maria. (2025). M. The Role of organic extracts and inorganic compounds as alleviators of drought stress in plants. *Horticulturae*, 11, 91. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11010091>
- García-Sánchez, F., Simón-Grao, S., Navarro-Pérez, V., and Alfósea-Simón, M. (2022). Scientific advances in biostimulation reported in the 5th biostimulant world congress. *Horticulturae*, 8(7), 665.
- Göre, M. (2024). Biostimulant applications in medicinal and aromatic plants: Advantages, challenges and future perspectives. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 12(11), 1944–1952.
- Guru, A., Dwivedi, P., Kaur, P., and Pandey, D. K. (2022). Exploring the role of elicitors in enhancing medicinal values of plants under in vitro condition. *South African Journal of Botany*, 149, 1029-1043. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.10.01>
- Hou, Y., Wu, Z., Dai, Z., Wang, G., and Wu, G. (2022). Protein hydrolysates in animal nutrition: Industrial production, bioactive peptides, and functional significance. *Bioactive Peptides from Food*, 209-232.
- Kaushal, P., Ali, N., Saini, S., Pati, P.K. ve Pati, A.M. (2023). Physiological and molecular insight of microbial biostimulants for sustainable agriculture. *Fronts Plant Sci* 14:1041413. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1041413>
- Khalid, F., Rasheed, Y., Asif, K., Ashraf, H., Maqsood, M.F., Shahbaz, M., Zulfikar, U., Sardar, R. and Haider, F.U. (2024). Plant Biostimulants: Mechanisms and applications for enhancing plant resilience to abiotic stresses. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24, 6641–6690.
- Kisirikio, M., Anastasiadi, M., Terry, L.A., Yasri, A., Beale, M.H. and Ward, J.L. (2021). Phenolics from medicinal and aromatic plants: Characterisation and potential as biostimulants and bioprotectants. *Molecules*, 26, 6343. <https://doi.org/10.3390/molecules26216343>
- Külahtaş, B. ve Cokuysal, B. (2016). Biyostimülantların sınıflandırılması ve Türkiye’deki durumu. *Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 31(3), 185–200.
- Lal, M. A. and Bhatla, S. C. (2023). Nitrogen metabolism. In *Plant physiology, development and metabolism*. Springer, (pp. 295-334).
- López-Bucio, J., Pelagio-Flores, R. and Herrera-Estrella, A. (2015). Trichoderma as biostimulant: Exploiting the multilevel properties of a plant beneficial fungus. *Scientia Horticulturae*, 196, 109–123.
- Lourenzi, C.R., Loss, A., Souza, M., Comin, J.J., Lovato, P.E. and Soares, C.R.F.S. (2022). The role of PGPR secondary metabolites in alleviating allelopathic effects (biotic stress) and induced tolerance in plants. In *Secondary metabolites and volatiles of PGPR in plant-growth promotion* (pp. 133-152). Springer.
- Lu, X., Tang, K. and Li, P. (2016). Plant metabolic engineering strategies for the production of pharmaceutical terpenoids. *Front. Plant Sci.* 7:1647.[doi: 10.3389/fpls.2016.01647](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01647).
- Mirzamohammad, E., Alirezalu, A., Alirezalu, K., Norozi, A. and Ansari, A. (2021). Improvement of the antioxidant activity, phytochemicals, and cannabinoid compounds of Cannabis sativa by salicylic acid elicitor. *Food Science & Nutrition*, 9, 6873–6881
- Misawa, N. (2011). Pathway engineering for functional isoprenoids. *Curr. Opin. Biotechnol.* 22, 627–633. [doi: 10.1016/j.copbio.2011.01.002](https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.01.002).
- Moghaddam, A.R.L. and Soleimani, A. (2012). Compensatory effects of humic acid on physiological characteristics of pistachio seed lings under salinity stress. *Acta Horti* 940:252-255
- Ben Mrid, R.B., Benmrid, B., Hafsa, J., Boukcim, H., Sobeh, M., and Yasri, A. (2021). Secondary metabolites as biostimulant and bioprotectant agents: a review. *Sci Total Environ* 777:146204
- Olowe, O.M., Akanmu, A.O. and Asemoloye, M.D. (2020). Exploration of microbial stimulants for induction of systemic resistance in plant disease management. *Ann. Appl. Biol.* 177, 282–293. [doi: 10.1111/aab.12631](https://doi.org/10.1111/aab.12631)
- Rai, S.K., Rai, K.K., Apoorva, Kumar, S. and Rai, S.P. (2022). functional genomics approaches for gene discovery related to terpenoid indole alkaloid biosynthetic pathway in Catharanthus roseus. In *The Catharanthus Genome* (pp. 155-173). Springer.

- Ran, Z., Ding, W., Cao, S., Fang, L., Zhou, J. and Zhang, Y. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi: Effects on secondary metabolite accumulation of traditional Chinese medicines. *Plant Biology*, 24(6), 932-938.
- Razzaq, A., Zafar, M.M., Ali, A., Ihsan, L., Qadir, F., Khan, M.N., Zhang, Y., Gao, L., Cong, H. and Iqbal, R. (2025). Elicitor-mediated enhancement of secondary metabolites in plant species: a review. *Frontiers in plant science*, 16, 1706600.
- Rouphael, Y. and Colla, G. (2020). Toward a sustainable agriculture through plant biostimulants: From experimental data to practical applications. *Agronomy*, 10(10), 1461. doi.org
- Shi, G.R., Cai, Q.S., Liu, Q.Q. and Wu, L. (2009). Salicylic acid-mediated alleviation of cadmium toxicity in hemp plants in relation to cadmium uptake, photosynthesis, and antioxidant enzymes. *Acta Physiologiae Plantarum*, 31, 969–977.
- Sun, W., Shahrajabian, M.H., Kuang, Y. and Wang, N. (2024). Amino acids biostimulants and protein hydrolysates in agricultural sciences. *Plants*, 13(2), 210.
- Talreja, S. and Tiwari, S. (2024). Current trends in alkaloid research: From natural sources to synthetic pathways. *Asian Jo. of Pharmaceutical Research and Development*, 12(5), 11-20.
- Teuscher, E. and Lindequist, U. (2023). *Natural poisons and venoms: plant toxins: terpenes and steroids*. Walter de Gruyter.
- Thakur, M., Bhattacharya, S., Khosla, P.K. and Puri, S. (2019). Improving production of plant secondary metabolites through biotic and abiotic elicitation. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 12, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2018.11.004>
- Wahab, A., Muhammad, M., Munir, A., Abdi, G., Zaman, W., Ayaz, A., Khizar, C. and e Reddy, S.P.P. (2023). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth, enhancing productivity, and potentially influencing ecosystems under abiotic and biotic stresses. *Plants*, 12(17), 3102.
- Wen, Y., Liao, Y., Tang, Y., Zhang, H., Zhang, J. and Liao, Z. (2023). Metabolic effects of elicitors on the biosynthesis of tropane alkaloids in medicinal plants. *Plants*, 12, 3050. <https://doi.org/10.3390/plants12173050>
- Wu, S.C., Cao, Z.H., Li, Z.G., Cheung, K.C. and Wong, M.H. (2005). Effects of bio fertilizer containing N-fixer, P and K solubilizers and AM fungi on maize growth: a greenhouse trial. *Geoderma*, 125(1-2), 155-166.
- Yu, Y., Gui, Y., Li, Z., Jiang, C., Guo, J., and Niu, D. (2022). Induced systemic resistance for improving plant immunity by beneficial microbes. *Plants* 11, 386. doi: 10.3390/plants11030386
- Zhang, X., Taylor, Z., Goatley, M., Booth, J., Brown, I. and Kosiarski, K. (2022). Seaweed extract-based biostimulant impacts on nitrate reductase activity and root viability of ultradwarf bermudagrass subjected to heat and drought stress. *HortScience*, 57(10), 1328-1333.

TÜRKİYE'DE KÖRPE MISIR (BABY CORN)

Burhan Kara*, Mustafa Yılmaz**

1. GİRİŞ

Mısır, *Gramineae* familyasına ait, yazlık ve tek yıllık bir bitkidir. Farklı kullanım alanlarına sahip mısır tanesinde yaklaşık %71 nişasta, %10 protein, %9.5 şeker, yağ ve karoten, %2 kül ile vitamin A ve kalan miktarı ise çeşitli mineraller içermektedir (Özcan, 2009: 34). Dünya’da üretilen mısırın %27’si insan beslenmesinde, %73’ü ise hayvan yemi olarak kullanılmaktadır. Bu tüketim oranı ülkelerin gelişmişlik oranına bağlı olarak değişmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde %45.9’u hayvan beslenmesinde, %54.1’i insan beslenmesi ve sanayi hammaddesi olarak kullanılırken, gelişmiş ülkelerde hayvan yeminin payı %88.9’a ulaşmakta, hatta bu oran ABD’de %90’a yükselmektedir. Dünyada insan beslenmesinde tüketilen günlük kaloringin %11’i mısır bitkisinden sağlanmaktadır (Koç ve Çalışkan, 2016: 6; Alp ve Koca, 2020: 10). Dünya mısır üretiminin yüzde 37’si ABD’de, yüzde 22’si Çin’de gerçekleşmektedir. Diğer gelişmiş ülkeler de dünya mısır üretiminde önemli paya sahiptirler. Türkiye’de ise toplam hububat üretiminde %15.7 oranında payı olan mısır, buğday ve arpadan sonra üretim miktarı bakımından üçüncü sırada yer almaktadır. Türkiye’deki mısır üretiminin %68’ini tanelik, %32’sini ise silajlık mısır oluşturmaktadır (TÜİK, 2025). Ülkeler geliştikçe silaj ve tanesi kesif yem olarak hayvan beslenmesinde, haşlamalık, közlemelik, çerezlik vb. (şeker ve sert mısır) insan beslenmesinde, biyodizel ve değişik sanayi alanlarında kullanımı yükselir (Kara, 2017: 4).

Son yıllarda küresel ısınma nedeniyle azalan su kaynakları tüm ekstra sulanan bitkilerde olduğu gibi mısırın ekim alanlarını da gelecekte bir miktar kısıtlayabilir. Bu durumda birim alandan ve bitkilerden daha etkin

* Prof. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Isparta., e-posta: burhankara@isparta.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-4207-0539>

** Prof. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Sakarya. e-posta: mustafayilmaz@subu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5256-245X>

yararlanma yoluna gidilmelidir. Mısır, insan beslenmesinde, haşlamalık, közlemelik, çerez, nişasta, ekmek ve pop corn olarak geniş kullanım alanına sahiptir. Başta Çin ve Tayland olmak üzere mısırın insan beslenmesinde yeni bir kullanım alanı olan körpe mısır (baby corn) yüksek besleyici değeri ve farklı bir tada sahip olması nedeniyle ekonomik olarak gelişmiş toplumlarda ve özellikle turistik bölgelerde değerli bir gıda olarak yerini almıştır. Türkiye’de bazı büyük alışveriş merkezlerinde konserve olarak (turşu) raflarda yerini alsada henüz üretici ve tüketici tarafından yeterince tanınmamakta ve dolayısıyla üretimi yapılmamaktadır. Bu çalışmada; Türkiye için yeni bir ürün olan ve henüz tanınmayan körpe mısır (baby corn)’ın üretim olanakları, tarımın geliştirilmesi ve ticareti üzerinde durulacaktır.

2. NİÇİN KÖRPE MISIR?

1. Türkiye’de büyük marketlerde ve turistik bölgelerde her ne kadar konserve şeklinde tüketilse de taze tüketimi yoktur bu nedenle yeni bir sebze olarak üretimi yapılabilir.

2. Türkiye’de son yıllarda Ege bölgesinde şeker mısırı tarımı diğer mısır cinslerine göre daha fazla kardeşlenme ve bitkide birden fazla koçan oluşabilmesi nedeniyle giderek yaygınlaşmaktadır, Şeker mısırdan çıkan kardeşler koparılmaktadır. Bitkide tek koçan bırakılması şeker mısırdan koçan iriliğini artırmaktadır. Hem süt olum döneminde taze tüketilen koçan iriliğini artırmak için koparılan kardeşlerden hem de ana bitkide tek koçan bırakmak için koparılan koçanlardan körpe mısır üretimi gerçekleştirilebilir.

3. Bitki sıklığı artırılarak körpe koçan sayısının artırılması ile erken dönemde daha yüksek ücretle satılarak yüksek gelir elde edilebilir.

4. Körpe mısır kısa vejetasyon süresi nedeniyle Türkiye’de Orta Anadolu ve geçiş bölgelerinde yılda iki kere, Akdeniz bölgesinde ise üç kere ekim yapılarak hasat edilebilir. Ayrıca bu bölgelerde ara ürün olarak da kolaylıkla yetiştirilebilir. Bu durum hem işgücünün hem de arazinin daha etkili kullanımını sağlamaktadır.

5. Kısa vejetasyona sahip olması nedeniyle gübreleme miktarı, sulama sayısı ve diğer girdiler daha düşük olacaktır ve bu durum üretim maliyetini düşürecektir.

3. KÖRPE MISIR (BABY CORN) NEDİR?

Koçan püsküllerinin koçan tasladığından çıkışının görüldüğü 1 ilâ 3 gün içerisinde hasat edilen olgunlaşmamış yenilebilen koçanlara denir (Galinat, 1985: 5). Körpe mısır döllememiş yumurtalıklar topluluğu olarak da adlandırılabilir (Şekil 1).



Şekil 1. Körpe Mısır (Baby Corn)

3.1. Besin Değeri

Körpe mısır; düşük kalorili, nişasta içermeyen bir sebze olup, kalori bakımından brokoli, yeşil fasulye ve karnabahara benzerdir. Ayrıca körpe mısır; protein, ham selüloz, karbonhidrat ve lif içeriği fazla olup, sindirilebilirliği yüksek bir besin maddesidir. Bu nedenle beslenme mönüleri (diyet besini) için önemli bir sebze olabilir.

100 gr taze ve pişirilmemiş körpe mısırdaki 400 IU vitamin A, 0.3 mg tiamin, 0.12 mg riboflavin, 1.7 mg niasin, 2.0 mg askorbit asit (Çetinkol, 1989: 3), %31 a-B vitamini, %13 potasyum, %14 B-6, %10 riboflavin ve

%17 vitamin C içermektedir. Körpe mısır; %90.03 nem, %17.96 protein, %2.13 yağ, %5.3 kül ve %5.89 ham selüloz, 23.43 g/100 g toplam çözülebilir şeker, 1.96 g/100 g indirgenmiş şeker, 8.10 g/100 g selüloz, 5.41 g/100 g lignin, 5.43 mg/100 g askorbit asit, 670 mg/100 g b-karoten, 95.00 mg/100 g kalsiyum, 345.0 mg/100 g magnezyum, 898.62 mg/100 g fosfor, 0.05 mg/g metionin, 2.85 mg/g isolisin ve 0.675 mg/g lisin içerdiği belirlenmiştir (Hooda ve Kawatra, 2013: 5).

3.2. Kullanım Alanları

Körpe mısır genellikle çiğ olarak herhangi bir işleme tabi tutulmadan tüketilebilir, aynı zamanda dondurulmuş ve konserve olarak sandviçlerde, çorbalarda, pizzalarda, pirinç biryani, süslü gevrek hali ile sebze salatalarında, kızartılmış şekilde, turşu olarak, mısır pakora, mısır bajji ve shoup-suay (Çin yemeği) yapımında kullanılmaktadır (Satyanarayana, 1997:16; Najeeb vd., 2011: 14). Ayrıca örpe mısır pişirilerek de kullanılmaktadır. Hasat edildikten sonra yıkanmalı ve yumuşamaması için %5'lik alüminyum sülfat tuzu (alüminyum ve potasyum içeren solüsyon) içerisinde 45-60 dakika bekletilir, daha sonra %0.2'lik sitrik asit karıştırılmış su içerisinde 90-100 °C'de 10 dakika pişirilir. Pişirildikten sonra mısırlar musluk suyu soğukluğunda bir su dolu kap içerisinde soğuyuncaya kadar bekletilir. Daha sonra servis yapılır (Anonim, 2025). Hasattan sonra hızlı tüketilmesi durumunda hiçbir işleme tabii tutulmadan doğrudan veya pişirilerek de tüketilebilir.

3.3. Çeşit Seçimi

Körpe mısır yetiştiriciliğinde; koçan püskülü çıkışını takiben ilk 1-3 gün içinde hasat edilmektedir. Bu dönemde tahıllarda olum dönemleri göz önüne alındığında henüz nişasta ve protein birimi yoktur. Körpe mısırdaki Tayland ve Çin'de çok koçanlı (8-12 koçan) kendine has çeşitler mevcuttur. Türkiye'de henüz körpe mısır çeşitleri mevcut değildir. Bu nedenle körpe mısır yetiştirmek amacıyla mevcut, atdışi, sert, şeker ve cin mısır alt türleri kullanılmaktadır. Körpe mısır şeker birikiminden önce hasat edildiği için, şeker mısır kullanımının diğer mısır cinslerine göre tat bakımından bir avantajı yoktur. Fakat şeker mısır genetik olarak tüm bitkide şeker oranı daha yüksek, daha erkenci olması, kardeşlenme özelliğinin olması, kısa boylu olduğu için elle hasadının daha kolay olmasından dolayı tercih edilmektedir. Şeker mısır tohumluğunun pahalı olması ise dezavantajıdır. Hibrit çeşitler sentetik ve açıkta tozlanan çeşitlere göre önemli ölçüde yüksek verim vermektedir. Ayrıca hibrit

çeşitlerin üniform körpe mısır koçan boyu, çapı, bitki boyu, çiçeklenme, koçan püskülü çıkarma ve olgunlaşmasından dolayı avantajları vardır. Yağışlı bölgelerde ise açıkta tozlanan çeşitler olumsuz koşullara daha dayanıklı olmalarından dolayı üreticiler tarafında tercih edilmektedir. Çeşit seçiminde göz önüne alınması gereken başka bir faktör ise koçanın bitkiden kolay kopması ve körpe mısır yapraklarının kolay ayrılıyor olmasıdır. Bunun için özel ıslah edilmiş çeşitlerde mevcuttur (Anonim, 2026a). Kara vd. (2017: 5) farklı mısır alt türlerinin (atdışi, sert, cin ve şeker mısır) körpe koçan verimi, bazı körpe koçan özellikleri ve tane mineral besin içeriklerini karşılaştırmak amacıyla yürüttükleri çalışmada; körpe koçan boyu, çapı, verimi ve mineral besin içerikleri bakımından kullanılan tüm çeşitlerin körpe mısır olarak yetiştirilebileceğini bildirmişlerdir.

3.4. Standartları

Körpe mısır, Tayland Tarımsal Standartları (Thai Agricultural Standart - TAS 1504-2007)'na göre üç kalite sınıfına ayrılmıştır (Anonim 2026b).

3.4.1. Ekstra sınıf

Körpe mısır, bu kalite sınıfında süper kalite olarak pazarlanmaktadır. Körpe mısır uzunluğu 9.0-13.0 cm, tabanı düz kesilmiş, koçan yaprağı, sapı ve püsküllerden iyice temizlenmiş kusursuz bir görünüme sahip olması ve çok iyi bir paketleme yapılması gerekmektedir. Toplam koçan kusurları %0 olmalıdır.

3.4.2. Sınıf I

Körpe mısır, bu kalite sınıfında iyi kalite olarak pazarlanmaktadır. Körpe mısır uzunluğu 7.0-9.0 cm, tabanı düz kesilmiş, koçan yaprağı, sapı ve püsküllerden iyice temizlenmiş iyi bir görünüme sahip olması ve kaliteli bir paketleme yapılması gerekmektedir. Bu kalite sınıfında; körpe mısırın rengi kararmamalı ve şekli düz olmalıdır, koçan üzerindeki döllenenmiş yumurtalık sıraları düz olmalı, koçan üzerinde sürtme, çizilme ve diğer mekanik zararlarla oluşan yüzey kusurları olmamalı, toplam koçan kusurları %5'i geçmemelidir.

3.4.3. Sınıf II

Körpe mısır, bu kalite sınıfında yüksek kalite sınıfı olarak değerlendirilmemektedir. Fakat kalite için gerekli olan minimum özellikleri taşıması gerekir. Körpe mısırlar tabanı düz kesilmiş, koçan

yaprağı, sapı ve püsküllerden temizlenmiş ve iyi bir paketlenme yapılması gerekmektedir Körpe mısır uzunluğu 4.0-9.0 cm, koçanlar şekli düz ve kendine has renge sahip olmalı, düzensiz ve gelişmemiş yumurtalıklar olamamalı, koçan üzerinde sürtme, çizilme ve diğer mekanik zararlar olmamalı, toplam koçan kusurları %10'u geçmemelidir. Bütün körpe mısır sınıflarında koçan kalınlığı 1.0-2.5 cm arasında olmalıdır.

4. KÖRPE MISIRIN ANA ÜRÜN YETİŞTİRİCİLİĞİ

4.1. İklim İsteği

Mısır bir sıcak iklim bitkisi olup, ekiminden çimlenmesine, vejetatif dönemden generatif döneme kadar yüksek sıcaklık ve açık hava isteyen bir bitkidir. Mısır en düşük 10-12 °C toprak sıcaklıklarında çimlenip gelişebilir, ancak en yüksek çimlenme oranı 20-30 °C'de gerçekleşir. Çimlenen mısırın en ideal büyüme sıcaklığı 24-35 °C dolayındadır. Mısır bir sıcak iklim bitkisi olmasına rağmen aşırı sıcaklık isteyen bir bitki değildir. Sıcaklık 35 °C'nin üzerine çıktığı zaman toprak nemi yeterli olsa bile transpirasyonla kaybettiği suyu kökler vasıtasıyla karşılayamaz. Bu durum birkaç gün devam ederse hücre yapısı esnekliğini kaybeder ve tekrar eski formuna dönemez (Anonim, 2025). Tepe püskülü çıkışı ve tozlanma sırasında sıcaklık 33 °C'nin üzerine çıktığında üreme organlarındaki farklılaşma hızlanır, koçan püskülleri çabuk kurur. Bunun sonucu olarak da koçanda tane bağlama oranı azalır ve verim düşer. Gelişme periyodunda sıcaklığın 18 °C'nin altına düştüğünde büyüme yavaşlar. Mısır dona karşı oldukça hassastır ve önemli zarar görür. Yetiştirilmesi için 120-140 günlük don olmayan bir döneme ihtiyaç vardır. Son don olayının görüldüğü tarihten bir hafta sonra ekim yapılması gerekir.

Mısır bir C4 bitkisidir, yani yüksek ışığa ve CO₂ ihtiyaç duyar. Döllenmeden sonraki ilk birkaç gün, verimi etkileyen diğer faktörler gibi ışıklanma açısından da kritik bir dönemdir. Bu dönemdeki ışık eksikliği süreye ve çeşide bağlı olarak %90'a kadar verim kaybına neden olabilir.

4.2. Toprak İsteği ve Toprak Hazırlığı

Mısır bitkisinin toprak seçiciliği fazla değildir. Birçok toprak tipinde rahatlıkla yetiştirilebilir. Verimli ve drenajı iyi, derin, organik madde miktarı fazla, hafif kumlu, orta düzeyde siltli topraklar mısır üretimi için ideal topraklardır. Mısır bitkisi geniş pH aralığına iyi adapte olabilir ancak aşırı asit ve aşırı alkali topraklar mısır yetiştiriciliği için uygun değildir. En uygun pH düzeyi nötr ve hafif asidik (5.8-7.0) yapıya sahip topraklardır.

Mısır üretimi; toprak işlemez doğrudan anıza ekim, anızlı-malçlı toprak işleme, azaltılmış toprak işleme ve geleneksel toprak işleme yöntemleri ile yapılmaktadır. Geleneksel toprak işleme, tavın uygun olduğu güz aylarında yapılmalıdır. Toprağın 20 cm'lik kısmı ekim yatağı için gevşetilmeli, bahar aylarında hafif bir toprak işlemeyle tohum yatağı hazırlanmalıdır. Geleneksel toprak işlemede pulluk ve ikinci toprak işleme aletleri kullanılır ve daha iyi yabancı ot, hastalık ve zararlı kontrolü sağlanır. Gübre uygulaması kolaydır. Ancak makine ve yakıt gideri daha yüksektir.

Toprak işlemez doğrudan anıza ekimde toprağın en az %30'luk kısmı bitki artıklarıyla kaplıdır. Toprak işlemsiz yöntem toprağın ilk katmanlarındaki (0-15 cm) organik madde miktarına olumsuz etkilerde bulunurken, daha derinlerde (>15cm) ve pullukla işlemede ise olumlu etkilerde bulunmuştur. Düşük mazot gideri, zamanında ekim ve erozyonu önlemek, toprak nemini muhafaza gibi avantajları vardır. Ancak bunun yanında; muhtemel hastalık ve zararlı popülasyonuna karşı yüksek herbisit gideri, yeterli bilgi ve uygulama kültürü, gübre uygulama zorluğu ve yüksek maliyetli ekim makinası gibi dezavantajlı yönleri de vardır.

4.3. Ekim Zamanı, Derinliği ve Normu

Körpe mısır kısa süre içinde hasat (45-70 gün) edilme imkânı sunması nedeniyle ilkbahar son donlarından sonra birinci ürün, ikinci ürün ve ara ürün olarak ekimi yapılabilir. Mısırdaki ekim sıklığı tanelik, haşlamalık/közlemelik ve silajlık mısır yetiştirme amaçlarına göre daha sık tutulmalıdır. Kolay çapalama işlemi için sıra arası mesafe (70 cm) sabit tutulup sıra üzeri mesafe 10 cm'ye kadar ekim yapılabilir. Sık ekimin; koçan püskülü çıkarma başlangıcı dönemde hasat edildiği için körpe mısır uzunluğuna, büyüklüğüne, beslenmesine ve gelişmesine olumsuz etkisi yoktur. Körpe mısırdaki dekara 2.8-3.8 kg tohum ve dekara 11.250-12.500 adet bitki en uygun ekim sıklığını oluşturmaktadır (Anonim, 2025). Satyanarayana (1997:16) körpe mısırdaki uygun bitki sıklığı 11.250-12.500 bitki/da olduğunu bildirmiştir. Kara (2019: 4) birim alandan daha fazla sayıda körpe koçan elde etmek amacıyla "Baharcin" cins mısır çeşidi kullanılarak 70 cm × 18 cm mesafede her ocağa 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 tohum ekilmiş, çalışma sonucuna göre, daha yüksek körpe koçan verimi ve koçan sayısından dolayı ocağa 5-6 tohum ekimini önermiştir.

4.4. Sulama

Mısır için optimum ve minimum nispi nem değerleri sıcaklığa ve alınabilen su miktarına bağlı olmakla birlikte; genel olarak %60'ın altına düşmemesi gerekir. Nem %50 düzeylerine indiği zaman bitki maksimum transpirasyondan sonra stomalarını kapatmak zorunda kalır. Nemin %75'den %50'ye düşmesi su tüketimini iki katına çıkarır. Mısır kuraklığa çok toleranslı olmasa da ilk gelişme döneminde geçici kuraklığa dayanabilir. Ancak bu kuraklık ciddi verim kaybına neden olur. Yıllık yağış miktarı 650 mm'den fazla olan bölgelerde kritik gelişme dönemlerinde daha az ilâve (3-4 sulama) sulama ile mısır yetiştirilebilmektedir. Ancak maksimum verim için yıllık yağış toplamının 1.000-1.200 mm/yıl aralığında olması gerekmektedir. Körpe mısır yetiştiriciliğinde vejetasyon dönemi yarıya hatta 1/3 daha kısalmaktadır bu nedenle sulama suyu sayısı da aynı oranda azalmaktadır. Körpe mısırdaki ekimi müteakip çıkış için bir kere yağmurlama sulama yapılmalıdır. Mısırın ilk gelişme dönemlerinde atmosfer sıcaklığı çok yüksek değildir ve ilkbahar (Nisan-Mayıs) yağışları devam edebilir. İklim koşullarına (yağmur) göre bitkinin su ihtiyacı takip edilerek sapa kalkma dönemi, minyatür başak oluşturma (diz boyu) dönemi ve koçan püskülü çıkarma döneminde olmak üzere tarla kapasitesinde üç kere sulama yeterli olmaktadır (Ertek ve Kara, 2013: 6).

4.5. Gübreleme

Mısır bitkisinde gübreleme geleneksel mısır yetiştiriciliği ile aynıdır. Ancak körpe mısırdaki koçan püskülü çıkışından itibaren ilk 3 günlük süre içerisinde hasat edilmesi nedeniyle vejetasyon (körpe mısırdaki süt olum, sarı olum ve fizyolojik ve tam olum periyotları körpe mısır için hasat sonrası dönemlerdir) süresi yaklaşık iki aylık bir süre daha kısalmaktadır. Bu nedenle döllenmeden önce hasat edilen körpe mısırdaki gübreleme tane amaçlı ya da taze tüketime yönelik olarak süt olum döneminde hasat edilen mısıra göre (NPK gübre) azaltılabilir. Satyanarayana (1997: 16) körpe mısırdaki uygun gübreleme miktarı 15-20 kg/da azot, 6 kg/da P_2O_5 ve 4 kg/da K_2O olarak belirlemiştir. Yürütülen çalışmalarda körpe mısırdaki Bindhani vd. (2007: 4) 120 kg N, Biswas vd. (2021: 8), 20 kg/da N ve Vamshi ve Sahoo (2022: 6), 160 kg/da azotun iki veya üç eşit miktarda (ekimle, sapa kalkma/diz boyu dönemleri) uygulanmasını önermişlerdir.

4.6. Yabancı Ot Mücadelesi

Türkiye’de mısır ekilen hemen bütün bölgelerimizde; tarla sarmaşığı (*C. arvensis*), sirken (*C. album*), horozibiğı (*Amaranthus* spp.) türleri, domuz pıtrağı (*X. strumarium*), topalak (*C. rotundus*), semizotu (*P. oleraceae*), kanyaş (*S. halepense*), bozot (*H. Europaeum*) ve kirpi darı (*Setaria* spp.) türleri yaygın yabancı otlardır. Kimyasal ilâçlama, mekanik ve fiziksel mücadele, temiz tohum ve ekim nöbeti yabancı otlarla mücadele olarak yapılabilir (Kitiş, 2021: 13).

Mısırdaki gelişmenin ilk dönmlerinde yabancı otlarla mücadele etmek ve toprağı havalandırmak için fide boyu 5-10 cm boyunda iken ilk çapalama yapılır. İlk çapalamada fide köklerine zarar vermemek için daha yüzlek bir çapalama yapılmalıdır. İlk çapalamanın geç kalması durumunda hızlı büyüyen yabancı otlar çapalamayı zorlaştırabilir ve fide köklerine zarar verilebilir. Bitki 20-25 cm boylandığında boğaz doldurma yapılmalıdır. Boğaz doldurma ile birlikte birinci çapalamadan sonra gelişen yabancı otlar yok edilir ve toprak havalandırılmış olur. Boğaz doldurmadan sonra bitki hızlı bir gelişme göstererek sıra aralarını kapatır ve hem yabancı otların gelişmesi engellenmiş hem de toprak nemini muhafaza edilmiş olur. Çapalama elle ve traktörle çekilen çapa makinesiyle yapılabilir. Ancak çapa makinesiyle yapılması durumunda sıra üzerindeki yabancı otlar ilâçlama ile yok edilmelidir.

4.7. Hastalık ve Zararlıları

Mısırdaki tohum, fide ve kök-kökboğazı çürüklükleri (*Pythium* spp., *Fusarium* spp., *Rhizoctonia* spp., *Macrophomina phaseolina*) ve mısır راستığı (*Ustilago maydis*) mısır bitkisinin en önemli ve en yaygın fungal hastalıklarındandır. Bu hastalıkların bazıları primer olarak koçanda meydana gelmekle birlikte bitkinin sap, boğumlar, püskül, yaprak, yaprağın gövdeyle birleştiğı kısımlarda belirti oluşturur. Mısır yaprak yanıklığı *Bipolaris* (= *Helminthosporium*) *maydis* (Teleomorf: *Setosphaeria turcica*), güney (*Maydis*) yaprak yanıklığı (*Exserohilum* (= *Helminthosporium*) *turcicum* (Teleomorf: *Cochliobolus hete rosporus*), kuzey (*Turcicum*) yaprak yanıklığı, mısır pası (*Puccinia sorghi*), bakteriyel solgunluk (*Pantoea stewartii*), mısır çürüklüğü (*Erwinia chrysant*, *Enterobacter dissolvens*), mısır çizgi virüsü, mısır mozaik virüsü, mısır cücelik mozaik virüs hastalığı yaygın olarak görülen diğer hastalıklardır. İlâçlı mücadele, mısır ve diğer tahıllar haricinde alternatif ve konukçusu olmayan kültür bitkileriyle ekim nöbeti yapılabilir. Karantina tedbirleri ve

dayanıklı çeşit kullanılmalıdır. Tarlada bitki artıkları temizlenmeli ve iyi bir sürüm yapılmalıdır (Özkaya, 2021: 10).

Mısırdaki mısır kurdu (*Ostrinia nubilalis* Hübn.), mısır koçan kurdu (*Sesamia nonagrioides* Lefebvre), mısır yaprak kurtları (*Pseudaletia* (=Mythimna) *unipuncta* Haworth, *Acantholeucania* (=Mythimna) *loreyi* Dup., bozkurtlar (*Agrotis ipsilon*, *Agrotis segetum*), mısır maymuncuğu (*Tanymecus dilaticollis* Gyll.), mısırdaki pamuk yaprak kurdu (*Spodoptera littoralis* (Boisd.), mısırdaki çizgili yaprak kurdu (*Spodoptera exigua* (Hübn.), mısır iki noktalı kırmızı örümcek (*Tetranychus urticae* Koch.) ve mısırdaki tel kurtları (*Agriotes* spp., *Melanotus fuscipes* Gyllenhal, *Cardiophorus cyanipennis*) yaygın olarak zarar yapmaktadır. Koçan kurdu koçan püskülü çıkardıktan sonra başka bir deyişle bu zararlı etkin olmadan önce körpe mısır hasat edilmektedir. Dolayısıyla koçan kurdu körpe mısır için önemli bir zarar yapmamaktadır. Yukarıda bahsedilen diğer zararlılara karşı yüzey ve tohum ilaçlaması, doğal düşmanlar, hasattan sonra bitki artıkları tarladan uzaklaştırılmalı, derin toprak işleme ve tam doyuran sulama ile larva ve bitki artıkları toprağa gömülmesi şeklinde mücadele edilebilmektedir (Yorulmaz, 2021: 7).

4.8. Hasat ve Harman İşlemleri

Körpe mısır taze olarak tüketildiği için hasat zamanı kaliteyi etkileyen en önemli faktörlerin başında gelir. Erken hasat kalite/verim bakımından dezavantaj oluştururken, geç hasatta ise döllenme olup tane oluşmaya başlamasından dolayı kaliteyi olumsuz etkilemektedir. Körpe mısır elle hasat edilmektedir. Hasat; koçan püskülünün görünmesini takiben 1-2 gün içerisinde yapılmalıdır (Şekil 2) Anonim (2026a).



Şekil 2. Hasat Döneminde Kavuzlu ve Kavuzsuz Körpe Koçanlar

Galinat (1985: 6) ekimden yaklaşık 60-70 gün içerisinde körpe mısır hasadının yapılabilindiğini, Bar-Zur ve Schaffer (1993: 4) koçan püskülü çıkardıktan 0-6 gün içinde ve ekimden 45 gün sonra hasat edilebileceğini, Satyanarayana (1997: 16) körpe mısırdan en uygun hasat zamanının koçan püskülü çıktıktan 2-4 gün sonra, Anonim (2025) 2-3 gün ve 45-50 gün sonra ve Bar-Zur ve Saadi (1990: 4) ise 3 gün sonra olarak belirlemişlerdir. Kara ve Bozkurt (2018: 6), en uygun körpe mısır hasadının koçan püskülü çıkışından itibaren 2 ile 4 gün arasında yapılmasını önermişlerdir. Yıldırkan ve Kara (2020: 4), Burdur ikinci ürün koşullarında 50-76 gün arasında körpe koçan hasadı yapıldığını bildirmişlerdir.

Körpe mısır hızlı bir şekilde büyür ve sertleşir, aynı zamanda hızlı besin kaybına uğramaktadır. Bu nedenle hasattan hemen sonra tüketilmeli veya pazarlanmalıdır. Dolayısıyla körpe mısırlar 2-3 gün aralıklarla sık hasat yapılması gerekir. Hasat periyodu 2-4 hafta kadar sürebilir. Bu periyodu uzatmak için farklı zamanlarında ekim yapılmalıdır.

4.9. Depolama ve Muhafaza

Mısırdan gerek tane gerekse taze ve körpe mısır hasadında nem genellikle yüksektir (Şekil 3).



Şekil 3. Depolama İçin Uygun Körpe Mısır Koçanları

Körpe mısır koçan püskülü çıkarma döneminde hasat edildiği için nem oranı oldukça yüksektir ve körpe koçanlarda kısa sürede solma ve buruşma olmaktadır. Bu nedenle maksimum kaliteyi sağlamak için hasadı müteakip koçan yaprakları soyulmadan +4 °C de buzdolabı veya soğuk hava depolarında alınarak muhafaza edilebilir. Körpe mısır koçan kabukları soyulduktan sonra da kalitesini kaybetmeden bir haftaya kadar buzdolabında saklanabilir. Aynı zamanda derin dondurucuda muhafaza etmek için ise kabukları soyulmuş mısır koçanlarını 30-45 saniye kaynar suya veya buhara maruz bırakıldıktan sonra derin dondurucuda dondurarak saklanabilir (Anonim, 2026a). Soğuk hava koşullarında solunum ve etilen üretimi azalır, dolayısıyla ürünlerde ağırlık kaybı azalır, olgunlaşma gecikir ve ürünün ömrü uzar (Weichmann, 1986: 26). Düşük sıcaklıklarda artan CO₂ etilen üretimini, solunumu, enzimatik faaliyetler ve aktif hücre çoğalmasını azaltarak depo besin maddelerinin yakılmasını engellemektedir (Arslan vd., 1996: 93). Kara ve Şahin (2012: 9), şeker mısır kontrol, +4 °C ve derin dondurucuda depolanmış ve +4 °C ve derin dondurucuda muhafaza edilen şeker mısırın şeker miktarındaki kayıpların kontrole göre önemli ölçüde azaldığını bildirmişlerdir.

5. KÖRPE MISIRIN ARA ve İKİNCİ ÜRÜN YETİŞTİRİCİLİĞİ

Körpe mısır mevcut mısır alttürlerine bağlı olarak 45-70 gün aralığında hasat edilebilmektedir Türkiye’de bütün bölgelerde birinci ürün, Akdeniz, İç Anadolu, Marmara ve Geçiş bölgelerinde buğday hasadından sonra sulama olanaklarına bağlı olarak II. ürün ve ara ürün olarak yetiştirilebilir. Ayrıca uzun kış mevsiminin yaşandığı karasal iklim bölgelerinin kısa yaz

aylarında başarıyla yetiştirilebilir. Birlikte ekim sistemi içerisinde birçok sebze ile aynı alanda ve zamanda yetiştirilmeye uygundur (Anonim, 2026b). Kara (2017: 5), karasal iklim koşullarının hüküm sürdüğü Isparta merkez ikinci ürün koşullarında bazı atdışi mısır çeşitleri kullanılarak körpe mısır yetiştirme olanaklarının araştırıldığı çalışmada, incelenen özellikler yönünden TAS 1504-2007 standartlarına göre körpe mısır olarak değerlendirilebileceği belirlenmiştir. Yıldırkan ve Kara (2020: 4), Burdur koşullarında ikinci ürün olarak körpe mısır yetiştirme olanaklarını araştırmak amacıyla yürüttükleri çalışmada, Burdur'da ikinci ürün koşullarında 50-76 gün arasında TAS 1504-2007 standartlarına göre körpe koçan hasadı yapılabildiğini bildirmişlerdir. Türkiye'de sulanabilen tarım arazilerinde; ara ürün, ikinci ürün ve birçok sebze ile birlikte ekim imkânları kullanılarak, diğer bitkilerin ekim alanlarını fazla etkilemeden körpe mısır üretimi kolaylıkla yapılabilir.

Körpe mısır kısa sürede hasat edilmesi nedeniyle birlikte ekime uygundur. Körpe koçanlar döllenenmeden önce hasat edildiği için toprağın besin maddesini fazla kullanmaz ve dolayısıyla toprağı sömürmez. Bu nedenle birlikte ekildiği arkadaş bitkinin gelişimini ve besin element alımını olumsuz etkilemez.

6. KÖRPE MISIRDA VERİM ve KALİTE

6.1. Verim

Körpe mısırdaki verim; hasat zamanına, ekolojik koşullara, bakım işlemlerine (gübreleme, sulama, çapalama, vb.) ve en önemli faktör olan çeşide (körpe mısır için geliştirilmiş 8-12 adet çok koçanla çeşitler) göre değişmektedir. Yapılan çalışmalarda körpe mısır verimi; açıkta tozlanan çeşitlerde 4.66-7.5 ton/ha ve hibrit çeşitlerde 9.38-15.0 ton/ha arasındadır (Anonim, 2026a). Najeeb vd. (2011: 85) körpe mısır veriminin 11.5-12.0 ton/ha olduğunu ve en önemli körpe mısır üreticisi olan Tayland'da verimin 8.0 ton/ha olduğunu bildirmişlerdir. Başka bir çalışmada Tayland'da körpe mısır verimi 7214.4 kg/ha olarak rapor edilmiştir (Anonim, 2026b). Yine Tayland'da yapılan bir çalışmada körpe mısır verimi koçan yapraklı 5000-6250 kg/ha ve 625-1094 kg/ha olarak rapor edilmiştir (Anonim, 2025). Kara ve Bozkurt, (2018: 5) körpe mısır koçan sayısı, körpe koçan boyu, çapı, ağırlığı ve verimi sırasıyla, 8086.4-8457.9 adet/da, 9.07-16.16 cm, 11.04-18.13 mm, 16.31-43.58 g, 130.54-266.69 kg/da. Yıldırkan ve Kara (2020:4) koçan püskülü çıkarma süresi, körpe koçan boyu, çapı, ağırlığı, verimi ve körpe koçan sayısı sırasıyla, 53,0-58,1

gün, 9,8-18,6 cm, 16,3-18,6 mm, 16,9-22,5 g, 191,9-342,3 kg/da ve 10618,7-21110,3 adet/da arasında değiştiğini bildirmişlerdir.

6.2. Kalite

Körpe mısır üretiminde hibrit veya açıkta tozlanan çeşitlerin kullanılmasının kalite bakımından bir farklılıkları yoktur. Fakat hibrit tohumların kullanımı açıkta tozlanan çeşitlere göre körpe mısır verimini artırmaktadır (Anonim, 2026a).

Körpe mısırdaki kalite verimden daha önemlidir. Körpe mısır; uzunluğu, çapı, sıraların düzgün olması, tabandan uca doğru düzenli bir şekilde incilmesi ve kararmaması uluslararası pazarlamada tercih edilmektedir. Körpe mısır hasattan sonra hızlı bir şekilde büyür, bu nedenle kalite düşer. Bunu önlemenin yolu ya hemen tüketiciye ulaştırılmalı ya da 2-3 gün aralıklarla hasat edilmelidir. Ayrıca farklı zamanlarda ekim yaparak, hasat periyodu uzun tutulmalı (2-4 hafta), nem ve kaliteyi sürdürmek için yapraklar ayrılmalı ve hemen soğuk hava depolarında muhafaza edilmelidir (Anonim, 2026a).

7. KÖRPE MISIR TİCARETİ ve YAN ÜRÜNLER

7.1. Ticareti

Körpe mısır; taze, dondurulmuş ve konserve olarak farklı şekillerde değerlendirilmektedir. Dünyada en fazla körpe mısır üreten ülkeler; Tayland, Sri Lanka, Çin, Tayvan, Zambiya, Güney Afrika, Kostarika, Guatemala ve Honduras'tır. En fazla tüketici ülkeler ise; İngiltere, ABD, Hollanda, Kanada, Almanya, Malezya, Tayvan, Japonya ve Avustralya gibi gelişmiş ülkelerdir. Bu ülkelerde; taze, dondurulmuş ve konserve körpe mısır giderek popüler sebzeler arasına girmektedir. Bu ülkeler ihtiyaçlarını Uzakdoğu ülkelerinden özellikle de Tayland'dan karşılamaktadırlar. Tayland ürettiği körpe mısıрын yaklaşık %40-45'ini ihraç etmektedir. Dünya körpe mısır ticaretinin yaklaşık %80'ni tek başına Tayland tarafından yapılmaktadır ve yaklaşık 30 ülkeye körpe mısır, 100 ülkeye ise tatlı mısır ihracatı gerçekleştirmektedir (Anonim, 2025). Türkiye'de henüz çok az bilinmekle birlikte bu ürünün tanınması ve üretilmesi ile daha yakın olan Avrupa ülkelerine ihraç edilerek yüksek ekonomik gelir elde dileyebilir.

7.2. Yan Ürünler

Mısır; tane ve yeşil aksam olarak birim alandan yüksek verim elde edilen ve etkin bir şekilde değerlendirilen bir bitkidir. Mısır modern hayvancılığın kaliteli kaba yem (silaj) olarak önemli bir paya sahiptir. Mısırın yeşil aksamının baklagiller familyası ve kesif yemlere göre protein açısından daha düşük olsa da miktar bakımından önemli bir protein kaynağı olup, diğer bütün tahıl türlerine göre yemlik değeri ve yeşil aksam verimi yüksektir. Körpe mısır hasadından sonra kalan sap ve koçan yaprağı gibi yan ürünler taze ot olarak hayvan beslenmesinde kullanılabilir. Mısır hayvan beslenmesi için önemli mineraller ve vitaminler içerir. Mevcut çeşitlerin kullanılması durumunda tek başına körpe mısır üretimi ekonomik olamayabilir bu nedenle, hasattan sonra kalan bitki kısımların yeşil yem olarak hayvancılık yapan işletmeler ve küçük aile işletmeleri için daha uygun bir üretim şekli olabilir. Bakshi vd. (2017: 8), körpe mısır hasadından sonra yeşil aksamda ham protein (%10-11'e karşı %9,2-10), organik madde (%92,4'e karşı %91,5), sindirilebilirlik, toplam uçucu yağ asitlerinin üretimi ve metabolize edilebilir enerjinin kullanılabilirliğinin bakımından geleneksel mısır yemine kıyasla daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Wadhwa vd. (2018: 5) körpe mısır silajının besin değerinin yüksek olduğunu ve ruminant beslenmesinde kullanılabileceğini bildirmişlerdir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Körpe mısır hakkında yapılan çalışmalar ve incelemeler ile edinilen bilgiler ışığında aşağıdaki öneriler yapılabilir.

1. Körpe mısır çeşitleri geliştirilerek birim alandan daha fazla koçan elde edilmektedir. Bu nedenle körpe mısır çeşitlerinin geliştirilme çalışmalarına önem verilmelidir.

2. Mısır kısa dönemde hasat edilmesi, gübrenmesi, sulanması ve bir çapa bitkisi olması nedeniyle iyi bir münavebe ve ara bitkisi olarak üretim planlamasına alınabilir.

3. İkinci ürün koşullarında erkenciliği sağlamak için fide ile üretim (Türkiye'de yaygın değildir) ve direk anıza ekim yöntemi ile üretimi artırılabilir.

4. Mısırdan daha etkin faydalanmak için hasat amacına göre (taze tüketim ve tohum) bir koçan ana üretim hedefi için ayrılıp, diğer koçanlar farklı tüketim amacıyla hasat edilebilir. Örneğin şeker mısırdan bir koçan

taze tüketim amacıyla bırakılıp bitkideki diğer koçanlar körpe mısır amacıyla koçan püskülü çıkarma devresinde, sert mısırdaki çok koçan bağlayan bitkilerde bir koçan tane hasadı için bitki üzerinde bırakılıp, bir koçan taze tüketim için süt olum döneminde ve diğer koçanlar körpe mısır olarak hasat edilebilir. Mısırdaki hibrit bitki ıslahında tek koçanlılık istenen bir özelliktir. Bu nedenle mısır bitkisi üzerinde tek koçan bırakılarak diğer koçanların farklı tüketim amacıyla hasat edilmesi ile hem istenen tek koçanlılığı sağlamış hem de bitkiden daha etkin faydalanılmış olacaktır.

5. Çift sıralı ekim yöntemi: Mısırdaki geleneksel orak belirli bir sıra aralığı ve üzeri mesafede tek sıra halinde mısır ekim yöntemi uygulanmaktadır. Mısırdaki belirlenen sıra aralığı değiştirilmeden her sıraya 10-12 cm aralıklarla iki sıra şeklinde yapılan ekim yöntemine çift sıralı ekim yöntemi denilmektedir. Özetle her hat tek değil iki sıradan oluşmaktadır. Bu ekim yöntemi; tüm dünyada giderek azalan ekim alanlarının daha etki kullanılması ve birim alandan daha yüksek verim alınması bakımından önemli bir uygulamadır. Kırılmaz ve Marakoğlu (2018: 7) tarafından yapılan çalışmada çift sıralı ekim yönteminde dekara 2.233 kg tane mısır alınırken tek sıra ekim yönteminde 1.526 kg/da tane verimi elde etmişlerdir. Bu yöntemle sıranın biri körpe mısır olarak, diğeri tane ya da haşlamalık olarak hasat edilebilir.

6. Türkiye’de ithal edilen mısırlara karşı GDO’lu olma ihtimalinden dolayı olumsuz bir önyargı oluşmuştur. Bu önyargı ithalatı azaltıp çiftçimizin desteklenmesi ile mısır üretiminde önemli artışlar sağlamıştır.

Sonuç olarak; Türkiye’de sulanabilen tarım arazilerinde ara ürün, ikinci ürün ve birçok sebze ile birlikte ekim imkânları kullanılarak, diğer bitkilerin ekim alanlarını fazla etkilemeden körpe mısır üretimi kolaylıkla yapılabilir. Tüm dünyada özellikle gelişmiş ülkelerde körpe mısırın tanınması ve kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu ülkeler ihtiyaçlarını uzak doğu ülkelerinden, özellikle Çin ve Tayland’dan karşılamaktadırlar. Türkiye’de körpe mısırın yukarıda belirtilen alternatif tarım teknikleriyle etkin bir şekilde üretilmesi ve tanınması ile hem ülke içinde alternatif bir üretim şekli ve besin kaynağı oluşabilir hem de daha yakın olan Avrupa ülkelerine ihraç edilerek yüksek ekonomik gelir elde edilebilir.

KAYNAKÇA

- Alp, O. ve Koca, Y.O. (2020). Aydın bölgesinde yetiştiriciliği yapılan bazı mısır (*Zea mays* L.) çeşitlerinin tane ve hasıl verimlerinin belirlenmesi. *Ziraat Mühendisliği*, (369), 30-45. DOI: 10.33724/zm.687235.
- Anonim, (2025). *Baby corn production, processing and marketing in Thailand*. Report Submitted to Field Fresh Foods Pvt. Ltd. Gurgaon, India. <http://www.volkerkleinhenz.com/publications/baby-corn-production-processing-and-marketing-in-thailand> (E.T: 26.03.2026).
- Anonim, (2026a). Baby corn. <http://www.uky.edu/Ag/CCD/introsheets/babycorn.pdf> (E.T: 26.03.2026).
- Anonim, (2026b). *TAS 1504-2007*. http://www.acfs.go.th/standard/download/eng/baby_corn.pdf (E.T: 26.03.2026).
- Arslan, N., Yılmaz, G. ve Karadağ, Y. (1996). *Tarla ürünlerinde standardizasyon ve depolama*. Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No: 13, Ders Notları Serisi No:7, Tokat.
- Bar-Zur, A. ve Saadi, H. (1990). Prolific maize hybrids for baby corn. *Journal of Horticulture Science*, 65(1), 97-100.
- Bar-Zur, A. ve Schaffer, A. (1993). Size and carbohydrate content of ears of baby corn in relation to endosperm type. *American Soc. Horticulture Science*, 118(1), 141-144.
- Bakshi, M.P.S., Wadhwa, M. ve Balwinder, K. (2017). Nutritional evaluation of baby corn fodder and conventional maize fodder in buffaloes. *Livestock Research for Rural Development*. 29(7), 1-9.
- Bindhani, A., Barik, K.C., Garnayak, L.M. ve Mahapatra, P.K. (2007). Nitrogen management in baby corn (*Zea mays*). *Indian Journal of Agronomy*, 52 (2), 135-138.
- Biswas, P.K. Sarna N.J. ve Shome, S. (2021). Influence of nitrogen dose and application method on growth and yield of baby corn. *Bangladesh Agronomy Journal*, 24(2), 83-90.
- Çetinkol, M. (1989). Tatlı mısır üretimi. *Hasad Aylık Tarım ve Hayvancılık Der.*, 4(46), 20-23.
- Ertek A. ve Kara B. (2013). Yield and quality of sweet corn under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 129, 138-144. Doi: 10.1016/j.agwat.2013.07.012
- Galinat, W.C. (1985). Whole ear baby corn, A new way to eat corn. *proc. Northeast Corn Improvement Conf.*, 40, 22-27.
- Hooda, S. ve Kawatra, A. (2013). Nutritional evaluation of baby corn (*Zea mays* L.). *Nutrition & Food Science*, 43 (1), 68-73.
- Kara, B. ve Şahin, M. (2012). Soğukta depolamanın şeker mısırın şeker ve kuru madde değişimine etkisi. *Derim Dergisi*, 29 (2), 11-20.
- Kara, B. (2017). Karasal iklim koşullarında ikinci ürün körpe mısır (baby corn) yetiştirme olanakları. *Tarım Türk Dergisi*, 65, 22-26.
- Kara, B., Gündüz, A., Işık, C. ve Şener, A., 2017. Farklı mısır (*Zea mays* L.) alt türlerinin körpe mısır özelliklerinin karşılaştırılması. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi (UTYHBD)*, 3(2), 95-99.
- Kara, B ve Bozkurt, H. (2018). Mısırdaki körpe koçan verim ve özelliklerine hasat zamanlarının etkisi. *Derim*. 35(1), 61-66, <https://doi.org/10.16882/derim.2018.322433>.
- Kara, B. (2019). Ocakta tohum sayısının körpe mısır verimine ve bazı özelliklerine etkisi. *Akademik Ziraat Dergisi*, 8(1), 93-96. <https://doi.org/10.29278/azd.593820>
- Kitiş, Y.E. (2021). Mısır tarımı. *Tarım Gündem Dergisi*, 78-90.
- Kırılmaz, H. ve Marakoğlu, T. (2018). Tanelik mısır üretiminde çift sıra ekim yöntemlerinin verim ve verim parametrelerine etkisi. *Selçuk Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 32 (3), 297-304. DOI: 10.15316/SJAFS.2018.97

- Koç, A. ve Çalışkan, A. (2016). Azotun silaj verimine ve silaj kalitesine etkisi. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 25 (Özel sayı-2), 265-271.
- Najeeb, S., Rather, A.G., Sheikh, F.A., Ahanger, M.A. ve Teli, N.A. (2011). Baby corn (*Zea mays* L.): A means of crop diversification under temperate conditions of Kashmir. *Maize Genetics Cooperation Newsletter*, 85.
- Özcan, S. (2009). Modern dünyanın vazgeçilmez bitkisi mısır: genetiği değiştirilmiş (Transgenik) mısırın tarımsal üretime katkısı. *Türk Bilimsel Derlemeler Der.*, 2(2), 01-34.
- Özkaya, H.Ö. (2021). Mısır tarımı. *Tarım Gündem Dergisi*, 65-76.
- Satyanarayana, E. (1997). *Business line and the India*. Information January 16.
- TÜİK, (2025). *Türkiye İstatistik Kurumu*, 2025.
- Vamshi, O. ve Sahoo, S.C. (2022). Response of baby corn (*Zea mays* L.) to levels of nitrogen and detasseling. *International Journal of Plant & Soil Science*, 34(20), 283-288.
- Wadhwa, M., Kumar, B. ve Bakshi, M.P.S. (2018). Nutritional evaluation of ensiled baby corn fodder as livestock feed. *Animal Nutrition and Feed Technology*, 18, 267-272 DOI: 10.5958/0974-181X.2018.00025.2
- Weichmann, J. (1986). The effect of controlled-atmosphere storage on the sensory and nutritional quality of fruits and vegetables. *Horticulture Review*, 8, 101-127.
- Yıldırkan, Ü. ve Kara, B. (2020). Burdur koşullarında ikinci ürün körpe mısır yetiştirme olanakları. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9 (1), 114-117. doi:10.46810/tdfd.716183.
- Yorulmaz, S. (2021). Mısır tarımı. *Tarım Gündem Dergisi*, 58-64.

TATLI MISIR (*Zea mays saccharata* Sturt.)'İN ÖNEMİ, YETİŞTİRİCİLİĞİ VE KALİTE ÖZELLİKLERİ

Alpaslan Kuşvuran*, Şebnem Kuşvuran**

GİRİŞ

Mısır (*Zea mays* L.), uzun süren kültüre alma, seleksiyon ve ıslah süreçleri sonucunda tane morfolojisi, endosperm yapısı, kimyasal bileşimi, adaptasyon yeteneği ve kullanım amacı bakımından oldukça geniş bir çeşitlilik kazanmış kültür bitkilerinden biridir. Arkeolojik ve biyolojik bulgular, mısırın kökeninin Meksika ile ilişkili olduğunu ve kültüre alınma sürecinin yaklaşık 7000-10.000 yıl öncesine kadar uzandığını göstermektedir. Bu süreçte kökeni olan yabani formlardan morfolojik ve biyokimyasal olarak farklılaşan mısır, zaman içerisinde çok farklı çevre koşullarına uyum sağlayarak insan beslenmesi, hayvan besleme ve çeşitli endüstriyel kullanım alanları açısından dünya tarımının önemli ürünlerinden biri hâline gelmiştir (Gwirtz ve Garcia-Casal, 2014; Ranum vd., 2014).

Mısırdaki ortaya çıkan geniş varyasyon, özellikle tane büyüklüğü ile endospermin miktarı, yapısı ve tane içerisindeki dağılımı esas alınarak farklı tane tiplerinin tanımlanmasına yol açmıştır. Bu kapsamda mısırlar geleneksel olarak at dişi mısır [dent; *Zea mays* var. *indentata* (Sturtev.) L.H. Bailey], sert mısır [flint; *Zea mays* var. *indurata* (Sturtev.) L.H. Bailey], unlu mısır [flour; *Zea mays* var. *amylacea*], mumlu mısır [waxy; *Zea mays* var. *ceratina*], cin mısır [popcorn; *Zea mays* var. *everta*], tatlı mısır [sweet corn; *Zea mays* var. *saccharata* (Sturt.) L.H. Bailey] ve kavuzlu mısır [pod corn; *Zea mays* var. *tunicata* A.St.-Hil.] gibi gruplarda değerlendirilmektedir. Bu adlandırmalar tarihsel ve morfolojik sınıflandırmalarda yaygın olarak kullanılmakla birlikte, güncel taksonomik yaklaşımlarda söz konusu tiplerin büyük bölümü *Zea mays* L. subsp. *mays* kapsamında değerlendirilmektedir. Bununla birlikte bu ayrım,

* Prof. Dr., Çankırı Karatekin Üniversitesi, Gıda ve Tarım Meslek Yüksekokulu, Park ve Bahçe Bitkileri Bölümü, Çankırı, akusvuran@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5252-6261>

** Prof. Dr., Çankırı Karatekin Üniversitesi, Gıda ve Tarım Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Çankırı, skusvuran@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1270-6962>

doğal akrabalık ilişkilerini yansıtan taksonomik bir sınıflandırmadan ziyade, tane ve endosperm özellikleri temelinde geliştirilmiş geleneksel bir gruplandırmadır. Kavuzlu mısır dışında bu gruplar arasındaki temel farklılıklar büyük ölçüde endospermin niteliği, miktarı ve tane içerisindeki dağılımıyla ilişkilidir. Ayrıca bazı özel mısır tiplerinin oluşumunda tek veya az sayıda genetik farklılık belirleyici olabilmektedir. Örneğin *sugary1* (*su1*) genindeki resesif alleller şeker birikimini artırarak şekerli endosperm tipinin oluşmasına neden olurken, *waxy1* (*wx1*) genindeki değişiklikler endosperm nişastasının yapısını değiştirerek mumlu mısır tipini oluşturmaktadır (Gwirtz ve Garcia-Casal, 2014; Ranum vd., 2014).

Bu grupların adlandırılmasında tarihsel botanik literatür ile güncel kültür bitkisi terminolojisi arasında bazı farklılıklar bulunmaktadır. UPOV'un güncel sınıflandırmasında mısır *Zea mays* L. subsp. *mays* kapsamında ele alınmakta; mısır, cin mısır ve tatlı mısır gibi gruplar ayrı grup adları altında değerlendirilmektedir. Tarihsel literatürde ise at dişi mısır için *Zea mays* var. *indentata* (Sturt.) L.H. Bailey, sert mısır için *Zea mays* var. *indurata* (Sturtev.) L.H. Bailey, mumlu mısır için *Zea mays* var. *ceratina*, cin mısır için *Zea mays* var. *everta* ve tatlı mısır için *Zea mays* var. *saccharata* (Sturt.) L.H. Bailey gibi tür altı taksonomik adlar kullanılmıştır (UPOV, 2025). Bu nedenle söz konusu tiplerin birbirinden bağımsız taksonomik alt türler olarak değil, türler arasındaki farklı tane, endosperm ve kullanım grupları olarak değerlendirilmesi daha uygundur.

Bu geniş çeşitlilik içerisinde tatlı mısır, özellikle endosperm karbonhidrat metabolizmasındaki genetik farklılıklar nedeniyle tane amacıyla yetiştirilen mısır tiplerinden belirgin biçimde ayrılmaktadır. Tatlı mısırdaki nişastaya dönüşmesi beklenen karbonhidratların daha yüksek oranda çözünür şekerler biçiminde birikmesi, tanelerin karakteristik özelliğinin temelini oluşturmaktadır. Bunun yanında tatlı mısırdaki ekonomik olarak pazarlanabilir ürünü, çoğu tane mısırdaki olduğu gibi fizyolojik olgunluğa ulaşmış ve tam olarak olgunlaşmış tane değil; yüksek nem içeriği, yüksek çözünür şeker düzeyi, yumuşak tane yapısı ve öz sululuğun bir arada yer aldığı fizyolojik olarak olgunlaşmamış tanelerdir. Bu nedenle koçanlar çoğunlukla süt olum döneminde hasat edilmekte ve ürün taze tüketimin yanı sıra dondurulmuş, konserve edilmiş veya farklı işlenmiş ürünler şeklinde değerlendirilmektedir. Hasat sonrasında şekerlerin nişastaya dönüşmeye devam etmesi ve tane yapısının giderek sertleşmesi, tatlı mısırdaki hasat zamanını ve hasat sonrası koşulları ürün

kalitesinin temel belirleyicileri hâline getirmektedir (Ranum vd., 2014; Revilla vd., 2021; Becerra-Sanchez ve Taylor, 2021).

Tatlı mısırın yüksek şeker ve nispeten düşük nişasta içeriği, endospermde nişasta sentezi ile şeker–nişasta dönüşümünü etkileyen genetik farklılıklardan ileri gelmektedir. Bu kapsamda *sugary1* (*su1*), *sugary enhancer* (*se*) ve *shrunk2* (*sh2*) genleri tatlılık özelliğinin oluşumunda önemli rol oynamakta; bu genlerin ve farklı allel kombinasyonlarının etkisine bağlı olarak normal tatlı, şeker içeriği artırılmış (*sugary-enhanced*), süper tatlı ve farklı genetik kombinasyonlara sahip ticari tatlı mısır grupları ortaya çıkmaktadır. Özellikle yüksek şeker birikimini sağlayan genetik sistemler tüketim kalitesi bakımından önemli avantajlar sunmakla birlikte, endospermde nişasta birikiminin azalması tohum gelişimi, çimlenme, çıkış ve erken fide vigoritesi üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Dolayısıyla tatlı mısırdaki yüksek tüketim kalitesi; tohumun çimlenme ve sürme gücü, tarla çıkışı ve çevresel koşullara uyumla birlikte değerlendirilmelidir (Revilla vd., 2021; Harakotr vd., 2022; Sidahmed vd., 2025).

Tatlı mısırın pazar değerini belirleyen özellikler yalnızca şeker içeriğiyle sınırlı değildir. Tüketici tercihinde tatlılık, aroma, tane rengi, tane kabuğu inceliği, yumuşaklık, gevreklik ve sululuk gibi fiziksel ve duyuşal özellikler de önemli rol oynamaktadır. Tatlı mısır, mineral maddeler, lif, karotenoidler ve çeşitli biyoaktif bileşenler bakımından dikkate değer bir besin değerine ve işlevsel potansiyele sahiptir. Lutein, zeaksantin, β -karoten ve β -kriptoksantin gibi karotenoidlerin yanı sıra şeker ve mineral madde bileşimi genotipler arasında önemli ölçüde değişebilmektedir. Demeter vd. (2021), tatlı mısır hibritlerinin mineral maddeler, şekerler ve karotenoidler bakımından farklı özellikler gösterdiğini ortaya koyarken, Mousavi vd. (2025) kalite ve besin bileşiminin yalnızca genotipe değil, bitki gelişim dönemine ve hasat zamanına da önemli ölçüde bağlı olduğunu bildirmiştir. Bu durum, tatlı mısırdaki kalitenin tek bir özelliğe göre değil, fiziksel ve kimyasal özellikler ile tüketim kalitesi ve besin değerinin bütüncül olarak değerlendirilmesiyle belirlenmesi gerektiğini göstermektedir.

Tatlı mısırdaki tarla performansı genetik yapı ile de yakından ilişkilidir. Endospermde karbonhidrat metabolizmasını değiştiren genetik özellikler, bazı genotiplerde tohumun çimlenme gücünün azalmasına, zayıf çıkışa ve erken gelişme döneminde çevresel streslere duyarlılığın artmasına neden

olabilmektedir. Bunun yanında ekim zamanı, bitki sıklığı, su ve besin maddesi yönetimi, sıcaklık, su noksanlığı, yabancı otlar, hastalıklar ve zararlılar gibi çok sayıda çevresel etmenler ve yetiştirme uygulamaları pazarlanabilir koçan verimi ile kalite üzerinde birlikte etkili olmaktadır. Bu nedenle günümüz tatlı mısır yetiştiriciliğinde yüksek verimin tek başına hedeflenmesi yerine genotip×çevre×yetiştirme koşulları interaksyonunun dikkate alınması; verim, kalite, kaynak kullanım etkinliği ve çevresel streslere dayanıklılığın birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır (Revilla vd., 2021; Demeter vd., 2021; Sidahmed vd., 2025).

Tatlı mısırın taze tüketim özelliği, üretim zincirinde hasat sonrası fizyolojisini de önemli hâle getirmektedir. Süt olum döneminde hasat edilen tanelerin yüksek su ve şeker içeriğine sahip ve fizyolojik olarak aktif olması nedeniyle, hasattan sonra solunum ve diğer metabolik faaliyetler devam etmekte, buna bağlı olarak şeker ve su kaybı, tane yapısındaki değişimler ve mikrobiyal bozulmalar kısa sürede ürün kalitesinin azalmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle doğru hasat döneminin belirlenmesi, ürünün hasattan sonra tarladan hızla uzaklaştırılması ve uygun düşük sıcaklık koşullarında muhafaza edilmesi, tatlı mısırın pazarlanabilirlik ve tüketim kalitesinin korunması açısından önem taşımaktadır. Böylece tatlı mısır üretiminin yalnızca tarladaki verimle değil, hasattan tüketim veya işleme aşamasına kadar uzanan bütün üretim zincirinin kalite odaklı yönetimiyle değerlendirilmesi gerekmektedir (Becerra-Sanchez ve Taylor, 2021).

Sonuç olarak tatlı mısır; endosperm karbonhidrat metabolizmasına bağlı yüksek şeker içeriği, fizyolojik olgunluğa ulaşmadan hasat edilmesi, kendine özgü tüketim kalitesi, besin değeri ve işlevsel potansiyeli ile mısır türleri içerisinde farklılaşmış özel bir ürün grubudur. Bununla birlikte tatlı mısırın üretim ve kalite potansiyeli genetik yapı, çevre koşulları, yetiştirme teknikleri, hasat olgunluğu ve hasat sonrası yönetimin karşılıklı etkileşimi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle tatlı mısırın tarımsal ve ekonomik değerinin geliştirilmesi; köken ve genetik özelliklerinden ekolojik isteklerine, çeşit seçimi ve yetiştirme tekniklerinden kalite, besin özellikleri, muhafaza, işleme ve modern ıslah yaklaşımlarına kadar bütün üretim zincirinin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir (Revilla vd., 2021; Becerra-Sanchez ve Taylor, 2021; Demeter vd., 2021; Harakotr vd., 2022; Sidahmed vd., 2025; Mousavi vd., 2025).

Tarımsal, ekonomik ve insan beslenmesindeki önemi

Tatlı mısır (*Zea mays L. saccharata*), özellikle insan beslenmesine yönelik olarak yetiştirilen, tarla bitkileri grubunda olmakla birlikte taze sebze niteliği taşıyan ve hem taze pazarda hem de gıda işleme sanayisinde ekonomik değeri yüksek olan özel bir mısır grubudur. Günümüzde tatlı mısır; taze koçan olarak tüketilmesinin yanı sıra dondurulmuş, konserve edilmiş ve farklı işlenmiş ürünler şeklinde değerlendirilmekte, bu geniş kullanım alanı üretici, işleyici ve tüketici açısından ürüne önemli bir ekonomik değer kazandırmaktadır. Tatlı mısıra yönelik küresel ilginin artmasında tüketici tercihlerindeki değişim, kentleşme, sağlıklı beslenmeye yönelik farkındalığın yükselmesi ve bitkisel gıdalara olan talep artışının etkili olduğu düşünülmektedir. Nitekim tatlı mısırın başlangıçta özellikle Kuzey Amerika ile özdeşleşen bir ürün iken zaman içerisinde farklı kıtalara yayıldığı ve tropik ile subtropik bölgeler de dâhil olmak üzere üretim alanının genişlediği bilinmektedir. Buna bağlı olarak taze ve işlenmiş tatlı mısır pazarının gelişmesi, ürünün yalnızca üretim açısından değil, gıda sanayisi ve tarımsal ekonomi açısından da önemini artırmıştır (Revilla vd., 2021; Becerra-Sanchez ve Taylor, 2021; Sidahmed vd., 2025).

Tatlı mısırın ekonomik değerini belirleyen temel unsurlardan biri, diğer mısır tiplerinden farklı olarak tüketici tarafından doğrudan kalite özellikleri üzerinden değerlendirilmesidir. Tatlılık, aroma, yumuşaklık, gevreklik, sululuk ve tane rengi gibi özellikler tüketici kabulünü ve dolayısıyla ürünün pazar değerini doğrudan etkilemektedir. Özellikle yüksek sakkaroz/nişasta oranı tatlı mısırın karakteristik özelliğini oluştururken, kaliteli bir üründe yüksek şeker içeriğinin uygun yapı ve aroma ile birlikte bulunması beklenmektedir. Bu nedenle tatlı mısırdaki verim tek başına ekonomik başarının göstergesi olmayıp, pazarlanabilir koçan verimi, kalitesi ve tüketici beğenisi de üretim sisteminin temel hedefleri arasında bulunmaktadır. Sidahmed vd. (2025), şeker içeriği, tane yapısı ve aroma özelliklerinin tatlı mısırın pazar değeri ile tüketici kabulünün belirlenmesinde kritik olduğunu belirtirken; Demeter vd. (2021) üretici açısından yüksek birim alan veriminin, tüketici açısından ise tatlılık ve besin kalitesi gibi özelliklerin ön plana çıktığını bildirmiştir. Bu durum tatlı mısır yetiştiriciliğinde ekonomik değer ile ürün kalitesinin birbirinden bağımsız değerlendirilemeyeceğini ortaya koymaktadır (Demeter vd., 2021; Sidahmed vd., 2025; Niyorukundo vd., 2026).

Tatlı mısırın önemini artıran bir diğer unsur, besin bileşiminin karbonhidrat ve enerji içeriğinin ötesinde farklı besin öğeleri ve biyoaktif bileşenler açısından da önem taşımasıdır. Tatlı mısır tanelerinde potasyum (K), fosfor (P), magnezyum (Mg), kalsiyum (Ca), demir (Fe) ve çinko (Zn) gibi mineral maddelerin yanı sıra karotenoidler, fenolik bileşikler ve farklı antioksidan bileşenlerin bulunması, ürünün sağlıklı beslenme ve fonksiyonel gıda açısından değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle sarı taneli tatlı mısırlarda lutein, zeaksantin ve β -karoten gibi karotenoidlerin bulunması dikkat çekmekte, genotipler ve çeşitler arasında bu bileşiklerin miktarları bakımından önemli farklılıklar olabilmektedir. Revilla vd. (2021), tatlı mısırın insan beslenmesinde provitamin A kaynağı olma potansiyeline dikkat çekmiş ve tatlı mısırdaki provitamin A, vitamin E ve diğer fitokimyasal bileşenlerin geliştirilmesine yönelik çalışmaların önem kazandığını bildirmiştir. Demeter vd. (2021) ise farklı süper tatlı mısır (sh2) hibritlerinin mineral maddeler, şekerler ve karotenoidler bakımından farklı özelliklere sahip olduğunu, besin değeriyle ilişkili bütün özellikleri aynı anda en yüksek düzeyde taşıyan tek bir “evrensel hibrit çeşit” bulunmadığını ifade etmiştir. Bu sonuç, tatlı mısırdaki çeşit seçiminin yalnızca verim düzeyine göre değil, tüketim amacı ve hedeflenen besin özellikleri dikkate alınarak yapılmasının önemini ortaya koymaktadır (Revilla vd., 2021; Demeter vd., 2021).

Tatlı mısırın insan beslenmesi açısından taşıdığı potansiyel, günümüzde biyofortifikasyon yani besin öğelerince zenginleştirmeye yönelik çalışmalarla daha da artmaktadır. Tatlı mısırın tüketici tarafından yaygın biçimde tercih edilmesi ve kısa sürede hasat olgunluğuna ulaşması, yenilebilir tanelerin mikro besin elementleri bakımından zenginleştirilmesine yönelik çalışmalar için uygun bir temel oluşturmaktadır. Asamoah vd. (2025), yapraklardan selenyum (Se) uygulamasının tatlı mısırdaki fizyolojik performans ve tane besin bileşimi üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Araştırmada 20 ve 40 g ha⁻¹ Se uygulamalarının fotosentetik etkinliği desteklemesinin yanı sıra tanelerde çözünür şeker, protein, C vitamini ve bazı mineral elementlerin birikimini artırdığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, uygun Se dozlarının tatlı mısırdaki fizyolojik etkinliği desteklerken yenilebilir tanelerin bazı besin bileşenleri bakımından zenginleşmesine katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Araştırmada orta düzey selenyum uygulamalarıyla taze koçan veriminde %2–7 düzeyinde artış gözlenirken, tanelerdeki selenyumun önemli bölümünün organik form olan

selenometiyonin şeklinde bulunduđu belirlenmiştir. Bununla birlikte çalışmanın tek lokasyonda, bir yıl ve tek hibrit kullanılarak yürütölmüş olması, elde edilen sonuçların farklı genotip ve çevre koşullarına genellenebilirliğini sınırlandırmaktadır. Buna rağmen çalışma, tatlı mısırın yalnızca temel bir sebze ürünü değil, mikro besin elementleri yönünden zenginleştirilebilecek işlevsel bir ürün olarak da değerlendirilebileceğini göstermektedir (Asamoah vd., 2025).

Tatlı mısırın besin değeriinin geliştirilmesi ve pazar potansiyelinin artırılmasına yönelik çalışmalar, yalnızca mineral maddelerce zenginleştirme yaklaşımlarıyla sınırlı değildir. Son yıllarda farklı tane renklerinin ve bunlarla ilişkili karotenoid ve flavonoidlerin tatlı mısır genetik materyaline aktarılması da ürünün pazar potansiyelini genişletebilecek bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Niyorukundo vd. (2026), sarı-turuncu, mor, mavi ve kırmızı tane renklerine sahip tatlı mısır hat ve hibrit çeşitlerinin geliştirilmesinin mümkün olduğunu, bazı renkli genotiplerde karotenoid ve flavonoid profilinin artırılabilğini ve bu materyallerin tatlılık ile yumuşaklık gibi temel tüketim özelliklerini büyük ölçüde koruyabildiğini bildirmiştir. Bununla birlikte, araştırmanın ön çalışma niteliğinde olması ve sonuçların sınırlı sayıda genotip ile belirli deneme koşullarına dayanması, bulguların genele yayılmasını kısıtlamaktadır. Daha kapsamlı tüketici değerlendirmeleri ve çok lokasyonlu denemelerle desteklenmesi gereken bu sonuçlar, renkli tatlı mısır genotiplerinin görsel çekicilik, besin bileşimi ve ürün çeşitlendirme açısından yeni pazar olanakları sunabileceğine işaret etmektedir (Niyorukundo vd., 2026).

Tatlı mısırın ekonomik ve teknolojik önemi yalnızca yenilebilir tanelerle sınırlı olmayıp, üretim ve işleme sırasında ortaya çıkan bitkisel materyalin değerlendirilmesi de ürüne ilave değer kazandırabilmektedir. Koçan, kavuz ve sap gibi yan ürünlerin alternatif kullanım alanlarına yönlendirilmesi, tarımsal atıkların azaltılması ve üretim zincirinden daha fazla ekonomik değer elde edilmesi açısından önemlidir. Revilla vd. (2021), tatlı mısır yan ürünlerinin doğal renklendiriciler, fenolik bileşikler ve çeşitli biyolojik işleme uygulamaları için potansiyel oluşturduğunu, sapların yem ve silaj olarak değerlendirilebildiğini ve lignoselülozik materyalin biyoyakıt üretiminde kullanılabileceğini bildirmiştir. Lau vd. (2022), tatlı mısır koçanının işlenerek gıda formölasyonlarında işlevsel bir bileşen olarak kullanılabileceğini göstererek, yan ürünlerin katma değerli ürünlere dönüştürölmesi açısından somut bir örnek sunmuştur.

Araştırmacılar, tatlı mısır işleme endüstrisinin bir yan ürünü olan koçanın önemli miktarda diyet lifi ve ferulik asit içerdiğini ve koçan ununun glutensiz kek üretiminde katma değerli bir bileşen olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Koçan unu ilavesi ürünlerin lif ve ferulik asit içeriğini artırmış, özellikle %20 düzeyine kadar kullanımın bazı fiziksel ve yapısal özelliklerde iyileşme sağlayabildiği bildirilmiştir. Böylece tatlı mısır üretim zincirinde daha önce atık olarak değerlendirilebilecek materyalin işlevsel gıda bileşenine dönüştürülmesi, ürünün ekonomik ve çevresel önemine yeni bir boyut kazandırmaktadır (Revilla vd., 2021; Lau vd., 2022).

Tatlı mısırın gelecekteki öneminin, yüksek ürün kalitesi ve ekonomik değer kadar sürdürülebilir üretim sistemleri içerisindeki yeriyle de ilişkili olduğu görülmektedir. İklim değişikliği, su kaynaklarının giderek azalması, üretim girdilerindeki maliyet artışları ve çevresel sürdürülebilirliğe ilişkin kaygılar, yüksek katma değerli ürünlerde kaynak kullanım etkinliğinin önemini artırmaktadır. Hassas sulama, uygun ve dengeli gübreleme, bitki sıklığının doğru belirlenmesi, entegre zararlı yönetimi ve hassas tarım uygulamaları, tatlı mısır üretiminde kaynak kullanım etkinliğinin artırılması açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Demeter vd. (2021), hassas tarım uygulamalarının değerlendirilmesinde yalnızca birim alan verimi ve ekonomik getirinin değil, tüketici açısından ürünün besin kalitesinin de dikkate alınması gerektiğini vurgulamıştır. Sidahmed vd. (2025) ise tatlı mısırı yüksek tüketici talebi, farklı ekolojik koşullara uyumu ve ekonomik potansiyeli nedeniyle sürdürülebilir gıda sistemleri açısından değerli bir ürün olarak değerlendirmiş; üretimin geleceğinde genetik iyileştirme, uygun yetiştirme koşulları ve çevresel sürdürülebilirliğin birlikte ele alınmasının gerekli olduğunu belirtmiştir (Demeter vd., 2021; Sidahmed vd., 2025).

Üretim ekonomisi açısından, girdi kullanım düzeyinin yalnızca verim üzerindeki etkisiyle değil, sağladığı ekonomik getiri ve kullanım etkinliği bakımından da değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Setyorini vd. (2023), Endonezya’da Talenta çeşidiyle yürüttükleri çalışmada, önerilen gübre dozunun uygulanmadığı, yarı doz ve tam doz uygulamalarını farklı sıvı organik gübre konsantrasyonlarıyla birlikte değerlendirerek bunların verim ve ekonomik etkinlik üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Araştırmada en yüksek verim, tam gübre dozu ile 4 g L^{-1} sıvı organik gübrenin birlikte uygulanması sonucunda $13.339 \text{ kg ha}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, gübrenin yarı dozu ile 4 g L^{-1} sıvı organik gübre uygulamasından

13.071 kg ha⁻¹ verim elde edilmiş; bu uygulamada bağıl agronomik etkinlik %231.2, gelir/maliyet (R/C) oranı ise 8.65 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular, söz konusu toprak ve yetiştirme koşullarında mineral ve organik gübre kaynaklarının birlikte kullanımının, gübre kullanım etkinliği ile ekonomik getiri arasında daha dengeli bir yapı oluşturabileceğini göstermektedir. Ancak denemede kullanılan gübre dozlarının farklı ekolojik koşullar ve yetiştirme sistemlerine doğrudan aktarılması ya da genel bir gübreleme önerisi olarak değerlendirilmesi uygun değildir (Setyorini vd., 2023).

Sonuç olarak tatlı mısırın önemi; yalnızca yüksek şeker içeriğine sahip lezzetli bir ürün olmasıyla açıklanamayacak kadar çok yönlüdür. Taze ve işlenmiş pazarlardaki ekonomik değeri, tüketici tarafından yüksek düzeyde kabul gören kalite özellikleri, mineral maddeler ve biyoaktif bileşenler bakımından taşıdığı besin potansiyeli, besin öğelerince zenginleştirmeye uygunluğu ve yeni özel ürün tiplerinin geliştirilmesine olanak sağlaması ürünü insan beslenmesi açısından önemli hâle getirmektedir. Bunun yanında koçan ve sap gibi yan ürünlerin gıda, yem ve biyolojik işleme alanlarında değerlendirilebilmesi, atıkların azaltılmasına ve üretim zincirinde ilave katma değer oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Bu anlamda tatlı mısır, üretici geliri ve gıda sanayisine hammadde sağlamanın yanında beslenme kalitesi, ürün çeşitlendirme, kaynak kullanım etkinliği ve sürdürülebilir tarımsal üretim açısından da gelecekte öneminin artması beklenen bir bitki olarak değerlendirilmektedir (Revilla vd., 2021; Demeter vd., 2021; Lau vd., 2022; Sidahmed vd., 2025; Asamoah vd., 2025; Niyorukundo vd., 2026).

Köken, taksonomi ve botanik özellikler

Tatlı mısır, mısır tüleri içerisinde insan tüketimine yönelik olarak seçilmiş ve özellikle endosperm yapısındaki farklılıklar nedeniyle yüksek şeker içeriğiyle karakterize edilen özel bir gruptur. Güncel literatürde günümüzde yetiştirilen tatlı mısırın gelişiminde Kuzey Amerika'nın belirleyici bir role sahip olduğu bildirilmektedir. Revilla vd. (2021), taze tatlı mısırın kökenini Amerika Birleşik Devletleri ile ilişkilendirmekte ve daha sonra farklı ülkelere yayılarak dünya genelinde giderek daha fazla benimsenen bir ürün hâline geldiğini belirtmektedir. Ilıman bölgelere uyum sağlamış tatlı mısır genetik materyalinin oluşumu sırasında genetik çeşitliliğin önemli ölçüde azaldığı ve mevcut genetik materyalin büyük ölçüde Kuzey Sert Mısırı (Northern Flint) ırkından köken aldığı

bildirilmektedir. Kuzey Amerika'nın yerli toplulukları tarafından, günümüzde kuzeybatı Meksika ile güneybatı ABD'yi kapsayan bölgelerden köken alan mısır materyalinin Kuzey Amerika'nın kuzeydoğu kesiminin ekolojik koşullarına uyarlanması sonucunda Kuzey Sert Mısırları (Northern Flint) genetik materyalinin geliştiği bildirilmektedir. Kıtaya Avrupa'dan gelip yerleşenlerin başlangıçta ağırlıklı olarak beyaz endospermli tatlı mısır yetiştirdikleri, daha sonra sarı endospermli 'Golden Bantam' çeşidinin yaygın biçimde benimsenmesiyle tatlı mısır genetik materyalindeki çeşitliliğin yeniden daraldığı bildirilmektedir. Sarı taneli tatlı mısırların yaygınlaşmasında önemli bir dönüm noktası oluşturan 'Golden Bantam', aynı zamanda sonraki ıslah çalışmalarında önemli bir genetik kaynak olarak kullanılmış, çok sayıda beyaz endospermli çeşit bu materyalle melezlenerek sarı endospermli hat ve çeşitlerin geliştirilmesinde değerlendirilmiştir (Revilla vd., 2021).

Günümüz tatlı mısır genetik kaynaklarının evrimsel geçmişi genomik verilerle de ayrıntılandırılmıştır. Hu vd. (2021), teosinte, yerel mısır popülasyonları, mısır hatları ve 822 adet tatlı mısır genotipini içeren toplam 5.381 materyal üzerinde gerçekleştirdikleri filogenetik ve popülasyon genomik analizlerde, tatlı mısır materyallerinin büyük bölümünün diğer mısır gruplarından genetik olarak ayrılan bir grup oluşturduğunu göstermiştir. Bulgular, özellikle bugün kullanılan ABD tatlı mısır genetik kaynaklarının kuzey Meksika kökenli materyaller ve Kuzey Amerika'nın Kuzey Sert Mısırları (Northern Flint) grubu ile ilişkili ortak bir genetik geçmiş taşıdığına işaret etmektedir. Bununla birlikte, bu bulguların esas olarak günümüz ABD tatlı mısır genetik materyalinin evrimsel geçmişine ışık tuttuğu, tatlı mısırın dünya genelindeki kökeni, dağılımı ve yayılış sürecini bütünüyle açıklamadığı dikkate alınmalıdır (Hu vd., 2021).

Tatlı mısırın çeşit ve hibrit geliştirme süreci 20. yüzyılın başlarından itibaren daha sistematik bir nitelik kazanmıştır. Açıkta tozlanan çeşitlerle başlayan bu süreçte, 1930'lu yıllarda ilk ticari tatlı mısır hibritlerinin geliştirilmesi önemli bir dönüm noktası olmuş, hibritlerin kullanılmasıyla verim performansı, tane kalitesi ve bitki üniformitesinde önemli ilerlemeler sağlanmıştır. İkinci Dünya Savaşı sonrasında tatlı mısır yetiştiriciliği ve araştırmaları Kuzey Amerika dışına genişlemiş, özellikle Avrupa ve Asya'da taze tüketim ve işleme sanayisine yönelik üretimin yaygınlaşmasıyla ürünün küresel önemi artmıştır. Böylece tatlı mısır, tarihsel olarak bölgesel bir mısır niteliğinden, farklı ekolojik bölgelerde

yetiştirilen ve modern ıslah programlarının önemli hedeflerinden biri olan ürün grubuna dönüşmüştür (Sidahmed vd., 2025).

Taksonomik açıdan tatlı mısırın güncel bilimsel yayınlarda tek bir tür altı taksonomik adlandırmayla ifade edilmediği görülmektedir. İncelenen kaynaklarda Demeter vd. (2021) tatlı mısırı *Zea mays* L. convar. *saccharata* Körn., Yang vd. (2021) ise *Zea mays* convar. *saccharata* var. *rugosa* şeklinde tanımlamıştır. Sidahmed vd. (2025) *Zea mays* L. *saccharata* adlandırmayı kullanırken, Li vd. (2024) farklı tatlı mısır tiplerini doğrudan *Zea mays* L. türü kapsamında değerlendirmiştir. Yang vd. (2021) ayrıca *Zea mays* L.'nin Poaceae familyasına ait olduğunu ve tatlı mısırın, mısırın başlıca kullanım gruplarından biri olduğunu belirtmiştir. Söz konusu adlandırma farklılıkları, güncel tatlı mısır literatüründe tür altı taksonomik terminolojinin yayınlar arasında değişebildiğini göstermektedir. Bu kitap bölümünde ise genel olarak literatürde yaygın olarak yer alan ve başlıkta verilen *Zea mays saccharata* Sturt. adlandırması kullanılmıştır (Demeter vd., 2021; Yang vd., 2021; Li vd., 2024; Sidahmed vd., 2025).

Tatlı mısırı diğer mısır tiplerinden ayıran en belirgin botanik özellikler özellikle tane ve endosperm yapısında ortaya çıkmaktadır. Tatlı mısır, mısır türünde endospermde nişasta sentezini etkileyen mutasyonları taşıyan genotiplerin seçilmesi sonucunda ortaya çıkmış özel bir mısır grubu olarak tanımlanmaktadır. Bugünkü koşullarda tatlı mısırdaki endospermde nişasta sentezini kesintiye uğratan bir veya daha fazla resesif allelin bulunması, nişasta birikiminin azalmasına ve taze tanelerde şeker konsantrasyonunun yükselmesine neden olmaktadır. Bu özellik aynı zamanda tatlı mısırın ayrılmasında kullanılan başlıca biyolojik ölçütlerden biridir. Ticari materyallerde sugary1 (su1), shrunken2 (sh2) ve bunlarla ilişkili genetik yapılar farklı tatlı mısır tiplerinin ortaya çıkmasını sağlamakta, endosperm yapısındaki bu değişiklikler hem taze tane bileşimini hem de olgunlaşmış tanenin görünüşünü etkilemektedir (Revilla vd., 2021; Li vd., 2024).

Tatlı mısırı diğer mısır tiplerinden ayıran önemli özelliklerden biri, tanelerin fizyolojik olgunluğa ulaşmadan, süt olum döneminde tüketilmesidir. Revilla vd. (2021), mısırın taze tüketiminin yaklaşık olarak tozlanmadan 20 gün sonra gerçekleşen süt olum dönemine karşılık geldiğini ve bu aşamada tane nem içeriğinin %70'in üzerinde olduğunu bildirmiştir. Yang vd. (2021) de tatlı mısırın olgunlaşmamış tanelerinin

tüketim amacıyla hasat edildiğini ve süt olum dönemindeki yüksek şeker içeriğinin ürünü karakterize ettiğini belirtmiştir. Dolayısıyla tane amacıyla yetiştirilen mısırdaki fizyolojik olgunluğa ulaşmış ve hasat sonrasında güvenli depolama için tane nemini yaklaşık %13–15 düzeyine düşürülmüş ürün esas alınırken, tatlı mısırdaki botanik ve ekonomik ürün niteliğini yüksek nemli, yumuşak ve şeker bakımından zengin olgunlaşmamış taneler oluşturmaktadır. Bu nedenle tane gelişim aşaması tatlı mısırın yalnızca hasat zamanını değil, aynı zamanda kullanım biçimini ve ürün kalitesini de belirlemektedir (Revilla vd., 2021; Yang vd., 2021).

Tane yapısında meyve kabuğu (perikarp) ve endosperm (besidoku) özellikleri tüketim kalitesi bakımından özel bir önem taşımaktadır. Perikarp, tatlı mısır tanesinin dış kısmını oluşturmakta ve özellikle tane yumuşaklığının değerlendirilmesinde önemli bir özellik olarak ele alınmaktadır. Yang vd. (2021), üç farklı tatlı mısır çeşidinde perikarp kalınlığının önemli düzeyde farklılaştığını belirlemiş, ortalama perikarp kalınlığını Jinbaitian çeşidinde 83,74 µm, Jinzhongyu'da 56,74 µm ve yüksek kalite özelliği gösteren Cupola çeşidinde 32,13 µm olarak ölçmüştür. Aynı çalışmada suda çözünebilir şeker içeriğinin yüksek olması ve ince meyve kabuğunun kaliteli tatlı mısırın önemli özelliklerinden olduğu vurgulanmıştır. Bu bulgular, tatlı mısırdaki tanelerin yalnızca kimyasal bileşimleri bakımından değil, tane dış dokusunun fiziksel yapısı bakımından da genotipler arasında önemli farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır (Yang vd., 2021).

Endosperm genotipi tane görünümünü de belirgin biçimde etkileyebilmektedir. Li vd. (2024), normal tatlı (su1), şeker içeriği artırılmış tatlı (su1-se1) ve süper tatlı (sh2) materyallerin taze ve kuru tane görünümlerinin birbirinden farklı olduğunu bildirmiştir. Özellikle sh2 tipindeki süper tatlı mısırların kuru tanelerinde diğer mısır gruplarına göre belirgin şekilde buruşuk, çökmüş ve daha az parlak bir görünüm saptanmıştır. Aynı çalışmada 24 adet tatlı mısır materyalinde süper tatlı sh2 grubunun çözünür şeker ve sakkaroz içeriğinin daha yüksek, nişasta içeriğinin ise daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle tamamen olgunlaşmış tohumda buruşuk görünüm yalnızca dışsal bir morfolojik özellik olmayıp, endospermdeki karbonhidrat birikiminin değişmesiyle yakından ilişkili bir fenotip olarak değerlendirilmektedir (Li vd., 2024).

Tatlı mısırdaki kök sisteminin ayrıntılı morfolojik tanımlanmasına ilişkin bilgiler sınırlı olmakla birlikte, evrimsel değişimlerin ve kültüre alma

sürecinin kök anatomisi üzerindeki etkilerini ortaya koyan çalışmalar mevcuttur. Revilla vd. (2021), teosinte ile tatlı mısırın kök apikal meristem yapısını karşılaştıran çalışmalarda metaksilem gelişiminin iki materyal arasında farklılık gösterdiğini, özellikle geç olgunlaşan metaksilem iletim demetlerinin sayısında farklılıkların bulunduğunu, buna karşılık promeristem yapılanmasının benzer olduğunu bildirmiştir. Bu bulgular, mısırın kültüre alınması ve bunu izleyen seleksiyon süreçlerinin yalnızca tane yapısı ve kalite özelliklerini değil, kök anatomisine ilişkin bazı özellikleri de etkilediğini göstermektedir (Revilla vd., 2021).

Sonuç olarak tatlı mısırın tarihsel gelişimi, Kuzey Amerika kökenli genetik materyalin seçimi, şeker içeriği ve tane özellikleri bakımından gerçekleştirilen seleksiyonlar ile daha sonraki açıktan tozlanan ve hibrit çeşit geliştirme çalışmaları sonucunda şekillenmiştir. Güncel literatürde tatlı mısır için farklı tür altı taksonomik adlandırmalar kullanılmakla birlikte, bu materyallerin ortak özelliği *Zea mays* L. türü kapsamında değerlendirilmeleri ve endospermde karbonhidrat metabolizmasını etkileyen genetik farklılıklar nedeniyle tanelerinde yüksek düzeyde şeker biriktirmeleridir. Tatlı mısırın botanik açıdan ayırt edici özellikleri arasında süt olum döneminde hasat edilen yüksek nemli taneleri, değişmiş endosperm yapısı, genotipe bağlı meyve kabuğu özellikleri ve bazı genetik tiplerde olgunlaşmış tohumlarda görülen buruşuk görünüm öne çıkmaktadır. Bu özellikler, tatlı mısırın kökeni ve taksonomik konumu ile tane yapısı, kimyasal bileşimi ve kullanım biçimi arasında yakın bir ilişkinin bulunduğunu göstermektedir (Revilla vd., 2021; Yang vd., 2021; Li vd., 2024; Sidahmed vd., 2025).

Genetik yapı ve tatlılığın moleküler mekanizması

Tatlı mısırı diğer mısır gruplarından ayıran temel özellik, endospermde karbonhidrat metabolizmasını ve özellikle nişasta sentezini etkileyen resesif mutasyonların bulunmasıdır. Bu mutasyonlar, tane gelişimi sırasında sakkarozun nişastaya dönüştürülmesini farklı düzeylerde sınırlandırarak çözünür şekerlerin birikmesine neden olmakta ve böylece tatlı mısırın karakteristik tatlılık fenotipi ortaya çıkmaktadır. Yapılan çalışmalarda tatlılıkla ilişkili başlıca genler arasında *sugary1* (*su1*), *sugary2* (*su2*), *shrunk1* (*sh1*), *shrunk2* (*sh2*), *shrunk4* (*sh4*), *brittle1* (*bt1*), *brittle2* (*bt2*) ve *sugary enhancer* (*se/se1*) yer almaktadır. Bu genlerin ve farklı kombinasyonlarının endospermde nişasta sentezinin çeşitli basamaklarını etkilemesi sonucunda normal tatlı, şeker içeriği

artırılmış (*sugary-enhanced*), süper tatlı (*supersweet*), sinerjistik (*synergistic*) ve geliştirilmiş buruşuk tip (*augmented shrunk*) olmak üzere farklı tatlı mısır grupları ortaya çıkmaktadır. Harakotr vd. (2022), endosperm özelliklerini belirleyen gen bileşimi esas alındığında tatlı mısırın normal tatlı (*su1*), şeker içeriği artırılmış (*sugary-enhanced*, *se*), süper tatlı (*sh2* veya *bt1*), sinerjistik (*synergistic*) ve geliştirilmiş buruşuk tip (*augmented shrunk*) olmak üzere beş grupta değerlendirilebildiğini bildirmiştir. Araştırmacılar ayrıca *su1*, *sh2* ve *se* genlerinin farklı kombinasyonlarının yüksek şeker içeriği ile tane yumuşaklığı arasında dengeli bir tüketim kalitesinin oluşmasına katkı sağlayabildiğini belirtmiştir. Benzer şekilde Feng vd. (2026), tatlı mısır fenotipinin endospermde ifade edilen resesif mutant genler tarafından belirlendiğini ve bu genlerin işlevini azaltan veya ortadan kaldıran mutasyonların nişasta biyosentezini sınırlandırarak şeker birikimini artırdığını belirtmiştir (Harakotr vd., 2022; Feng vd., 2026).

Tatlılık mekanizmasının anlaşılmasında özellikle *sh2* geni merkezi bir konuma sahiptir. Xiao vd. (2023), *sh2* geninin nişasta biyosentezinde önemli bir role sahip olan ADP-glukoz pirofosforilaz (AGPase) enziminin büyük alt birimini kodladığını bildirmiştir. *sh2* mutantlarında bu yolun bozulması toplam karbonhidratların nişasta şeklinde depolanmasını önemli ölçüde azaltırken, çözünür şeker birikimini artırmaktadır. Buna karşılık Feng vd. (2026), *bt2* geninin ADP-glukoz pirofosforilaz (AGPase) enziminin küçük alt birimini, *sugary2* geninin nişasta sentaz IIa'yı, *sbe1* geninin nişasta dallandırma enzimi I'i ve *sh1* geninin sakkaroz sentazı kodladığını belirtmiştir. Aynı çalışmada *sh1* genindeki işlev kaybının sakkaroz sentaz aktivitesini ve nişasta birikimini azaltarak buruşuk tane fenotipine yol açabildiği, *bt2* mutasyonunun ise düşük nişasta ve yüksek çözünür şeker birikimiyle ilişkili olduğu bildirilmiştir. Dolayısıyla tatlı mısırdaki yüksek şeker fenotipi tek bir metabolik basamağın değişmesinden ziyade, sakkarozun taşınması ve parçalanmasından ADP-glukoz oluşumuna, nişasta zincirlerinin sentezi ve dallanmasına kadar uzanan karbonhidrat metabolizmasının farklı noktalarında meydana gelen genetik değişikliklerin sonucudur (Xiao vd., 2023; Feng vd., 2026).

Süper tatlı tiplerde yaygın olarak kullanılan *sh2-R* allelinin moleküler yapısı, tatlı mısıra özgü yüksek nitelikli bir referans genomun oluşturulmasıyla daha ayrıntılı biçimde açıklanmıştır. Hu vd. (2021), Ia453-sh2 hattında *sh2-R* lokusunun karmaşık yapısal yeniden düzenlenmeler sonucunda oluştuğunu, gen bölgesinin 5,45 kb

uzunluğunda Copia tipi bir LTR retrotranspozonun eklenmesiyle kesintiye uğradığını ve ikinci bölümünün yaklaşık 49,44 kb uzunluğunda, transpozon bakımından zengin bir bölgeyle ayrılarak ters yönlendiğini göstermiştir. Bu yapısal değişiklik, ADP-glukoz pirofosforilazın büyük alt birimini kodlayan *Sh2* geninin normal işlevini bozarak nişasta biyosentezinin sınırlandırılmasına ve endospermde şeker birikiminin artmasına katkıda bulunmaktadır. Bu bulgular, tatlılık fenotipinin yalnızca ilgili genin varlığı açısından değil, allelin yapısal düzeni ve endosperm karbonhidrat metabolizması üzerindeki işlevsel etkileriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Hu vd., 2021).

Tatlı mısırdaki tane gelişimi sırasında gerçekleşen şeker birikimi, yalnızca klasik endosperm mutant genlerinin etkisine bağlı olmayıp, sakkaroz metabolizması ve karbonun depo bileşiklerine yönlendirilmesini düzenleyen geniş bir moleküler ağı denetimi altındadır. Li vd. (2024), yapraklarda oluşan fotosentetik ürünlerin tane gelişimi sırasında başlıca sakkaroz formunda taşındığını ve tane dokusunda hücre duvarına bağlı invertaz ile sakkaroz sentaz enzimlerinin etkisiyle farklı metabolik yollara yönlendirildiğini bildirmiştir. Hücre duvarına bağlı invertaz sakkarozu glukoz ve fruktoza parçalamakta, sakkaroz sentaz ise sakkarozdan fruktoz ve UDP-glukoz oluşumunda rol oynamaktadır. Daha güncel bir GWAS ve gen ifadesi çalışmasında Ashraf vd. (2026), bu mekanizmanın çok genli yapısını ortaya koymuş, sakkaroz sentaz (SUS), sakkaroz fosfat sentaz (SPS), invertaz (INV), nişasta sentaz, β -amilaz, heksokinaz ve fruktokinaz gibi enzimlerin yanı sıra SWEET, SUT ve monosakkarit taşıyıcılarının çözünür şeker bileşimiyle ilişkili olduğunu göstermiştir. Araştırmada ayrıca SnRK1 kinaz gibi sinyal düzenleyicilerinin karbon dağılımı ve şeker sinyal iletimiyle bağlantılı olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, tatlılık fenotipinin yalnızca “nişastanın azalması” şeklinde basit bir mekanizmayla açıklanamayacağını; sentez, parçalanma, taşıma ve sinyal yollarının birlikte işlediği bir düzenleyici ağı sonucunu olduğunu göstermektedir (Li vd., 2024; Ashraf vd., 2026).

Farklı endosperm genotiplerinde belirlenen şeker ve nişasta düzeyleri, ilgili genetik farklılıkların endospermde karbonhidrat birikimine doğrudan yansıdığını göstermektedir. Li vd. (2024), sekiz normal tatlı (*su1*), sekiz şeker içeriği artırılmış tatlı (*su1-se1*) ve sekiz süper tatlı (*sh2*) olmak üzere toplam 24 farklı tatlı mısır materyalini karşılaştırmış ve özellikle sakkaroz, maltoz ve nişasta miktarlarının gruplar arasında belirgin biçimde farklılaştığını göstermiştir. Süper tatlı *sh2* tanelerinde toplam çözünür

şeker düzeyi, normal tatlı ve şeker içeriği artırılmış tatlı gruplara göre sırasıyla 1.29 ve 1.20 kat; sakkaroz düzeyi ise sırasıyla 1.54 ve 1.33 kat daha yüksek bulunmuştur. Buna karşılık normal tatlı *sul* grubunun nişasta düzeyi *sh2* ve *sul-sel* gruplarından sırasıyla 1.59 ve 1.14 kat daha yüksek olmuştur. Şeker içeriği artırılmış (*sul-sel*) materyaller ise özellikle maltoz birikimi bakımından diğer gruplardan ayrılmıştır. Aynı çalışmada tatlı mısır grupları arasında 2.533 farklı düzeyde ifade edilen gen ile 31 farklı metabolitin belirlenmesi, tatlılık tipleri arasındaki farklılıkların yalnızca birkaç şeker bileşiğiyle sınırlı olmadığını, gen ifadesi ve metabolit birikimi düzeyinde kapsamlı değişimler bulunmuştur (Li vd., 2024).

Benzer biçimde, çeşitler arasında meydana gelen genetik ve metabolik farklılıklar aynı tatlı mısır grubunda dahi şeker düzeyinin önemli ölçüde değişebileceğini göstermektedir. Yang vd. (2021), üç ticari tatlı mısır çeşidinde sakkaroz, glukoz ve fruktozu incelemiş ve 22 gün sonra tanelerde Cupola çeşidinin toplam suda çözünabilir sakkarit düzeyinin Jinbaitian ve Jinzhongyu çeşitlerinden daha yüksek olduğunu belirlemiştir. Çalışmada 568 metabolit saptanmış ve bunların 262'sinin çeşitler arasında önemli düzeyde farklılık gösterdiği ortaya konmuştur. Demeter vd. (2021) tarafından DE, ME, GS ve KW kodlarıyla belirtilen dört süper tatlı mısır hibritinde yapılan değerlendirmede, şeker konsantrasyonları bakımından önemli farklılıklar belirlenmiş; DE ve ME kodlu hibritlerin daha yüksek, GS kodlu hibritin orta, KW kodlu hibritin ise daha düşük şeker konsantrasyonuna sahip olduğu bildirilmiştir. Bu sonuçlar genetik yapı tarafından oluşturulan temel tatlı mısır tipinin önemli olmakla birlikte, aynı tip içerisinde yer alan farklı hibrit ve çeşitlerin de sakkaroz, glukoz, fruktoz ve diğer metabolitlerin birikimi bakımından önemli farklılık gösterebildiğini ortaya koymaktadır (Yang vd., 2021; Demeter vd., 2021).

Tatlılık düzeyi aynı zamanda tane gelişimi boyunca sürekli değişen dinamik bir özelliktir. Harakotr vd. (2022), farklı resesif gen kombinasyonlarına sahip beş tatlı mısır genotipinde sakkarozun endospermdeki en yüksek miktarlı çözünür şeker olduğunu, bazı genotiplerde tozlanmadan 18 gün, bazılarında ise 22 gün sonra en yüksek seviyeye ulaştığını belirlemiştir. Süt olum döneminden sonra sakkaroz, glukoz, fruktoz ve toplam şeker miktarları azalırken nişasta, amilopektin ve fitoglikojen miktarları artmıştır. Feng vd. (2026) tarafından 14, 21 ve 28 günlük tane gelişim dönemlerinin karşılaştırıldığı çalışmada ise 21 monosakkarit, beş disakkarit ve bir trisakkarit olmak üzere toplam 27 şeker metaboliti belirlenmiştir. Sakkaroz yaklaşık 260 mg g⁻¹ ortalama düzeyle

en yüksek miktarda bulunan çözünür şeker olmuş ve süt olum döneminde en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Buna karşılık glukoz ve fruktoz erken gelişme döneminde daha yüksek düzeylerde bulunmuş ve tane gelişimi ilerledikçe belirgin biçimde azalmıştır. Araştırmada farklı şeker metabolitlerindeki en kapsamlı değişimlerin erken tane gelişim döneminden (R2) süt olum dönemine (R3) geçiş sırasında gerçekleşmesi, tatlılık mekanizmasının yalnızca genotipe değil, tane gelişiminin değerlendirildiği döneme de güçlü biçimde bağlı olduğunu göstermektedir (Harakotr vd., 2022; Feng vd., 2026).

Güncel moleküler çalışmalar, bu değişimlerin gen ifadesi düzeyinde de oldukça karmaşık biçimde kontrol edildiğini göstermektedir. Li vd. (2024), *sh2*, *sul* ve *sul-sel* gruplarının karşılaştırılmasında nişasta ve sakkaroz metabolizmasıyla ilişkili çok sayıda genin farklı ifade edildiğini ve özellikle *sh2* ile *sul-sel* arasındaki karşılaştırmanın en geniş transkripsiyonel farklılıklardan birini oluşturduğunu bildirmiştir. MYB, bHLH ve WRKY gibi transkripsiyon faktörü ailelerine ait genlerin tatlı mısır grupları arasında farklı düzeylerde ifade edildiği; araştırmacıların ise tatlı mısır tipleri arasındaki metabolik farklılıkların tek tek genlerden ziyade, gen ifadesini kontrol eden düzenleyici ağlardaki farklılıklardan kaynaklandığını vurguladıkları bildirilmiştir. Feng vd. (2026) ise doğrudan RNA dizileme yaklaşımıyla tane gelişimi süresince şeker metabolizmasını düzenleyen bir transkripsiyonel ağ oluşturmuş, dört bilinen önemli genin yanı sıra şeker metabolizmasıyla bağlantılı yedi yeni aday gen belirlemiştir. Çalışmada ayrıca poli(A) kuyruk uzunluğundaki değişimlerin transkript düzeylerini etkileyerek şeker metabolizmasının düzenlenmesine katkıda bulunabileceği ileri sürülmüş, ancak araştırmacılar bu ilişkinin henüz korelasyon düzeyinde olduğunu ve işlevsel olarak doğrulanması gerektiğini belirtmiştir (Li vd., 2024; Feng vd., 2026).

Tatlılık özelliği, klasik *sul* ve *sh2* mutantlarının ötesinde çok sayıda genin birlikte etkili olduğu karmaşık bir genetik yapı tarafından belirlenmektedir. Ashraf vd. (2026), iki yıl süreyle yürüttüğü araştırmasında; 240 tatlı mısır kendilenmiş hattında tane kabuğu kalınlığı ile glukoz, fruktoz, sakkaroz ve toplam çözünür şeker içeriklerini birlikte incelemiş ve bu özelliklerle ilişkili toplam 174 önemli tek nükleotid polimorfizmi (SNP) belirlemiştir. Söz konusu ilişkilerin 84'ünün her iki yetiştirme sezonunda da ortak olarak saptanması, bu genetik ilişkilerin farklı yıllarda tekrarlanabilir nitelikte olduğunu göstermiştir. Şeker

özellikleri ile ilişkili bölgelerde toplam 179 aday gen tanımlanmış; glukozla ilişkili bölgelerde sakkaroz sentaz, SWEET taşıyıcısı, nişasta sentaz, β -amilaz ve heksokinaz; fruktozla ilişkili bölgelerde ise fruktokinaz, monosakkarit taşıyıcısı, invertaz, fruktoz-1,6-bisfosfataz ve SnRK1 gibi adaylar belirlenmiştir. Sakkarozla ilişkili adayların da sentez, taşıma ve düzenleme süreçlerinde yoğunlaşması, tatlılık düzeyinin poligenik ve ağ temelli bir özellik olduğunu göstermektedir. Bu nedenle tatlı mısırdaki istenen şeker düzeyinin oluşumu, yalnızca belirli bir endosperm mutasyonunun varlığına değil, söz konusu mutasyonun etkisini şekillendiren daha geniş genetik yapıya ve karbon metabolizmasını düzenleyen moleküler sistemlere de bağlıdır (Ashraf vd., 2026).

Yüksek şeker içeriğini sağlayan genetik yapı, bazı genotiplerde tohum kalitesine ilişkin bazı özelliklerin olumsuz etkilenmesiyle birlikte görülebilmektedir. Xiao vd. (2023), özellikle *sh2* tatlı mısırında yüksek şeker ve düşük nişasta içeriğinin, tohum olgunlaşması sonunda karbonhidrat rezervlerinin azalmasına yol açtığını ve bu durumun düşük tohum vigoritesi ilişkili olduğunu bildirmiştir. Aynı çalışmada *sh2* endospermının olgunlaşma sırasında belirgin şekilde büzüşmesi ve tane kabuğunun kırılabilir hâle gelmesinin tohumları çevresel streslere daha duyarlı kıldığı belirtilmiştir. Harakotr vd. (2022) ise çoklu resesif gen kombinasyonlarının tüketim kalitesini geliştirebilmesine karşın bazı genotiplerde düşük çimlenme ve zayıf fide gelişimi oluşturabildiğini, kendi çalışmalarında toplam nişasta miktarının sinerjistik süper tatlı hatlarda çimlenme ve tohum gücünün önemli bir göstergesi olduğunu bildirmişlerdir. Dolayısıyla tatlı mısır ıslahında amaç yalnızca şeker içeriğinin en yüksek düzeye çıkarılması değil, yüksek tüketim kalitesi ile yeterli tohum gücü ve tarla performansını birlikte sağlayan genotiplerin geliştirilmesidir (Harakotr vd., 2022; Xiao vd., 2023).

Tatlılık mekanizmasının doğrudan genetik olarak yönlendirilebilmesi, genom düzenleme tekniklerinin tatlı mısır ıslahında kullanımına da olanak sağlamaktadır. Zhang vd. (2026), CRISPR/Cas9 sitozin baz düzenleme sistemini kullanarak *Sh2* ve *Su1* genlerini aynı genotipte eş zamanlı olarak hedeflemiş ve *sh2i su1* mutasyonlarını birlikte taşıyan tatlı mısır materyalini tek aşamada geliştirmiştir. Çalışmada elde edilen To bitkilerinde *Sh2* ve/veya *Su1* genlerinde mutasyon görülme oranı %47,4 olarak belirlenmiştir. Homozigot *sh2i su1* tanelerinde, tozlanmadan 20 gün sonra *Sh2* transkript düzeyinin mutasyon taşımayan kontrol genotipinde belirlenen düzeyin yalnızca %11,1'i kadar olduğu; nişasta miktarının 354,4

mg g⁻¹'e düřtüęü ve sakkaroz miktarının 282,2 mg g⁻¹'e ulařtıęı belirlenmiřtir. Bu sakkaroz düzeyi, mutasyon taşımayan kontrol genotipinden yaklaşık beř kat, yalnızca *sul* mutasyonunu taşıyan materyalden ise yaklaşık iki kat daha yüksek bulunmuřtur. Ayrıca tozlanmadan 30 gün sonra *sh2i* ve *sul* mutasyonlarını birlikte taşıyan tanelerdeki sakkaroz düzeyinin, yalnızca *sul* mutasyonunu taşıyan materyalin 20. gündeki düzeyine yakın olması, hedefli gen düzenlemenin yalnızca řeker içerięini artırmakla kalmayıp yüksek řeker düzeyinin korunabildięi uygun hasat süresini de uzatabileceęine iřaret etmektedir. Bu sonuçlar, tatlı mısırdaki tatlılık özellięinin doęal resesif endosperm mutasyonlarından başlayarak řeker sentezi, taşınması ve sinyal iletiminde görev alan çok sayıda genin etkileřimine ve hedefli genom düzenleme uygulamalarına kadar uzanan karmařık bir genetik yapı tarafından belirlendięini göstermektedir (Zhang vd., 2026).

İklim ve toprak istekleri

Tatlı mısırdaki büyüme ve gelişme, koęan oluşumu ve tane kalitesi; sıcaklık, yağış, toprak nemi ve toprak özellikleri başta olmak üzere çevresel etmenlerin etkisi altında belirlenmektedir. Behboud vd. (2024) tatlı mısırdaki tropik ve subtropik kořullara uyum gösterebilen bir bitki olarak tanımlamakla birlikte, özellikle çimlenme ve fide gelişimi (erken gelişme) dönemlerinde çevresel stres faktörlerine karşı duyarlılıęın yüksek olabildięini belirtmiřtir. Farklı ekolojik kořullarda yürütölen çalıřmalar, tatlı mısırdaki yarı kurak Akdeniz kořullarından nemli subtropik alanlara ve ılıman bölgelere kadar geniř bir ekolojik çevrede yetiřtirilebildięini, ancak büyüme ve gelişmenin sıcaklık ile topraktaki su varlıęına önemli ölçüde baęlı olduęunu göstermektedir. Bu nedenle tatlı mısırdaki iklim isteęinin yalnızca belirli bir sıcaklık aralıęı üzerinden deęerlendirilmesi yerine, gelişme dönemleri boyunca sıcaklık kořulları ile bitkinin su gereksiniminin birlikte dikkate alınması daha uygun bir yaklaşım olacaktır (Piscitelli vd., 2021; Behboud vd., 2024; Tupajić vd., 2026).

Sıcaklık, özellikle ekimden çıkışa kadar geęen dönemde çimlenme, tarla çıkışı ve erken fide gelişimini etkileyen başlıca çevresel etmenlerden biridir. Tupajić vd. (2026), Sırbistan kořullarında ilk ekimleri toprak sıcaklıęının en az 10–12 °C olduęu döneme göre planlamış ve geę don riskini azaltmak amacıyla tatlı mısırdaki mısırdan 10–15 gün daha sonra ekmiřtir. Bu uygulama, erken üretimde yalnızca ekim tarihinin deęil, ekim yataęındaki sıcaklıęın da dikkate alınması gerektięini göstermektedir.

Diğer taraftan yüksek sıcaklıklar da üretimi sınırlandırabilmektedir. Piscitelli vd. (2021), önceki çalışmalara dayanarak 30 °C'nin üzerindeki her 1 °C'lik sıcaklık artışının, yeterli su koşullarında dahi verim kaybıyla ilişkili olduğunu belirtmiş, yarı kurak Akdeniz koşullarında yürüttüğü denemelerde ise yaz döneminde en yüksek sıcaklıkların 30-35 °C'ye ulaştığını bildirmiştir. Dolayısıyla tatlı mısır yetiştiriciliğinde yeterince ısınmış bir toprakta ekim yapılması avantaj sağlarken, özellikle generatif gelişme dönemlerinde aşırı sıcaklık ve su yetersizliğinin birlikte ortaya çıkması üretim açısından önemli bir risk oluşturmaktadır (Piscitelli vd., 2021; Tupajic vd., 2026).

Yüksek sıcaklığın verim üzerindeki olumsuz etkisi, ticari üretim alanlarından elde edilen geniş kapsamlı verilerle de ortaya konmuştur. Dhaliwal ve Williams (2022), ABD'de 1992-2018 yılları arasında 16.040 tatlı mısır tarlasına ait verileri değerlendirerek, yetiştirme döneminde 30 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kalmanın verim kayıplarıyla ilişkili olduğunu göstermiştir. Özellikle çiçeklenme döneminde 30 °C'nin üzerindeki her ilave derece-günlük sıcaklık birikiminin, yağışa bağlı üretimde yaklaşık %2, sulanan üretimde ise %0.5 oranında verim kayıplarıyla ilişkili olduğu belirlenmiştir. Sulama yüksek sıcaklığın olumsuz etkisini azaltmış olmakla birlikte, özellikle daha yüksek sıcaklıklarda zararı bütünüyle ortadan kaldırmamıştır. Bu nedenle sıcaklık isteğinin yalnızca ortalama mevsim sıcaklığı üzerinden değil, aşırı sıcaklıkların süresi ve kritik gelişme dönemleriyle çakışması üzerinden de değerlendirilmesi gerekmektedir (Dhaliwal ve Williams, 2022).

Yağışın toplam miktarından çok, büyüme dönemi içerisindeki dağılımı ve toprakta bitkiye yarayışlı suyun sürekliliği tatlı mısır performansı açısından belirleyici olabilmektedir. Piscitelli vd. (2021), yıllık ortalama yağışın yaklaşık 550 mm olduğu ve yazların sıcak-kurak geçtiği Güney İtalya koşullarında tam sulama, %50 kısıntılı sulama ve tamamen yağışa bağlı yetiştiriciliği karşılaştırmıştır. Yağışa bağlı koşullarda bitki gelişiminin önemli ölçüde sınırlandığı ve ekimden yaklaşık 100 gün sonra dahi bitkilerin generatif döneme geçemediği, kısıntılı sulamada ise bitki gelişimi ile tane olgunlaşmasının tam sulamaya göre geciktiği belirlenmiştir. Araştırmacılar, bu tip yarı kurak Akdeniz koşullarında yalnızca doğal yağışa dayalı tatlı mısır yetiştiriciliğinin güvenilir olmadığını ve su yönetiminin üretimin temel bileşenlerinden biri olduğunu vurgulamıştır. Bununla birlikte kısıntılı sulamada sulama suyu verimliliğinin tam sulamaya göre daha yüksek olması, suyun sınırlı olduğu

bölgelerde üretim düzeyi ile su kullanım etkinliği arasında bir denge kurulabileceğini göstermektedir (Piscitelli vd., 2021).

Tatlı mısırın sıcaklık ve su koşullarına verdiği tepki, genotip ve ekim zamanının etkisine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Tupajić vd. (2026) tarafından 2022 ve 2023 yıllarında iki farklı ekim zamanı, üç farklı hibrit çeşit ve üç farklı sulama düzeyinin birlikte değerlendirildiği çalışmada; ekim zamanı, hibrit çeşit ve sulamanın verim ve şeker özellikleri üzerinde önemli etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. Deneme yıllarında aylık sıcaklıkların uzun yıllar ortalamalarının çoğunlukla üzerinde seyretmesi ve yağış rejiminin yıllar ile aylar arasında önemli farklılık göstermesi, üretim performansının yalnızca genetik yapıya değil, bitkinin kritik gelişme dönemlerinin hangi çevresel koşullara denk geldiğine de bağlı olduğunu göstermiştir. Aynı çalışmada Enterprise hibrit mısır çeşidinin bazı koşullarda ikinci ekim döneminde tam veya %50 sulama ile yüksek verim oluşturmaya karşılık, Sweet Nugget hibritinin en yüksek toplam şeker düzeylerini ilk ekim döneminde doğal nem koşullarında göstermesi, en uygun çevrenin hedeflenen özellik ve genotipe bağlı olarak değişebileceğini ortaya koymaktadır (Tupajić vd., 2026).

Tatlı mısır yetiştiriciliğinin farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip topraklarda yürütülebildiği bildirilmektedir. Piscitelli vd. (2021), yarı kurak Akdeniz koşullarındaki denemelerini pH değeri 8.1 olan, kireç bakımından zengin ve organik karbon düzeyi düşük siltli bir toprakta yürütmüştür. Islam vd. (2023) ise Malezya'da pH değeri 5.04 olan, asit reaksiyonlu, yarayışlı fosfor düzeyi düşük bir Ultisol grubu toprakta tatlı mısır yetiştirmiştir. Thapa vd. (2024) tarafından Teksas'ta yürütülen çalışmada ise pH'sı 6.89 olan ince kumlu-tınlı bir toprak kullanılmıştır. Bu farklı arazi koşulları, tatlı mısırın farklı toprak bünyelerinde yetiştirilebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, söz konusu pH, toprak bünyesi ve diğer toprak özelliklerinin tatlı mısır için genel geçer uygunluk sınırları olarak değerlendirilmesi doğru değildir. Bu değerler yalnızca ilgili araştırmaların yürütüldüğü deneme alanlarının özelliklerini yansıtmaktadır (Piscitelli vd., 2021; Islam vd., 2023; Thapa vd., 2024).

Toprak reaksiyonunun özellikle besin elementi yarayışlılığı açısından önemli olduğu bilinmektedir. Islam vd. (2023), düşük pH'lı topraklarda köklerin zarar görebildiğini ve besin elementi alımının sınırlandığını, ayrıca topraktan uygulanan bazı besin elementlerinin Fe, Al ve Ca içeren bileşiklerle etkileşime girerek bitki tarafından kullanım etkinliğinin

azalabildiğini bildirmiştir. Araştırmanın yürütüldüğü toprak pH değeri 5.04, organik madde içeriği %1.12 ve yarıyışlı P düzeyi 5.39 mg kg⁻¹ değerlerine sahip olup, asitlik ve düşük besin yarıyışlılığı üretim açısından temel kısıtlar arasında değerlendirilmiştir. Nitekim topraktan verilen gübrelerin yapraktan zenginleştirilmiş organik sıvı gübre ile desteklenmesi, besin elementi alımı, fotosentez, koçan verimi ve biyokütlede artış sağlamıştır. Bu sonuçlar, kuvvetli asit reaksiyonlu topraklarda yalnızca toplam besin elementi miktarının değil, kök bölgesindeki yarıyışlılığın da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir (Islam vd., 2023).

Benzer biçimde Tupajić vd. (2026) tarafından kullanılan deneme alanının farklı toprak katmanlarında pH 4.5-5.5 arasında değişen asit reaksiyon, düşük organik madde ve düşük azot içeriği belirlenmiştir. Araştırmacılar ekim öncesinde yapılan kireç uygulaması sonucunda pH'nın yaklaşık 6.5'e yükseldiğini ve Al ile Mn toksisitesinin azaltıldığını, ayrıca kompostlanmış sığır gübresi uygulamasının toprak yapısı ve organik madde içeriğini iyileştirmek amacıyla kullanıldığını bildirmiştir. Bu çalışma, çok kuvvetli ya da kuvvetli asit koşullarının doğrudan tatlı mısır için uygun kabul edilmemesi gerektiğini ve toprak reaksiyonunun düzeltilmesinin önem taşıdığını göstermektedir (Tupajić vd., 2026).

Toprağın yalnızca kimyasal özellikleri değil, havalanması ve drenaj durumu da tatlı mısır yetiştiriciliğinde kritik öneme sahiptir. Li vd. (2025), 185 farklı süper tatlı mısır kendilenmiş hattında su baskını koşullarını incelemiş ve tatlı mısırın su doygunluğuna karşı belirgin bir duyarlılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Su baskını uygulaması fide büyümesini önemli ölçüde sınırlandırmış, kök ve toprak üstü biyokütlesinde belirgin azalmalar meydana gelmiştir. Su ile doygun topraklarda kök bölgesindeki oksijen yetersizliği, iyon alımı ve taşınımının bozulması, fotosentetik etkinliğin azalması ve oksidatif stres oluşumu bu olumsuzluğun temel nedenleri arasında gösterilmiştir. Bu bulgular, tatlı mısır yetiştirilecek alanlarda uzun süreli su birikmesini önleyen yeterli drenaj ve kök bölgesinde uygun hava-su dengesinin sağlanmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır (Li vd., 2025).

Toprağın su tutma kapasitesi, yapısı ve besin maddelerini muhafaza etme yeteneği de, özellikle iklim değişkenliğinin yüksek olduğu koşullarda, üretimin sürdürülebilirliği açısından önem taşımaktadır. Thapa vd. (2024), ince kumlu-tınlı toprakta tavuk ve sığır gübresi ile biyokömür

uygulamalarını deęerlendirmiş ve organik düzenleyicilerin toprak besin elementi durumu ile tatlı mısırın büyüme ve verim özelliklerini önemli ölçüde etkileyebildiğini göstermiştir. Araştırmada topraktaki P, toplam N ve K düzeyleri ile bitki büyüme özellikleri arasında pozitif ilişkiler belirlenmiş, biyokömür ve organik gübre uygulamalarının toprak su tutma kapasitesi, besin elementi tutulması ve toprak sağlığını iyileştirme potansiyeline dikkat çekilmiştir. Bu sonuçlar, tatlı mısırdaki uygun toprak yapısının yalnızca bünve ve pH yönünden deęil, yeterli su ve besin sağlama kapasitesi ile fiziksel yapının süreklilięi bakımından da deęerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Thapa vd., 2024).

Sonuç olarak, tatlı mısır farklı iklim ve toprak koşullarında yetiştirilebilmekle birlikte, başarılı bir üretim için bitkinin özellikle kök bölgesinde aşırı sıcaklık, su noksanlığı, su doęunluğu ve besin elementi yetersizliği gibi çevresel streslerin sınırlandırılması gerekmektedir. Ekim döneminde toprak sıcaklığının yeterli düzeye ulaşması, büyüme süresince toprak neminin aşırı dalgalanmaması, yüksek sıcaklık ile kuraklığın eş zamanlı etkilerinin sınırlandırılması ve kök bölgesinde uzun süreli su doęunluğunun önlenmesi temel koşullar olarak öne çıkmaktadır. Toprak yönünden farklı toprak bünyelerinde yetiştiriciliğin mümkün olduęu görülmekle birlikte, kuvvetli asitlik, düşük besin yarayırlılığı, yetersiz organik madde, sıkışma ve kötü drenaj üretim performansını sınırlandırabilmektedir. Bu nedenle tatlı mısır yetiştiriciliğinde iklim ve toprak isteklerinin sabit sınırlar biçiminde deęil; genotip, ekim zamanı, toprak reaksiyonu, su tutma ve drenaj özellikleri ile bölgesel sıcaklık ve yağış rejiminin birlikte deęerlendirilmesiyle belirlenmesi daha uygun görülmektedir (Piscitelli vd., 2021; İslam vd., 2023; Thapa vd., 2024; Li vd., 2025; Tupajić vd., 2026).

Çeşit seçimi, tohumluk kalitesi ve ekim yönetimi

Tatlı mısır yetiştiriciliğinde çeşit seçimi, yalnızca yüksek verimli bir hibritin tercih edilmesi şeklinde deęerlendirilmemeli, hedeflenen tüketim biçimi, tane tatlılığı, erkencilik, tohum gücü, çevresel streslere dayanıklılık ve yetiştiriciliğin gerçekleştirileceęi ekim dönemi birlikte dikkate alınmalıdır. Tatlı mısırdaki genetik yapı doğrudan tane şeker bileşimini belirlediği gibi, tohumun çimlenme ve tarla çıkış yeteneğini de etkileyebilmektedir. Bunun yanında aynı yetiştirme koşullarında farklı hibritlerin verim ve kalite özelliklerinin önemli ölçüde deęişebilmesi, genotip × çevre × yetiştirme uygulamaları interaksiyonunun çeşit

seiminde temel bir unsur olduėunu gstermektedir. Tupajić vd. (2026), farklı ekim zamanları ve sulama kořullarında üç tatlı hibrit mısıır çeřidini karřılařtırmıř ve hibrit çeřit, ekim zamanı ve sulama faktrlerinin koan ve tane verimi ile řeker bileřimi zerinde nemli etkiler oluřturduėunu belirlemiřtir. Bu nedenle çeřit seiminin retim amacı kadar ekim zamanı ve blgenin ekolojik kořullarıyla da uyumlu biimde yapılması gerekmektedir (Tupajić vd., 2026).

eřit seiminde ncelikle kullanılacak tatlı mısıır tipinin genetik ve kalite zelliklerinin dikkate alınması nemlidir. Li vd. (2024), sekiz normal tatlı (su1), sekiz řeker ieriėi artırılmıř tatlı (su1-se1) ve sekiz sper tatlı (sh2) olmak zere toplam 24 tatlı mısıır materyalini karřılařtırmıř ve bu grupların řeker ve niřasta bileřimlerinin belirgin řekilde farklı olduėunu gstermiřtir. Sper tatlı sh2 grubunun toplam znr řeker miktarı normal tatlı ve řeker ieriėi artırılmıř tatlı gruplarından sırasıyla 1.29 ve 1.20 kat, sakkaroz miktarı ise 1.54 ve 1.33 kat daha yksek bulunmuřtur. Buna karřılık normal tatlı su1 grubunun niřasta ieriėi sh2 grubundan 1.59 kat daha yksek tespit edilmiřtir. řeker ieriėi artırılmıř materyaller ise zellikle maltoz birikimi bakımından diėer gruplardan ayrılmıřtır. Dolayısıyla taze tketimde yksek tatlılık hedefleniyorsa sh2 genetik yapısına sahip materyaller belirgin bir avantaj gsterebilmekle birlikte, çeřit seimi yalnızca řeker miktarına dayandırılmamalıdır. Tane yapısı, diėer metabolitler, olgunlařma sresi ve zellikle tohum performansı da seim kriterlerine dâhil edilmelidir (Li vd., 2024).

Tatlı mısıır hibritleri arasında erkencilik, verim ve kalite bakımından grlen farklılıklar, retim amacına uygun çeřit seiminin nemini daha aık biimde ortaya koymaktadır. Tupajić vd. (2026) tarafından incelenen Enterprise F1 yaklaşık 85 gnlk geliřme sresine sahip standart tatlı, Union F1 yaklaşık 90 gnlk geliřme sresine sahip standart kalite grubunda, Sweet Nugget F1 ise yaklaşık 65–68 gnlk geliřme sresiyle daha erkenci sper tatlı bir hibrit olarak tanımlanmıřtır. İki yıllık arařtırmada Enterprise hibriti zellikle ikinci ekim zamanında tam veya %50 sulama kořullarında yksek verim performansı gstermiř ve ilk arařtırma yılında tane verimi 16.25 t ha⁻¹'e ulařmıřtır. Buna karřılık Sweet Nugget, genel olarak Enterprise'dan daha dřk verim oluřturmasına raėmen řeker ieriėi bakımından ne ıkmıř ve toplam řeker miktarı bazı uygulamalarda %40'ın zerine ıkmıřtır. Bu bulgular, yksek verim ile en yksek tatlılıėın her zaman aynı hibritte birleřmeyebileceėini ve çeřit seiminde reticinin nceliėinin aık biimde belirlenmesi gerektiėini

göstermektedir. Buna göre taze pazar, yüksek tatlılık, erkencilik veya yüksek koçan/tane verimi gibi farklı hedefler için farklı genotiplerin tercih edilmesi gerekebilmektedir (Tupajić vd., 2026).

Çeşit seçiminin ekim başarısı açısından en kritik bileşenlerinden biri tohum gücüdür. Özellikle süper tatlı sh2 genotiplerinde yüksek şeker ve düşük nişasta içeriği, olgun tohumlarda karbonhidrat rezervlerinin azalmasıyla birlikte düşük çimlenme ve zayıf fide gelişimi sorunlarına neden olabilmektedir. Xiao vd. (2023), sh2 tatlı mısır tohumlarının kuruma sırasında endospermlerinin belirgin biçimde küçüldüğünü ve tane kabuğunun daha kırılgan hâle geldiğini, bunun çevresel streslere duyarlılığı artırdığını belirtmiştir. Aynı çalışmada düşük sıcaklığa toleranslı L282 ve duyarlı L693 hatları normal koşullarda yaklaşık %80 oranında benzer çimlenme gösterirken, düşük sıcaklık koşullarında L282'nin çimlenme düzeyi büyük ölçüde korunmuş, L693'ün çimlenmesi ise yaklaşık %53'e gerilemiştir. Bu sonuç, aynı sh2 genetik grubunda yer alan materyaller arasında dahi düşük sıcaklıkta çimlenme yeteneğinin önemli ölçüde değişebildiğini göstermektedir. Bu nedenle özellikle erken ekimin planlandığı üretim sistemlerinde yalnızca tatlılık genotipinin değil, çeşidin düşük sıcaklıktaki çimlenme ve fide gelişim performansının da dikkate alınması gerekmektedir (Xiao vd., 2023).

Tatlı mısır genotipleri arasında belirlenen bu farklılıklar, daha geniş genetik materyal gruplarında da doğrulanmıştır. Wu vd. (2024), farklı genetik kökenlere sahip 100 tatlı mısır kendilenmiş hattını 25 °C kontrol ve 10 °C düşük sıcaklık koşullarında karşılaştırmıştır. Normal sıcaklıkta ortalama çimlenme oranı %70 iken düşük sıcaklıkta bu değer büyük ölçüde gerilemiş; 10 °C'de 21 günlük değerlendirme sonunda yalnızca 14 materyalin çimlenme oranı %50'nin üzerine çıkarken 37 materyal hiç çimlenmemiştir. Buna karşılık 19hi135 hattının düşük sıcaklıktaki çimlenme oranı %94.44'e ulaşmış ve bazı genotiplerin düşük sıcaklık koşullarında yüksek performans gösterebildiği belirlenmiştir. Ayrıca normal ve düşük sıcaklıktaki çimlenme göstergeleri arasındaki ilişkilerin zayıf olması, en uygun sıcaklıkta yüksek çimlenme gösteren bir çeşidin erken ve düşük sıcaklık koşullarında aynı performansı göstereceğinin varsayılamayacağını ortaya koymaktadır. Nitekim bazı materyaller 25 °C'de tamamen çimlenmesine rağmen 10 °C'de hiç çimlenmemiştir. Bu durum, erken ekim için kullanılacak tatlı mısır çeşitlerinin düşük sıcaklık performansının ayrıca değerlendirilmesi gerektiğini açık biçimde göstermektedir (Wu vd., 2024).

Zhang vd. (2025), tohum yaşlanmasına toleransları farklı iki tatlı mısır kendilenmiş hattını hızlandırılmış yaşlandırma koşullarında incelemiştir. Yaşlandırma süresi arttıkça her iki hatta da dördüncü gündeki çimlenme oranı, toplam çimlenme oranı, çimlenme indeksi ve tohum gücü indeksinde azalma meydana gelmiştir. Bununla birlikte, yaşlandırmaya daha toleranslı L155 hattı, özellikle 3 ve 6 günlük hızlandırılmış yaşlandırma sonrasında incelenen dört tohum gücü göstergesinin tamamında duyarlı K107 hattından daha yüksek değerler göstermiştir. Araştırmacılar, tatlı mısır tohumlarında düşük nişasta birikimine bağlı olarak oluşan buruşuk tane yapısının depolama dayanıklılığını sınırlandırabildiğini ve bunun çimlenme ile fide gelişimini olumsuz etkileyebildiğini belirtmiştir. Bu nedenle tatlı mısır yetiştiriciliğinde yalnızca uygun genotipin seçilmesi değil, depolama süresince fizyolojik kalitesini ve tohum gücünü koruyabilen yüksek kaliteli tohumlukların kullanılması da düzenli ve güvenilir tarla çıkışı açısından önem taşımaktadır (Zhang vd., 2025).

Ekim zamanı, seçilen çeşidin genetik potansiyelinin ortaya çıkmasını belirleyen başlıca agronomik faktörlerdendir. Tupajić vd. (2026), Sırbistan koşullarındaki iki yıllık araştırmada ilk ekimi 30 Nisan 2022 ve 3 Mayıs 2023 tarihlerinde, ikinci ekimi ise sırasıyla 10 ve 13 Temmuz'da gerçekleştirmiştir. İlk ekim zamanı belirlenirken topraktaki çimlenme sıcaklığının en az 10-12 °C olması esas alınmış ve geç donlardan kaçınmak amacıyla ekim ticari tane mısırından 10-15 gün daha sonra yapılmıştır.. Çalışmada ekim zamanı, hibrit çeşit ve sulamanın incelenen verim özellikleri üzerinde önemli etkiler göstermesi ve yıl × ekim zamanı × hibrit × sulama interaksiyonunun yüksek çıkması, ekim tarihinin bölgenin sıcaklık, yağış ve su yönetimi koşullarıyla birlikte belirlenmesi gerektiğini göstermektedir (Tupajić vd., 2026).

Erken ekim yoluyla pazara daha erken ürün sunmak ekonomik açıdan avantaj sağlayabilmesine rağmen, özellikle süper tatlı çeşitlerde düşük toprak sıcaklığının oluşturacağı çıkış riski göz ardı edilmemelidir. Xiao vd. (2023), erken ekimin hasadı öne çekerek ekonomik avantaj sağlayabileceğini, ancak düşük sıcaklık stresinin özellikle tohum çıkışı sırasında önemli bir risk oluşturduğunu belirtmiştir. Wu vd. (2024) de erken ilkbahar yetiştiriciliğinde tatlı mısırın düşük sıcaklığa duyarlılığının temel sorunlardan biri olduğunu ve 15 °C'nin altındaki sıcaklıklarda mısır tohumlarının çimlenmesinin önemli ölçüde etkilenebildiğini bildirmiştir. Bu nedenle erkencilik hedeflendiğinde ekim tarihinin öne alınması ile tarla çıkışındaki risk arasında bir denge kurulmalı, mümkün olduğunca yüksek

tohum gücüne sahip ve düşük sıcaklıkta çimlenme yeteneği kanıtlanmış genotipler kullanılmalıdır (Xiao vd., 2023; Wu vd., 2024).

Tatlı mısır tohumunun fiziksel özellikleri de ekim işleminin başarısını etkileyebilmektedir. Behboud vd. (2024), özellikle buruşuk tatlı mısır tohumlarının mekanik ekim sistemlerinde ekim makinesinin çıkış bölümlerinde takılabildiğini ve bunun uygun ekim derinliğinin sağlanmasını güçleştirerek tarlada düzensiz bitki çıkışına neden olabileceğini belirtmiştir. Araştırmacılar, tohum kaplama uygulamalarının tohumun şekil ve yüzey özelliklerini değiştirerek mekanize ekime uygunluğunu artırabileceğini değerlendirmiştir. Kitosan, vermikülit, kaolin ve perlit içeren kaplama uygulamalarının incelendiği çalışmada kaplanmış tohumlar, özellikle kuraklık stresi altında kaplanmamış tohumlardan daha yüksek fide çıkışı ve çıkış hızı göstermiştir. En yüksek çıkış hızının uygun su koşullarında kitosan içeren kaplama uygulamasında 3.70 fide gün⁻¹ olduğu bildirilmiştir. Bu sonuçlar, tohum kaplama uygulamalarının özellikle tohum gücü düşük tatlı mısır tohumlarında çıkış ve erken fide gelişimini destekleyebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, çalışmanın sera koşullarında yürütülmüş olması nedeniyle kullanılan kaplama bileşiminin ve uygulama ayrıntılarının tarla koşullarına doğrudan genellenmesi uygun değildir (Behboud vd., 2024).

Tohum gücü bakımından çeşitler arasında belirlenen genetik farklılıkların büyüklüğü, gelecekte çeşit seçiminde moleküler markörlerden de yararlanılabileceğini göstermektedir. Cui vd. (2026), 201 süper tatlı mısır kendilenmiş hattında fide çıkış hızı ve fide uzunluğunu incelemiş, çıkış hızı için 0.95, fide uzunluğu için 0.87 düzeyinde yüksek geniş anlamda varyasyon hesaplamıştır. Üç farklı GWAS modelinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda fide çıkış hızıyla ilişkili sekiz, fide uzunluğuyla ilişkili iki ortak SNP bölgesi ve bunlarla bağlantılı 15 aday gen belirlenmiştir. Araştırmada bazı üstün allellerin bir araya getirilmesinin süper tatlı mısırdaki hızlı ve üniform çıkış özelliğinin geliştirilmesinde kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu bulgular, çeşit seçiminde gelecekte yalnızca koçan ve tane özelliklerinin değil, tarla çıkışını belirleyen genetik fide gücünün de daha sistematik biçimde dikkate alınabileceğini göstermektedir (Cui vd., 2026).

Sonuç olarak, tatlı mısırdaki çeşit seçimi ile ekim yönetimi birlikte değerlendirilmesi gereken iki temel yetiştirme unsurudur. Normal tatlı, şeker içeriği artırılmış tatlı ve süper tatlı genotipler şeker ve nişasta

bileşimi bakımından farklılık gösterirken, bu farklılıklar aynı zamanda tohum gücü ve çevresel koşullardaki fide gelişimiyle de ilişkilidir. Yüksek tatlılık amacıyla süper tatlı sh2 hibritlerinin tercih edilmesi tüketim kalitesini yükseltebilmekte, ancak özellikle düşük sıcaklıkta çimlenme bakımından daha dikkatli tohumluk ve çeşit seçimini gerektirebilmektedir. Aynı zamanda yüksek verim, erkencilik ve yüksek şeker içeriğinin her zaman aynı hibritte birleşmediği görülmektedir. Bu nedenle üretim amacı, hedef pazar, genotipin olgunlaşma süresi, düşük sıcaklık ve stres koşullarındaki çıkış performansı, tohumluğun fizyolojik kalitesi ve ekimin yapılacağı çevresel koşullar birlikte değerlendirilmelidir. Ekim zamanının ise sabit takvim tarihlerinden çok toprak sıcaklığı, don riski, su olanakları ve seçilen genotipin çevresel uyumu dikkate alınarak belirlenmesi daha güvenilir üretim yaklaşımıdır (Xiao vd., 2023; Wu vd., 2024; Li vd., 2024; Behboud vd., 2024; Zhang vd., 2025; Cui vd., 2026; Tupajic vd., 2026).

Bitki sıklığı, ekim düzeni ve yetiştirme teknikleri

Tatlı mısırdaki bitki sıklığı, birim alandaki bitki sayısını ve bitkiler arasındaki ışık, su ve besin elementi rekabetini doğrudan belirleyen temel yetiştirme faktörlerinden biridir. Bitki sayısının artırılması birim alandaki koçan sayısını yükselterek verim avantajı sağlayabilmekte, ancak aşırı sık ekim, tek bitkinin gelişimini sınırlandırarak koçan özellikleri, tane iriliği, fotosentetik aktivite, kök ve sap gelişimi üzerinde olumsuz etkiler meydana getirebilmektedir. Bu nedenle tatlı mısırdaki yüksek verim, yalnızca mümkün olan en fazla bitkinin birim alanda ekimiyle değil, genotipin sık ekime toleransı ile sıra arası ve sıra üzeri dağılımının uygun biçimde düzenlenmesiyle elde edilmektedir. Ye vd. (2023), bitki sıklığının tatlı mısırın verim ve kalite özellikleri üzerindeki etkisinin çeşidin bitki yapısına bağlı olduğunu; kompakt yapılı genotiplerin yüksek bitki sıklığından, geniş yaprak açısına sahip genotiplere göre daha fazla yararlanabildiğini göstermiştir. Benzer biçimde Stansluos vd. (2024), bitki sıklığı kadar bitkilerin tarla içerisindeki bitki deseni dağılımının da pazarlanabilir koçan ve tane veriminin belirlenmesinde etkili olduğunu ortaya koymuştur (Ye vd., 2023; Stansluos vd., 2024).

Güneydoğu Çin koşullarında dört tatlı mısır çeşidiyle yürütülen iki yıllık araştırma, bitki sıklığına verilen tepkinin genotipe bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Ye vd. (2023), kompakt bitki yapısına sahip MT6855 ve WT2015 ile daha geniş yapılı XMT10 ve YZ7 çeşitlerini 4.5, 6.0 ve 7.5 bitki m⁻² sıklıklarında ekmiştir. Bitki sıklığının artırılması,

kompakt MT6855 ve WT2015 çeşitlerinde taze koçan verimini belirgin şekilde artırırken XMT10 ve YZ7'nin taze koçan veriminde anlamlı bir artış oluşturmamıştır. En yüksek sıklığın en düşük sıklıkla karşılaştırılmasında MT6855 ve WT2015'in ortalama taze koçan verimleri sırasıyla %21.5 ve %31.2 oranında yükselmiştir. Buna karşılık yüksek bitki sıklığı, özellikle geniş yaprak açısına sahip çeşitlerde koçansız bitki oranı ile tek bitki üzerindeki rekabet baskısını artırmıştır. Bu bulgular, en uygun bitki sıklığının bütün çeşitler için tek bir değer olarak kabul edilemeyeceğini ve kompakt bitki yapısına sahip genotiplerin sık ekim koşullarında önemli bir avantaj sağlayacağını gösterir (Ye vd., 2023).

Bitki sıklığı arttıkça birim alandaki koçan sayısı artabilmekte, buna karşılık tek bitkinin verim bileşenlerinde azalma görülebilmektedir. Ye vd. (2023), sıklık arttıkça hektardaki koçan sayısının yükseldiğini, buna karşılık koçandaki tane sayısı, 1000 tane ağırlığı, dolu koçan uzunluğu ve tane dolum hızının azaldığını belirlemiştir. En yüksek bitki sıklığında dört çeşidin tamamında SPAD değerlerinin de düştüğü ve bu azalmanın iki yıllık ortalama da çeşide bağlı olarak yaklaşık %6.6–11.6 arasında değiştiği bildirilmiştir. Bununla birlikte sıklık artışının çözünür kuru madde miktarı, tane kalıntı oranı ve tane dolumu sırasında çözünür şeker, sakkaroz, fruktoz ve nişasta konsantrasyonları üzerinde önemli bir etkisi görülmemiştir. Dolayısıyla uygun genotip ve yetiştirme koşullarında bitki sıklığının artırılması, taze koçan verimini yükseltirken şeker ve nişasta içeriğinde önemli bir olumsuzluğa yol açmayabilmektedir. Araştırmacılar, kendi çalışma koşullarında kompakt bitki yapısına sahip MT6855 ve WT2015 çeşitlerinde 60.000 bitki ha⁻¹ sıklığının, taze koçan verimi ile kalite özelliklerinin birlikte değerlendirilmesi açısından uygun sonuç verdiğini bildirmiştir. Ancak bu sonuç, Güneydoğu Çin koşullarında belirli genotipler ile belirli su ve besleme koşullarında elde edildiğinden, tüm üretim bölgeleri için genel bir bitki sıklığı önerisi olarak değerlendirilmemelidir (Ye vd., 2023).

Birim alandaki bitki sayısı kadar, sıra arası ve sıra üzeri mesafeler de bitkilerin ışık, su ve besin elementlerinden yararlanma düzeyini etkilemektedir. Stansluos vd. (2024), Erzurum koşullarında Argos F1, Challenger F1 ve Khan F1 tatlı mısır hibritlerini sekiz farklı ekim düzeninde iki yıl süreyle değerlendirmiştir. Denemede 35 × 23, 40 × 21, 45 × 19, 50 × 18, 55 × 17, 60 × 16, 65 × 15 ve 70 × 15 cm sıra arası × sıra üzeri mesafeler kullanılmış ve hasat sırasındaki bitki sıklıkları kullanılan ekim desenine bağlı olarak geniş ölçüde değişmiştir. İki yıllık ortalamalara

göre, 40×21 cm sıra arası $\times$ sıra üzeri ekim düzeninde $107.456 \text{ adet ha}^{-1}$ pazarlanabilir koçan, $24.887 \text{ kg ha}^{-1}$ pazarlanabilir koçan verimi ve $19.493 \text{ kg ha}^{-1}$ taze tane verimi ile en yüksek değerler elde edilmiştir. Khan F1 hibritinin 40×21 cm ekim deseninde ise pazarlanabilir koçan verimi $29.788 \text{ kg ha}^{-1}$, taze tane verimi $22.432 \text{ kg ha}^{-1}$ 'e ulaşmıştır. Bitki sıklığı ile pazarlanabilir koçan sayısı, pazarlanabilir koçan verimi ve taze tane verimi arasındaki korelasyon katsayıları sırasıyla 0,904, 0,853 ve 0,801 olarak belirlenmiştir (Stansluos vd., 2024).

Bununla birlikte Stansluos vd. (2024) tarafından elde edilen sonuçlar, bitki sıklığının belirli bir düzeyin üzerine çıkarılmasının verimde sürekli bir artış sağlamadığını göstermektedir. Araştırmada yaklaşık 119.000 bitki ha^{-1} düzeyine karşılık gelen 40×21 cm ekim oranı yüksek pazarlanabilir koçan ve taze tane verimi oluştururken, yaklaşık 124.000 bitki ha^{-1} düzeyindeki daha yüksek bitki sıklığı koçan ve taze tane verimini azaltmıştır. Ekim düzeni; yaprak alan indeksi, fotosistem II'nin maksimum kuantum etkinliği, bitki başına koçan sayısı, koçan verimi ve taze tane verimini önemli ölçüde etkilemiştir. Bu sonuç, en uygun bitki sıklığının yalnızca birim alandaki bitki sayısına değil, sıra arası ve sıra üzeri mesafeler aracılığıyla bitkilerin tarla içindeki dağılımına da bağlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla sıra arası mesafe daraltıldığında sıra üzeri mesafenin buna uygun biçimde düzenlenmesi ve bitkilerin tarla içerisinde dengeli bir dağılım göstermesinin sağlanması, yüksek bitki sıklığından beklenen yararın elde edilmesi açısından önemlidir (Stansluos vd., 2024).

Bitki sıklığının etkisi, büyük ölçüde bitki örtüsünün yapısı ve ışığın bitki katmanları arasındaki dağılımıyla ilişkilidir. Chang vd. (2026), 80 cm sabit sıra aralığında 20 , 25 ve 30 cm sıra üzeri mesafeleri iki farklı azot düzeyiyle birlikte karşılaştırmış ve sıklığın artmasıyla koçan yaprağının SPAD değeri ile azot içeriğinin, fotosentetik hızın ve sapın bazı mekanik özelliklerinin azaldığını belirlemiştir. Yüksek bitki sıklığında ışığın üst katmanlarda daha fazla tutulması ve orta ile alt katmanlara ulaşan ışık miktarının azalması, bitki örtüsü içerisindeki dikey ışık dağılımını değiştirmiştir. Aynı çalışmada sap boğum çapı, kesit alanı, yatma ve basma dayanımı gibi mekanik özellikler de bitki sıklığının artmasıyla azalmıştır. Bu durum, sık ekimle elde edilen yüksek birim alan veriminin bitkilerin morfolojik ve mekanik dayanıklılığında ortaya çıkabilecek kayıplarla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Chang vd., 2026).

Yüksek bitki sıklığında yatma riski, besin maddesi yönetimine bağlı olarak değişebilmektedir. Chang vd. (2026) tarafından 150 ve 200 kg N ha⁻¹ uygulamalarının karşılaştırıldığı çalışmada, aynı bitki sıklığında 150 kg N ha⁻¹ uygulamasının sapın alt boğumlarının mekanik özellikleri ile kök sisteminin gelişimini 200 kg N ha⁻¹ uygulamasına göre iyileştirdiği bildirilmiştir. Kök uzunluğu, kök yüzey alanı, kök çapı, kök uçlarının sayısı ve kök hacmi gibi özelliklerdeki iyileşme, özellikle orta ve alt bitki katmanlarına ulaşan ışık miktarının artmasıyla ilişkilendirilmiştir. Dipten yatma yalnızca 2025 yılında görülmüş; 150 kg N ha⁻¹ uygulamasında ortalama yatma oranı %7,32 iken, 200 kg N ha⁻¹ uygulamasında %13,21'e yükselmiştir. En düşük yatma oranı %5.83 ile N150D25 uygulamasında elde edilmiştir. Buna rağmen koçan verimi bitki sıklığı yükseldikçe artmış ve en yüksek verim, 20 cm sıra üzeri mesafenin kullanıldığı N150D20 uygulamasında yaklaşık 29 t ha⁻¹'e ulaşmıştır. Bu sonuçlar, yüksek bitki sıklığının tek başına değil, azot yönetimi ile bitki yapısı ve ışığın bitki örtüsü içerisindeki dağılımı birlikte dikkate alınarak düzenlenmesi gerektiğini göstermektedir (Chang vd., 2026).

Tatlı mısırdaki bitki yapısı ile sık ekime uyum arasında yakın bir ilişki bulunmakta ve bu özellikler önemli ölçüde genotipe bağlı olarak değişmektedir. Du vd. (2026), 101 elit tatlı mısır kendilenmiş hattında bitki boyu, koçan yüksekliği, sap çapı, koçan ağırlığı, koçan uzunluğu ve çapı gibi 11 agronomik özelliği değerlendirmiş ve bu özelliklerin büyük bölümünde önemli genotipik farklılıklar belirlemiştir. Bitki yapısı ile ilişkili özellikler bitki örtüsü içerisinde ışık tutulmasını ve sıklık toleransını etkilerken, taze koçan ağırlığı ve diğer koçan özelliklerinde genotip $\times$ çevre etkileşimini de belirlenmiştir. İncelenen özelliklere ait geniş anlamda varyasyon 0.59–0.91 arasında değişmiş, birleşik analizde ise bazı koçan özellikleri için 0.90'ın üzerinde değerler belirlenmiştir. Çalışmada 16 önemli markör–özellik ilişkisi saptanmış ve bu bölgelerin yakınında bitki gelişimi, hormon sinyal iletimi ile karbon ve azot metabolizmasıyla ilişkili çok sayıda aday gen belirlenmiştir. Bu sonuçlar, tatlı mısır yetiştiriciliğinde yüksek bitki sıklığının uygun bitki yapısına sahip çeşitlerin seçimiyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Du vd., 2026).

Bitki sıklığının yanı sıra farklı yetiştirme sistemlerinin uygulanması da arazi kullanım etkinliğinin artırılmasına katkı sağlayabilmektedir. Yu vd. (2023), dört yıl süreyle yürüttükleri çalışmada tatlı mısırdaki tek başına yetiştirildiği sistem ile tatlı mısır–soya sıralı birlikte yetiştirme sistemini karşılaştırmıştır. Sıralı birlikte yetiştirme sisteminde tatlı mısır ve soya

sıraları 40 cm aralıklarla düzenlenmiş, tatlı mısırın sıra üzeri mesafesi 25 cm olarak uygulanmıştır. Arazi eşdeğerlik oranının (AEO) çoğu uygulamada 1.0'ın üzerinde bulunması, aynı miktardaki ürünün yalın yetiştirme sistemlerinde elde edilebilmesi için daha fazla araziye gereksinim duyulacağını ve tatlı mısır-soya birlikte yetiştirme sisteminin arazi kullanımında avantaj sağlayabileceğini göstermiştir. Tatlı mısırın rekabet oranının 1'in üzerinde ve agresiflik indeksinin pozitif olması, birlikte yetiştirme sisteminde soyaya göre daha yüksek rekabet gücüne sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca 150 kg N ha⁻¹ uygulaması, 300 kg N ha⁻¹ uygulamasına göre AEO'yu ve tatlı mısırın rekabet gücünü önemli ölçüde azaltmamış, yıllar arasında daha kararlı bir performans göstermiştir (Yu vd., 2023).

Tatlı mısır yetiştiriciliğinde tarla çıkışının sağlanma biçimi de hedeflenen bitki sıklığının oluşturulmasında etkili olabilmektedir. Ye vd. (2023), düşük veya düzensiz çıkışın bitki sıklığı denemesinin sonucunu etkilemesini önlemek amacıyla tohumları 105 gözlü viyollerde yetiştirmiş ve iki yapraklı fideleri tarlaya şaşırtmıştır. Chang vd. (2026) da benzer şekilde tatlı mısır fidelerini 105 gözlü viyollerde yetiştirerek üç yapraklı dönemde tarlaya aktarmıştır. Bu uygulamalar doğrudan ekim ile fide dikimini karşılaştıran denemeler olmadığından, fide ile yetiştirmenin tatlı mısırdaki genel olarak daha üstün olduğu sonucuna varmak mümkün değildir. Bununla birlikte söz konusu çalışmalar, özellikle bitki sıklığının hassas biçimde kontrol edilmesinin gerekli olduğu yetiştirme sistemlerinde üniform tarla çıkışının araştırma ve üretim açısından önemini göstermektedir (Ye vd., 2023; Chang vd., 2026).

Sürdürülebilir yetiştirme açısından, toprak düzenleyiciler ile organik kaynakların kullanımı tatlı mısırın büyüme ve gelişmesini etkileyebilmektedir. Thapa vd. (2024), tavuk ve sığır gübresi ile biyokömür uygulamalarını değerlendirdikleri tarla çalışmasında tatlı mısırı 60 cm sıra arası ve 30 cm sıra üzeri mesafede yetiştirmiştir. Biyokömür düzeyi biyokütleyi, organik gübre uygulamaları ise bitki boyu ile koçan uzunluğu ve çapını önemli ölçüde etkilemiştir. Topraktaki P, toplam N ve K miktarları ile bitki büyüme özellikleri arasında pozitif ilişkiler belirlenmiştir. Bu sonuçlar, bitki sıklığı ve ekim düzeninin tek başına değerlendirilmemesi gerektiğini; toprak verimliliği, besin maddesi sağlanması ve diğer yetiştirme uygulamalarının bitkiler arasındaki ışık, su ve besin elementi rekabetini etkileyebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, söz konusu çalışmanın temel konusu bitki sıklığı olmadığından,

kullanılan 60 × 30 cm ekim düzeni tatlı mısır için genel bir bitki sıklığı önerisi olarak değerlendirilmemelidir (Thapa vd., 2024).

Benzer şekilde, bitki sıklığı; sulama, ekim zamanı ve genotiple birlikte değerlendirilmesi gereken bir yetiştirme unsurudur. Tupajic vd. (2026), üç farklı hibrit çeşidi, iki ekim zamanı ve üç sulama düzeyinde yaklaşık 65.000 bitki ha⁻¹ sıklığında yetiştirmiş ve hibrit çeşit, ekim zamanı ve sulama faktörlerinin koçan ve tane verimi üzerinde önemli etkiler oluşturduğunu belirlemiştir. Yıl × ekim zamanı × hibrit × sulama arasındaki interaksiyonların önemli bulunması, aynı bitki sıklığında dahi üretim performansının çevre ve yetiştirme koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişebileceğini göstermektedir. Bu nedenle uygulamada bitki sıklığı; çeşidin bitki yapısı ve erkencilik durumu, su ve besin elementi olanakları, ekim zamanı ile beklenen çevre koşulları birlikte dikkate alınarak belirlenmelidir (Tupajic vd., 2026).

Sonuç olarak tatlı mısırdaki bitki sıklığının artırılması, özellikle sık ekime toleranslı ve kompakt bitki yapısına sahip genotiplerde birim alandaki koçan sayısını ve taze koçan verimini artırabilmektedir. Ancak bitki sıklığı arttıkça tek bitkide tane ağırlığı, koçandaki tane sayısı, dolu koçan uzunluğu, yaprak klorofil düzeyi, tane dolum hızı, sap dayanıklılığı ve bazı kök özelliklerinde azalmalar görülebilmektedir. Bu nedenle uygun bitki sıklığı, yalnızca birim alandaki bitki sayısına göre değil, verim, pazarlanabilir koçan özellikleri ve bitki dayanıklılığı birlikte değerlendirilerek belirlenmelidir.

Yapılan çalışmalar, uygun bitki sıklığının genotip, ekim düzeni, azot yönetimi, su durumu ve diğer yetiştirme uygulamalarına bağlı olarak değişebildiğini göstermektedir. Tatlı mısırdaki yüksek ve sürdürülebilir verim için uygun hibrit × bitki sıklığı × ekim düzeni kombinasyonunun belirlenmesi ve bunun sulama ile bitki besleme yönetimiyle birlikte ele alınması önem taşımaktadır (Ye vd., 2023; Yu vd., 2023; Stansluos vd., 2024; Thapa vd., 2024; Chang vd., 2026; Du vd., 2026; Tupajic vd., 2026).

Su yönetimi ve sulama stratejileri

Tatlı mısır yetiştiriciliğinde su yönetimi, bitkinin vejetatif gelişmesini sürdürmesinin yanı sıra koçan oluşumu, tane dolumu, pazarlanabilir verim ve ürün kalitesinin korunması açısından temel yetiştirme uygulamalarından biridir. Bununla birlikte sulama yönetiminin amacı yalnızca mümkün olan en fazla suyun uygulanması değil, bitkinin su gereksiniminin yağış, toprak nemi, gelişme dönemi ve genotip özellikleri

dikkate alınarak karşılanmasıdır. Yarı kurak Akdeniz koşullarında yürütülen bir çalışmada yağışa dayalı yetiştiriciliğin tatlı mısır gelişimini ciddi ölçüde sınırlandırdığı, kısıntılı sulamanın ise tam sulamaya göre büyüme ve olgunlaşmayı geciktirdiği gösterilmiştir. Diğer taraftan farklı hibritlerle yapılan çalışmalar, sulama miktarına verilen verim ve şeker içeriği tepkisinin genotipe ve ekim zamanına bağlı olarak değişebildiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla tatlı mısırdaki sulama, sabit bir su miktarının uygulanmasından çok çevre $\times$ genotip $\times$ su yönetimi interaksyonu çerçevesinde değerlendirilmelidir (Piscitelli vd., 2021; Tupajić vd., 2026).

Piscitelli vd. (2021), Güney İtalya'nın yarı kurak Akdeniz koşullarında Centurion F1 tatlı mısır hibritini iki yıl süreyle tam sulama, tam sulama gereksiniminin %50'sinin karşılandığı kısıntılı sulama ve yağışa dayalı yetiştiricilik koşullarında incelemiştir. Tam ve kısıntılı sulama uygulamalarında damla sulama kullanılmış, bitki su gereksinimi ve sulama programı FAO Penman–Monteith yaklaşımını esas alan günlük bir sulama yönetim aracıyla belirlenmiştir. Tam sulama uygulamasında yetiştirme dönemi boyunca 2019 yılında $2811 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, 2020 yılında $2912 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ sulama suyu uygulanmış, kısıntılı sulamada ise bu miktarların yarısı verilmiştir. Bu değerler, araştırmanın yürütüldüğü toprak, iklim ve yetiştirme koşullarına özgü sulama miktarlarını ifade etmekte olup, tatlı mısır için farklı ekolojik koşullarda geçerli sabit bir su gereksinimi olarak değerlendirilmemelidir (Piscitelli vd., 2021).

Su miktarındaki farklılıkların bitki gelişimine etkisi aynı çalışmada oldukça belirgin olmuştur. Tam sulanan bitkiler her iki yılda da normal generatif gelişmeye ulaşırken kısıntılı sulama bitki büyümesini ve tane olgunlaşmasını yavaşlatmıştır. Yağışa dayalı koşullarda ise yaklaşık 100 günlük bitkiler generatif döneme dahi ulaşamamış, bitkilerin küçük ve yeterince gelişmemiş olduğu bildirilmiştir. Verim bakımından tam sulama ile kısıntılı sulama arasındaki fark da önemli düzeyde gerçekleşmiştir. Pazarlanabilir koçan verimi 2019 yılında tam sulamada 21.5 t ha^{-1} , kısıntılı sulamada 8.8 t ha^{-1} ; 2020 yılında ise sırasıyla 22.1 ve 9.5 t ha^{-1} olarak belirlenmiştir. Böylece araştırmanın yürütüldüğü yarı kurak koşullarda %50 kısıntılı sulama ile elde edilen pazarlanabilir verim tam sulamanın yarısından daha düşük düzeyde kalmıştır (Piscitelli vd., 2021).

Kısıntılı sulamanın değerlendirilmesinde yalnızca toplam verim değil, kullanılan birim sulama suyundan elde edilen ürün miktarı da dikkate

alınmalıdır. Piscitelli vd. (2021), sulama suyu verimliliğini toplam kuru biyokütle, taze koçan ve tane üretimi üzerinden değerlendirmiştir. Kısıntılı sulamada toplam biyokütle ve tane üretimine ilişkin sulama suyu verimliliği tam sulamadan anlamlı biçimde daha yüksek bulunurken, taze koçan esasına dayalı sulama suyu verimliliğinde uygulamalar arasında önemli bir farklılık belirlenmemiştir. Bu sonuç, su miktarının azaltılmasının mutlak verimde önemli kayıplar meydana getirebilmesine rağmen, kullanılan suyun biyokütle ve tane üretimine dönüştürülme etkinliğini artırabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde kısıntılı sulama değerlendirilebilir, ancak sağlanan su tasarrufu ile pazarlanabilir verimde meydana gelen kayıp birlikte dikkate alınmalıdır (Piscitelli vd., 2021).

Sulama zamanının belirlenmesinde toprak neminin takip edilmesi, yağış miktarının dikkate alınması ve sulamanın bitkinin gerçek gereksinimine göre yapılması önem taşımaktadır. Tupajić vd. (2026), iki yetiştirme döneminde üç tatlı mısır hibritini doğal nem, %50 kısıntılı sulama ve %100 tam sulama koşullarında karşılaştırmış ve sulamayı damla sistemiyle uygulamıştır. Toprak nemi 0.30 m derinlikte tansiyometrelerle izlenmiş, tam sulama uygulamasında tarla su kapasitesinin %60'ının korunması hedeflenmiş ve nem durumu 3–4 günlük aralıklarla kontrol edilmiştir. Yağış ve sulamanın birlikte oluşturduğu toplam su miktarı yıl ve ekim zamanına bağlı olarak önemli ölçüde değişmiştir. Örneğin tam sulama koşullarında ana ürün ekim döneminde toplam su miktarı 418–421 mm, ikinci ekim döneminde ise 368–410 mm arasında gerçekleşmiştir. Bu durum, sulama normunun yalnızca sabit bir uygulama miktarıyla değil mevcut yağış ve toprak nemiyle birlikte belirlenmesi gerektiğini göstermektedir (Tupajić vd., 2026).

Sulama miktarının verim üzerindeki etkisi hibritlere göre farklılık gösterebilmektedir. Tupajić vd. (2026), Enterprise, Union ve Sweet Nugget hibritlerinde yıl, ekim zamanı, genotip ve sulama uygulamaları arasında önemli interaksiyonlar belirlemiştir. Enterprise hibriti, özellikle ikinci ekim döneminde tam ve %50 kısıntılı sulama altında yüksek üretkenlik göstermiş; 2022 yılında tam sulamada 16.25 t ha⁻¹ tane verimine ulaşmıştır. Buna karşılık Sweet Nugget hibritinde en yüksek toplam şeker değerleri sulanmayan doğal nem uygulamasında belirlenmiş ve toplam şeker miktarı %40'ın üzerine çıkmıştır. Araştırmacılar bu sonucu hafif su noksanlığında şeker konsantrasyonunun artmasıyla ilişkilendirmiştir. Ancak bu bulgu, su stresinin genel olarak kaliteyi iyileştireceği şeklinde

yorumlanmamalıdır. Aynı çalışma sulamanın verim üzerindeki güçlü olumlu etkisini ve yanıtın genotipe bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle sulama stratejisinin yalnızca en yüksek şeker veya en yüksek verim hedefiyle değil, her ikisinin birlikte değerlendirilmesiyle belirlenmesi gerekmektedir (Tupajic vd., 2026).

Sulamanın planlanmasında iklim ve toprak verilerinin birlikte kullanılması, sulama zamanının ve uygulanacak su miktarının daha doğru belirlenmesine katkı sağlayabilmektedir. Thapa vd. (2024), Teksas koşullarındaki tatlı mısır denemesinde dört hatlı damla sulama sistemi kullanmış ve sulama gereksinimini güncel yağış verileri, referans evapotranspirasyon ve toprak su içeriği ve bitki gelişme dönemini birlikte değerlendiren IrrigWise sistemiyle belirlemiştir. Çalışma boyunca 675 mm sulama suyu uygulanmıştır. Bununla birlikte, araştırmanın temel amacı farklı sulama düzeylerini karşılaştırmak değil, biyokömür ve organik gübre uygulamalarını değerlendirmek olduğundan, 675 mm'lik su miktarının tatlı mısır için genel bir sulama gereksinimi olarak kabul edilmesi uygun değildir. Çalışmada sulamanın; meteorolojik veriler, toprak nemi ve bitkinin gelişme dönemi dikkate alınarak planlanmış olması önem taşımaktadır (Thapa vd., 2024).

Tatlı mısırdaki su yönetimi, su eksikliğinin giderilmesinin yanında kök bölgesinde aşırı su birikiminin önlenmesini de gerektirmektedir. Li vd. (2025), 185 süper tatlı *sh2* kendilenmiş hattında su baskını koşullarını incelemiş ve tatlı mısırın su doyumluğuna karşı belirgin biçimde duyarlı olduğunu göstermiştir. Su baskını uygulamaları fide büyümesini yaklaşık %21–35 oranında azaltmış; bitki boyu, kök uzunluğu ve kök ile toprak üstü biyokütlesinde önemli gerilemeler meydana gelmiştir. Araştırmada suyla doymuş kök ortamının temel etkisinin oksijen yetersizliği olduğu, bunun iyon alımı ve taşınımı, fotosentez, azot metabolizması ve oksidatif denge üzerinde olumsuz sonuçlar oluşturduğu belirtilmiştir. Bu nedenle özellikle ağır bünyeli veya drenaj sorunu bulunan topraklarda sulama miktarı ve sıklığının su birikmesine neden olmayacak biçimde düzenlenmesi gerekmektedir (Li vd., 2025).

Sulama suyunun yalnızca miktarı değil, özelliklerinin değiştirilmesine yönelik yeni yaklaşımlar da tatlı mısır araştırmalarında incelenmiştir. Wang vd. (2026), kontrollü sera koşullarında eşit miktarda sulama suyu uygulanan tatlı mısır bitkilerinde normal yüzey suyuyla hidrojen bakımından zenginleştirilmiş suyu karşılaştırmıştır. Hidrojen bakımından

zenginleştirilmiş su damla sulama yoluyla bitkilere verilmiş ve çözünmüş H_2 konsantrasyonu 0.30–0.40 mM düzeyinde tutulmuştur. Uygulama sonucunda koçan uzunluğunun yaklaşık %5.73, koçandaki tane sayısının %10.55 ve toplam çözünür şeker içeriğinin %31.10 arttığı, boş koçan ucu uzunluğunun ise yaklaşık %60.73 azaldığı bildirilmiştir. Bunun yanında bazı besin bileşenleri ve antioksidan özelliklerde de artışlar belirlenmiştir. Bu sonuçlar hidrojenle zenginleştirilmiş suyun potansiyel bir üretim tekniği olabileceğini göstermekle birlikte, çalışma tek bir genotip ve kontrollü yetiştirme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla bu uygulamanın standart tatlı mısır sulama teknolojisi olarak önerilebilmesi için farklı çevrelerde doğrulanması gerekmektedir (Wang vd., 2026).

Yüksek sıcaklık koşullarında sulama, yalnızca topraktaki su noksanlığının giderilmesine değil, sıcaklık stresinin bitki üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılmasına da katkı sağlar. Dhaliwal ve Williams (2022), çiçeklenme döneminde 30 °C üzerindeki sıcaklıkların verim üzerindeki olumsuz etkisinin yağışa bağımlı alanlarda sulanan alanlardan daha güçlü olduğunu belirlemiş, 30 °C eşiğinin üzerindeki her ilave derecelik sıcaklık birikiminin verim kaybıyla sırasıyla yaklaşık %2 ve %0.5 olarak hesaplamıştır. Bu sonuç, yeterli su varlığının yüksek sıcaklık zararını kısmen tamponlayabildiğini, ancak sulamanın sıcaklık stresini tamamen ortadan kaldıran bir uygulama olarak değerlendirilmemesi gerektiğini göstermektedir (Dhaliwal ve Williams, 2022).

Sonuç olarak yürütülen çalışmalar tatlı mısırdaki sulama yönetiminin verim, gelişme süresi, su kullanım etkinliği ve tane kalitesi üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Özellikle yarı kurak koşullarda yalnızca doğal yağışa dayalı yetiştiricilik önemli üretim riski oluştururken, tam sulama pazarlanabilir verimi belirgin biçimde artırmaktadır. Bununla birlikte su kaynaklarının sınırlı olduğu durumlarda kısıntılı sulama, sulama suyu verimliliğini yükseltebilmekte, ancak bunun pazarlanabilir verimde oluşturabileceği kayıp dikkate alınmalıdır. Sulama yanıtının genotip ve ekim zamanına göre değişmesi nedeniyle tek bir sulama normunun bütün çeşit ve bölgeler için geçerli kabul edilmesi uygun değildir. Sulamanın yağış, evapotranspirasyon, toprak nemi ve bitki gelişme dönemine dayalı olarak programlanması ve kök bölgesinde hem aşırı kurumadan hem de uzun süreli su doygunluğundan kaçınılması, tatlı mısırdaki etkin su yönetiminin temelini oluşturmaktadır (Piscitelli vd., 2021; Thapa vd., 2024; Li vd., 2025; Tupajić vd., 2026).

Bitki besleme ve gübreleme yönetimi

Tatlı mısırdaki gübreleme ve bitki besleme yönetimi, yalnızca yüksek koçan veriminin elde edilmesi bakımından değil, tane kalitesi, şeker içeriği, protein ve lif düzeyi, fenolik bileşikler ve antioksidan özellikler gibi ürünün pazarlanabilirliğini belirleyen özellikler açısından da önem taşımaktadır. Bununla birlikte besin elementi yönetiminin, yalnızca yüksek miktarda mineral gübre uygulanmasına dayandırılması da doğru değildir. Yapılan çalışmalar, azot dozunun üretim sistemine göre belirlenmesi, fosforlu gübrelerin bitkisel artıklarla birlikte kullanılması, organik ve organomineral kaynakların mineral gübrelerle birlikte uygulanması, yapraktan besleme, mikroorganizma temelli biyostimülantlar ve mikro elementlerle besin öğelerince zenginleştirme gibi farklı yaklaşımların tatlı mısırın beslenmesinde kullanılabileceğini göstermektedir. Bu çalışmaların ortak sonucu, bitki besleme programının toprak özellikleri, yetiştirme sistemi, kullanılan çeşit ve hedeflenen verim-kalite özelliklerine göre düzenlenmesi gerektiğidir (Katsenios vd., 2022; Yu vd., 2023; Ullah vd., 2023; Islam vd., 2023; Alan vd., 2024; Das vd., 2024).

Azot, tatlı mısır üretiminde verim oluşumunu ve bitkinin besin maddesi birikimini etkileyen temel besin elementlerinden biri olmakla birlikte, yüksek doz uygulama her koşulda daha fazla üretim avantajı sağlamamaktadır. Yu vd. (2023), dört yıl süreyle tatlı mısır-soya birlikte yetiştirme sisteminde 0, 150 ve 300 kg N ha⁻¹ düzeylerini karşılaştırmıştır. Çalışmada 300 kg N ha⁻¹ geleneksel, 150 kg N ha⁻¹ ise azaltılmış azot uygulaması olarak değerlendirilmiştir. Birlikte yetiştirme sisteminde azot uygulanan bütün yıllarda arazi eşdeğerlik oranının 1'in üzerinde olması, sistemin arazi kullanım avantajını koruduğunu göstermiştir. Daha önemlisi, 300 kg N ha⁻¹ ile karşılaştırıldığında 150 kg N ha⁻¹ uygulaması verime dayalı arazi eşdeğerlik oranını ve tatlı mısırın rekabet özelliklerini önemli düzeyde azaltmamıştır. Araştırmacılar 150 kg N ha⁻¹ uygulamasının yıllar arasında daha kararlı sonuç verdiğini ve tatlı mısır-soya sisteminde azot girdisinin azaltılması açısından potansiyel taşıdığını belirtmiştir. Bununla birlikte bu sonuç, her tatlı mısır üretim sistemi için 150 kg N ha⁻¹'in en uygun doz olduğu anlamına gelmemektedir; elde edilen bulgular, birlikte yetiştirme sistemi ile araştırmanın yürütüldüğü toprak ve iklim koşullarına özgüdür (Yu vd., 2023).

Fosfor yönetiminde mineral gübrelerle mısır ve sorgum hasat artıklarının birlikte kullanılması da tatlı mısırın gelişimini ve verimini

artırabilecek bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Ullah vd. (2023), farklı fosfor kaynakları ile mısır ve sorgum hasat artıklarını iki yıllık tarla denemesinde karşılaştırmış; fosforu 90 kg ha⁻¹, hasat artıklarını ise 5 t ha⁻¹ düzeyinde uygulamıştır. Diamonyum fosfat (DAP), tek süperfosfat (SSP) ve azot-fosfor (NP) gübresi olmak üzere farklı fosfor kaynaklarının değerlendirildiği çalışmada, en yüksek değerler diamonyum fosfat ile mısır hasat artıklarının birlikte uygulandığı koşullarda elde edilmiştir. Söz konusu uygulamada bitki boyu 178 cm'ye, 1000 tane ağırlığı 233 g'a, biyolojik verim 11.349 kg ha⁻¹'e ve tane verimi 3.760 kg ha⁻¹'e ulaşmıştır. Araştırma, fosforlu gübrelerin mısır ve sorgum hasat artıklarıyla birlikte uygulanmasının, yalnızca mineral fosfor gübrelemesine göre farklı bir bitki besleme yaklaşımı oluşturabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, çalışmada kullanılan 90 kg ha⁻¹ P dozu araştırmanın yürütüldüğü koşullara özgüdür ve başlangıçtaki toprak fosfor düzeyi, kullanılan fosfor kaynağı ve hasat artıklarının C/N oranı dikkate alınmadan genel bir tatlı mısır gübreleme önerisi olarak değerlendirilmemelidir (Ullah vd., 2023).

Organik kaynakların mineral gübrelerle birlikte kullanımında kompost ve tarımsal-endüstriyel artıklar da önemli seçenekler arasında yer almaktadır. Salman vd. (2023) yaptıkları çalışmada, lahanagiller (*Brassicaceae*) bitki artıklarından ve evsel atıklardan hazırlanan kompostları 9 t ha⁻¹ düzeyinde, şeker kamışı arıtma çamurunu ise 2 t ha⁻¹ düzeyinde tatlı mısırdaki değerlendirmiştir. Evsel atık kompostu, lahanagiller artığı kompostuna göre daha yüksek biyolojik ve tane verimi sağlamış; ortalama biyolojik verim evsel kompostta 9004.2 kg ha⁻¹, lahanagiller kompostunda 8317.2 kg ha⁻¹ ve kontrol uygulamasında 7045.7 kg ha⁻¹ olarak belirlenmiştir. Evsel atık kompostu ile şeker kamışı arıtma çamurunun birlikte uygulanması biyolojik verimi 9555 kg ha⁻¹'e, tane verimini ise 3047 kg ha⁻¹'e yükseltmiştir. Aynı kombinasyonda koçan uzunluğu, koçan ağırlığı ve koçandaki tane sayısında da artışlar görülmüştür. Çalışmanın sonuçları, organik materyalin yalnızca miktarının değil, kaynağının ve bileşiminin de tatlı mısırın beslenme ve verim tepkisini belirlediğini ortaya koymaktadır (Salman vd. 2023).

Organik ve mineral besin kaynaklarının birlikte kullanımına benzer şekilde, vermikompost ve biyostimülant uygulamalarının da tatlı mısırın beslenme ve verim özellikleri üzerinde olumlu etkiler oluşturabildiği bildirilmiştir. Das vd. (2024), tatlı mısırdaki %100 önerilen kimyasal gübre dozu, %100 vermikompost ve mineral-organik kaynakların farklı kombinasyonlarını iki yıl süreyle karşılaştırmıştır. Araştırmada kimyasal

gübre için kullanılan önerilen doz 150:75:75 kg ha⁻¹ N:P₂O₅:K₂O olarak belirlenmiştir. En yüksek koçan verimi %100 kimyasal gübre uygulamasında 2018 ve 2019 yıllarında sırasıyla 10.75 ve 10.79 t ha⁻¹ olarak elde edilmiş; %50 kimyasal gübre + %50 vermikompost uygulaması ise 9.92 ve 10.00 t ha⁻¹ ile bu uygulamaya istatistiksel olarak yakın performans göstermiştir. Buna karşılık %100 vermikompost uygulamasında verim daha düşük olmasına rağmen büyük koçan oranı ve bazı besin kalitesi özellikleri iyileşmiştir. Tam vermikompost uygulamasında antioksidan kapasite 8.35–8.45 mg g⁻¹, karotenoid miktarı 0.59–0.61 mg 100 g⁻¹ ve fenolik bileşik miktarı yaklaşık 55 mg 100 g⁻¹ düzeyine ulaşmıştır. Ayrıca *Ascophyllum nodosum* kökenli uygulamaların toplam şeker ve toplam çözünür kuru madde miktarını artırabildiği bildirilmiştir. Bu bulgular, en yüksek verimi sağlayan besleme uygulamasının her zaman biyokimyasal kalite açısından da en uygun uygulama olmayabileceğini göstermektedir (Das vd., 2024).

Organomineral gübreler, organik madde ile mineral besin elementlerini birlikte içeren ve bitkiye bu iki kaynağı aynı uygulama içerisinde sağlayan gübrelerdir. Alan vd. (2024), iki yıl süreyle yürüttükleri çalışmada *sh2* genini taşıyan Sentinel F1 ve Khan F1 çeşitlerinde iki farklı organomineral formülasyonu kimyasal gübreleme ve gübresiz kontrol ile karşılaştırmıştır. OMF I, 8:8:8 NPK formülasyonunun yanı sıra %30 organik madde ve %9 hümitik + fulvik ekstrakt; OMF II ise 12:15:5 NPK, %20 organik madde ve %7 hümitik + fulvik ekstrakt içermiştir. Araştırmada bütün gübreleme uygulamaları kontrolle karşılaştırıldığında büyüme, koçan verimi ve kalite özelliklerinin önemli bölümünü geliştirmiş, organomineral uygulamalar bazı özelliklerde kimyasal gübreye benzer veya daha yüksek değerler vermiştir. Özellikle Khan çeşidinde OMF I uygulaması koçan boyutları, kavuzlu ve kavuzsuz koçan ağırlığı ve verimi, renk özellikleri, toplam fenolik içerik ve antioksidan aktivite bakımından öne çıkmıştır. Ayrıca iki organomineral formülasyona verilen yanıtların çeşide göre farklılaşması, organomineral gübrelerin performansının ürün bileşimi ile genotipin birlikte değerlendirilmesini gerektirdiğini göstermektedir (Alan vd., 2024).

Mineral ve organik besin kaynaklarının birlikte kullanımının agronomik ve ekonomik etkileri, Setyorini vd. (2023) tarafından Inceptisol grubu bir toprakta Talenta tatlı mısır çeşidi kullanılarak değerlendirilmiştir. Önerilen gübre dozunun uygulanmadığı, yarı doz ve tam doz uygulamaları farklı sıvı organik gübre konsantrasyonlarıyla karşılaştırılmış, en yüksek üretim tam gübre dozu + 4 g L⁻¹ sıvı organik gübre uygulamasında 13.339

kg ha⁻¹ olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte yarı gübre dozu + 4 g L⁻¹ sıvı organik gübre uygulamasında 13.071 kg ha⁻¹ ürün elde edilmiş, bağıl agronomik etkinlik %231.2 ve gelir/maliyet (R/C) oranı 8.65 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, belirli toprak ve yetiştirme koşullarında organik ve mineral gübre kaynaklarının birlikte kullanılmasının gübre kullanım etkinliği ile ekonomik getiri arasında uygun bir denge sağlayabileceğini göstermektedir. Ancak araştırmada kullanılan gübre dozlarının farklı ekolojik koşullar ve yetiştirme sistemleri için doğrudan genellenmesi uygun değildir (Setyorini vd., 2023).

Toprak koşullarının besin elementi yarıyışlılığını sınırlandırdığı durumlarda yapraktan besleme, kök bölgesinden beslenmeyi tamamlayıcı bir uygulama olarak kullanılabilir. İslam vd. (2023), başlangıç pH'sı yaklaşık 5.04 olan asit reaksiyonlu bir toprakta, önerilen gübre dozunun tamamının topraktan uygulandığı kontrol ile önerilen dozun %75'ine ek olarak zenginleştirilmemiş muz yalancı gövde suyunun ve önerilen dozun %50'sine ek olarak N, P, K ve B ile zenginleştirilmiş muz yalancı gövde suyunun yapraktan uygulandığı işlemleri karşılaştırmıştır. Önerilen gübre dozunun %50'si ile zenginleştirilmiş muz yalancı gövde suyunun birlikte uygulanması, kontrole göre yaprak alan indeksini yaklaşık %11.3, fotosentez hızını %12, taze koçan verimini %39 ve biyokütleyi %29 artırmıştır. Bu uygulamada Mg ve Zn dışındaki besin elementlerinin alımı daha yüksek bulunurken, Mg ve Zn alımı zenginleştirilmemiş muz yalancı gövde suyu uygulamasında daha yüksek gerçekleşmiştir. Araştırmacılar bu durumu, zenginleştirilmiş çözültideki yüksek K ve Ca düzeylerinin Mg ve Zn alımı üzerindeki olası antagonistik etkisiyle ilişkilendirmiştir. Ayrıca zenginleştirilmiş yaprak uygulaması tane protein içeriğini yaklaşık %16.5 artırmış; şeker, fenolik bileşikler, çözünür protein ve amino asit miktarlarında da artış sağlamıştır (İslam vd., 2023).

Yapraktan magnezyum (Mg) uygulamasının tatlı mısırdaki besin elementi alımı, verim ve tane karbonhidrat bileşimi üzerindeki etkileri de tarla koşullarında incelenmiştir. Ye vd. (2025), Mg bakımından yetersiz asit toprakta ve 60.000 bitki ha⁻¹ sıklığında yürüttükleri çalışmada, %4 MgSO₄·7H₂O uygulamasının taze koçan verimini, koçan ağırlığını, taze tane ağırlığını ve koçandaki tane sayısını artırırken tane bağlamama oranını azalttığını belirlemiştir. Aynı uygulama N, K, Ca ve Mg birikimini artırmış; koçan püskülü çıkarma (R1) ve süt olum (R3) dönemlerinde koçan yaprağı SPAD değerleri kontrole göre sırasıyla ortalama %6.9 ve %9.3 daha yüksek bulunmuştur. Toplam Mg alımının yaklaşık %21.1'inin

koçan püskülü çıkarma döneminden sonra gerçekleşmesine karşılık, vejetatif dokulardan yeniden taşınan Mg'nin toplam birikime katkısının %5'in altında kalması, generatif dönemde Mg alımının devam etmesinin önemini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, çalışmada kullanılan %4'lük konsantrasyon ve toplam 8.78 kg Mg ha⁻¹ uygulaması tek çeşit, tek lokasyon ve Mg bakımından yetersiz toprak koşullarına özgü olduğundan genel bir gübreleme önerisi olarak değerlendirilmemelidir (Ye vd., 2025).

Tatlı mısırın beslenmesinde yalnızca doğrudan besin elementi sağlayan gübreler değil, rizosferde ve bitki fizyolojisinde beslenme süreçlerini destekleyen mikroorganizmalar da araştırılmaktadır. Katsenios vd. (2022), Akdeniz koşullarındaki on farklı bitki gelişimini teşvik eden bakteri uygulamasını değerlendirmiştir. *Bacillus mojavensis* kontrolle karşılaştırıldığında verimi %16, *B. subtilis* %13.8, *B. pumilus* %11.8 ve *B. pseudomycoides* %9.8 oranında artırmıştır. *B. mojavensis*, *B. pumilus* ve *B. subtilis* uygulamaları aynı zamanda tane protein ve lif içeriğinin en yüksek olduğu uygulamalar arasında yer almıştır. Protein miktarı kontrole göre *B. mojavensis* uygulamasında yaklaşık %43, *B. pumilus*'ta %37 ve *B. subtilis*'te %30 daha yüksek bulunmuştur. Lif içeriğindeki artışlar ise sırasıyla *B. pumilus*, *B. subtilis* ve *B. mojavensis* uygulamalarında yaklaşık %95, %86 ve %71 olarak gerçekleşmiştir. Bununla birlikte tane yapısı, iriliği ve küresellik derecesi bakteriyel uygulamalardan önemli düzeyde etkilenmemiştir. Bakteri suşlarına verilen yanıtların farklılık göstermesi, PGPB kullanımında suş × bitki × çevre interaksiyonunun dikkate alınması gerektiğini göstermektedir (Katsenios vd., 2022).

Mikro elementlerin yapraktan uygulanması, tatlı mısırdaki yalnızca bitki besleme amacıyla değil aynı zamanda yenilebilir tane kısmının besin değerini artırmaya yönelik yetiştirme uygulamalarıyla besin öğelerince zenginleştirme amacıyla da değerlendirilmektedir. Asamoah vd. (2025), tatlı mısırdaki yapraktan 0, 20, 40 ve 60 g Se ha⁻¹ uygulamalarını karşılaştırmıştır. Orta düzeydeki 20–40 g ha⁻¹ Se uygulamaları klorofil düzeyinin korunmasını ve fotosentetik etkinliğin artmasını sağlamış, antioksidan enzim sistemini desteklemiş ve malondialdehit miktarını kontrole göre %22.8 azaltmıştır. Taze koçan verimi 20 g ha⁻¹ Se uygulamasında %5.7, 40 g ha⁻¹ Se uygulamasında %2.0 artarken, 60 g ha⁻¹ Se uygulaması verimde %5.2 azalmaya neden olmuştur. Orta düzeydeki Se uygulamalarında çözünür şeker, amiloz, protein ve C vitamini içerikleri ile Mg, Fe, Cu ve Mn gibi mineral elementlerin düzeylerinde de artışlar belirlenmiştir. Ayrıca tanede biriken Se'nin büyük bölümünün

selenometiyonin formunda bulunduđu ve bu formun toplam Se içeriđinin %82.3'ünü oluřturduđu, bildirilmiřtir. Buna karřılık en yksek Se dozunun oksidatif denge üzerinde olumsuz etkiler oluřturması, mikro element uygulamalarında doz artıřının her zaman olumlu sonu vermediđini ve uygun dozun belirlenmesinin nem tařıdığını gstermektedir (Asamoah vd., 2025).

Bitki beslemede arařtırılan daha yeni yaklařımlardan biri de nano-gbrelerdir. Salama vd. (2026), potasyum kaynađı olarak sentezlenen potasyum ferrit nanopartikllerini (KFeO₂-NP) sarı ve beyaz tatlı mısır eřitlerine 0, 25, 50, 75 ve 100 mg L⁻¹ konsantrasyonlarında yapraktan uygulamıřtır. Uygulamaya verilen yanıtın belirgin biimde eřide bađlı olduđu, sarı taneli eřitte 50 mg L⁻¹, beyaz taneli eřitte ise 100 mg L⁻¹'in birok byme ve verim zelliđi bakımından daha etkili olduđu belirlenmiřtir. Genel deđerlendirmede 50 mg L⁻¹ uygulaması koan ađırlığını yaklaşık %33.5 ve yeřil koan verimini %32.6-32.8 oranında artırmıřtır. eřit × uygulama interaksiyonunda ise sarı taneli eřitte en uygun uygulamayla yeřil koan verimindeki artıř yaklaşık %47'ye, beyaz taneli eřitte %33'e ulařmıřtır. KFeO₂-NP uygulamaları tanedeki N, P ve K miktarlarını da farklı řekilde etkilemiř, en yksek N ve K miktarları genel olarak 75 mg L⁻¹ uygulamasında belirlenirken, P iin aynı dođrusal artıř grlmemiřtir. Bunun yanında toplam řeker, protein, fenol, flavonoid ve indol dzeylerinin farklı konsantrasyonlarda maksimum deđerlere ulařması, nano-gbre yanıtının doza ve hedeflenen kalite zelliđine gre deđiřtiđini gstermiřtir. Arařtırmacılar ayrıca en yksek konsantrasyonlarda genom kararlılıđında bazı deđiřiklikler belirlediđinden, nano-gbre uygulama dozunun yalnızca verim artıřı aısından deđil, fizyolojik ve genetik gvenlik bakımından da uygun dzeyde belirlenmesi gerektiđini vurgulamıřtır (Salama vd., 2026).

Sonu olarak tatlı mısırdaki gbreleme ve bitki besleme ynetiminin yksek dozda tek bir mineral gbre kaynađına dayandırılmasından ziyade, toprak analizi ve yetiřtirme kořullarını dikkate alan btnleřik bir yaklařımla yrtlmesi daha uygun grnmektedir. Yrtlen arařtırmalarda azaltılmıř azot dozlarının uygun retim sistemlerinde verim avantajını koruyabildiđi, fosforlu gbrelerin bitkisel artıřlarla birlikte kullanımının retkenliđi artırabildiđi, vermikompost ve organomineral gbrelerin mineral kaynakların bir blmn tamamlayabildiđi ve bazı durumlarda kalite zelliklerini geliřtirdiđi gsterilmiřtir. Benzer řekilde yapraktan organik besin zeltileri, PGPB (Plant Growth-Promoting

Bacteria-Bitki Gelişimini Teşvik Eden Bakteriler) uygulamaları, Se ile besin öğelerince zenginleştirme ve nano-gübreler tatlı mısırın beslenmesi açısından potansiyel taşımaktadır. Bununla birlikte bu uygulamaların etkileri genotip, uygulama dozu, toprak koşulları ve ekolojik şartlara göre değişmektedir. Bu nedenle mevcut çalışmalarda başarılı bulunan 150 kg N ha⁻¹, 90 kg P ha⁻¹, belirli organik materyal miktarları veya Se ve nano-gübre konsantrasyonları bütün tatlı mısır yetiştirme koşullarında doğrudan aktarılabilir dozlar olarak değil, ilgili araştırma koşullarında elde edilmiş sonuçlar olarak değerlendirilmelidir (Katsenios vd., 2022; Salman vd., 2023; Yu vd., 2023; Ullah vd., 2023; Islam vd., 2023; Alan vd., 2024; Das vd., 2024; Asamoah vd., 2025; Salama vd., 2026).

Yabancı ot, hastalık ve zararlı yönetimi

Tatlı mısır yetiştiriciliğinde yabancı otlar, hastalık etmenleri ve zararlılar bitki gelişimini, pazarlanabilir koçan verimini ve ürün kalitesini sınırlandırabilen önemli biyotik faktörlerdir. Bununla birlikte bitki koruma uygulamalarında yalnızca yüksek düzeyde kimyasal girdi kullanımına dayanan bir yaklaşım yerine, yetiştirme teknikleri, genotip seçimi, biyolojik mücadele ve gerektiğinde kimyasal uygulamaların bir arada değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Yapılan çalışmalar özellikle yabancı otların örtü bitkileri ve canlı malçlarla baskılanması, tatlı mısır genotiplerinin mesotrione ve nicosulfuron etken maddeli herbisitlere karşı farklı duyarlılık göstermesi, rastık etmeni *Ustilago maydis* enfeksiyonunun uzaktan algılama yöntemleriyle izlenmesi, *Fusarium* koçan çürüklüğüne neden olan *Fusarium graminearum* ve *F. verticillioides* enfeksiyonlarının ürün kalitesi üzerindeki etkileri ile Asya mısır kurduna (*Ostrinia furnacalis*) karşı entomopatojen fungus *Beauveria bassiana* kullanımının potansiyeli üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu bulgular, tatlı mısırdaki bitki koruma stratejisinin yalnızca zararlı organizmanın baskılanmasına değil, aynı zamanda uygulamanın üründe meydana getirebileceği fitotoksisite ve verim kayıplarının önlenmesine de dayanması gerektiğini göstermektedir (Yurchak vd., 2023; Feng vd., 2023; Radócz vd., 2023; Lv vd., 2024; Wang vd., 2024; Wang vd., 2025; Xue vd., 2025).

Tatlı mısırdaki yabancı ot yönetimine yönelik alternatif yaklaşımlar arasında örtü bitkileri ile canlı ve ölü malçların birlikte kullanılması dikkat çekmektedir. Yurchak vd. (2023), üç yetiştirme sezonunda geleneksel toprak işleme, örtü bitkisi artığı altında doğrudan ekim, canlı malç + çavdar artığı ve canlı malç + kış koşullarında doğal olarak ölen yem turpu artığı

sistemlerini, ekim sırasında herbisit uygulanan ve uygulanmayan koşullarda karşılaştırmıştır. Çalışmada canlı malç olarak kırmızı üçgül (*Trifolium incarnatum* L.) kullanılmış, yabancı ot kontrolünün kimyasal bileşeni olarak ise ekimden sonra atrazin ve S-metolachlor uygulanmıştır. Tatlı mısır ekiminden altı hafta sonra yapılan değerlendirmelerde, geleneksel toprak işleme + herbisitsiz uygulamada yabancı ot biyokütlesinin örtü bitkili uygulamaların büyük bölümüne göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Canlı malç + çavdar ve canlı malç + yem şalgamı uygulamalarına herbisit eklenmesi ise yabancı ot biyokütlesinde ilave bir azalma sağlamamıştır. Hasat döneminde de benzer bir eğilim görülmüş ve canlı malç ile örtü bitkisi artıklarının birlikte kullanıldığı sistemlerin yabancı otları, herbisit uygulanmış geleneksel sisteme benzer düzeyde baskılayabildiği ortaya konulmuştur (Yurchak vd., 2023).

Örtü bitkilerinin yabancı otları baskılama etkinliği, tatlı mısırın gelişimi ve verimi üzerindeki etkileriyle birlikte değerlendirilmelidir. Yurchak vd. (2023), çavdar artığı ile canlı malç kombinasyonunun hasat döneminde herbisitsiz doğrudan ekim sisteminden daha düşük yabancı ot biyokütlesi oluşturduğunu ve herbisit kullanılan doğrudan ekime benzer yabancı ot baskısı sağladığını bildirmiştir. Bununla birlikte sistemlerin tatlı mısır verimine etkisi yıllara göre farklılık göstermiştir. 2020 yılında bitki sayısı, yaprak klorofil miktarı, bitki gelişimi ve toplam verim bakımından uygulamalar arasında önemli farklılık görülmezken, 2021 yılında özellikle herbisit uygulanmayan bazı örtü bitkisi uygulamalarında klorofil miktarı, bitki boyu ve verimde azalmalar tespit edilmiştir. Araştırmada 2021 yılındaki sınırlı su stresi ve örtü bitkisi–tatlı mısır arasındaki olası su ve azot rekabetinin yanı sıra erken dönemde meydana gelen kokarca zararının da bu verim azalmasına katkıda bulunmuş olabileceği belirtilmiştir. Dolayısıyla örtü bitkileri yabancı otları baskılayabilmekle birlikte, ana ürünle su, ışık ve besin elementleri yönünden rekabet oluşturmaması için sistemin çevre koşullarına uygun biçimde yönetilmesi gerekmektedir (Yurchak vd., 2023).

Kimyasal yabancı ot mücadelesinde temel sorunlardan biri, tatlı mısır genotiplerinin bazı herbisitlere farklı düzeyde tolerans göstermesidir. Lv vd. (2024), mesotrione toleranslı 301 hattı ile duyarlı 276 hattını karşılaştırmış ve dört yapraklı dönemde uygulanan mesotrione sonrasında iki genotipin belirgin şekilde farklı tepki verdiğini göstermiştir. Uygulamadan 14 gün sonra toleranslı hat gelişimini sürdürebilirken, duyarlı hattaki fideler ciddi zarar görmüş ve ölmüştür. Uygulamadan

sonraki 3–7 günlük dönemde toleranslı hatta yaş ağırlıktaki azalma %12.9–39.5, bitki boyundaki azalma ise %4.5-7.5 arasında değişirken; duyarlı hatta bu azalmalar sırasıyla %19.6-47.8 ve %5.5-41.1 olarak belirlenmiştir. Mesotrione uygulaması sonrasında toleranslı hattın ortalama taze ağırlığı ve bitki boyu, duyarlı hatta göre sırasıyla %56.4 ve %18.2 daha yüksek bulunmuştur (Lv vd., 2024).

Genotipler arasında mesotrione toleransı bakımından belirlenen bu farklılıkların fizyolojik süreçlerle de ilişkili olduğu görülmektedir. Lv vd. (2024), mesotrione uygulamasından sonra toleranslı 301 hattında fotosentez ve ışık toplama kompleksleriyle ilişkili genlerin daha etkin biçimde korunduğunu, duyarlı 276 hattında ise fotosentetik performansın daha fazla bozulduğunu belirlemiştir. Duyarlı hatta reaktif oksijen türlerinin birikiminin arttığı, buna karşılık toleranslı hattın antioksidan savunma kapasitesinin daha güçlü olduğu görülmüştür. SOD, POD ve CAT gibi antioksidan enzim aktivitelerinin uzun süreli maruziyet altında duyarlı hatta daha fazla azalması, herbisit zararına dayanıklılığın yalnızca herbisit hedef bölgesiyle değil fotosentetik sistemin korunması ve oksidatif stresin kontrolüyle de ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, tatlı mısırdaki herbisitlerin “ürün türü düzeyinde güvenli” kabul edilmesinden çok, kullanılan hibrit çeşit veya genotipin toleransının dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Lv vd., 2024).

Benzer bir genotipik farklılık nicosulfuron uygulamasında da belirlenmiştir. Wang vd. (2024), nicosulfurona dayanıklı HK301 ve duyarlı HK320 tatlı mısır kardeş hatlarını incelemiş ve duyarlı hattın nicosulfurondan belirgin biçimde daha fazla etkilendiğini göstermiştir. Araştırmada graphene oxide (GO) ile nicosulfuronun birlikte uygulanması, yalnızca nicosulfuron uygulamasına göre HK320 hattındaki fotosentetik zararı önemli ölçüde azaltmıştır. Uygulamadan 10 gün sonra GO-NIF uygulamasında duyarlı hattın net fotosentez hızı yalnızca NIF uygulamasına göre %328.31 daha yüksek bulunmuş, Fv/Fm gibi fotosistem II göstergelerinde de belirgin iyileşmeler saptanmıştır. Ayrıca GO-NIF uygulaması SOD, POD, CAT ve APX aktivitelerini artırmış ve nicosulfuronun oluşturduğu oksidatif baskıyı azaltmıştır. Ancak bu çalışmada doğrudan yabancı ot kontrol etkinliği değil, nicosulfuronun tatlı mısırdaki oluşturduğu fitotoksik etkinin azaltılması araştırılmıştır. Bu nedenle GO-NIF uygulamasının, mevcut bulgular doğrultusunda standart bir tarla uygulaması olarak değil, nicosulfuron kaynaklı fitotoksiteyi

azaltmaya yönelik bir yaklaşım olarak değerlendirilmesi daha uygundur (Wang vd., 2024).

Nicosulfuron fitotoksitesinin metabolik boyutu Wang vd. (2025) tarafından yapılan çalışmada daha ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Araştırmada dayanıklı HK301/H01 ve duyarlı HK320/H20 hatlarında nicosulfuron, GO ve GO + nicosulfuron uygulamalarının etkileri incelenmiş; nicosulfuron uygulamasında duyarlı H20 hattının fide yaşama oranı sıfıra kadar düşerken, GO + nicosulfuron uygulamasında bu oran %91.10'a yükselmiştir. Metabolom analizleri nicosulfuron sonrasında H01 ve H20 hatlarında sırasıyla 70 ve 90 metabolitin farklı düzeyde biriktiğini, GO uygulamasının H01'de 59, H20'de ise 56 nicosulfurona yanıt veren metaboliti normal düzeylere yaklaştırdığını göstermiştir. Özellikle fenolik bileşikler ve flavonoid metabolizmasındaki değişimler, herbisit toleransı ile ilişkili metabolik savunmanın önemli olabileceğine işaret etmiştir. Bu bulgular herbisitlerin tatlı mısırdaki genotipe bağlı fizyolojik ve metabolik etkiler oluşturabileceğini doğrulamakta ve yabancı ot yönetiminde hibrit seçimi ile herbisit toleransının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini desteklemektedir (Wang vd., 2025).

Tatlı mısır hastalıkları bakımından önemli etmenlerden biri rastık (*Ustilago maydis*)'tır. Radócz vd. (2023), iki tatlı mısır ve iki silajlık mısır hibritinde farklı yoğunluklarda yapay *U. maydis* enfeksiyonu oluşturmuş ve hastalık gelişimini çok bantlı (multispektral) insansız hava aracı görüntüleriyle izlemiştir. Tatlı mısır hibritleri Dessert R 73 ve NOA'da enfeksiyon şiddetinin bitki örtüsünün spektral özellikleri üzerinde anlamlı etkiler meydana getirdiği belirlenmiştir. Dessert R 73 hibritinde en yüksek enfeksiyon düzeyi olan 10.000 sporidium mL⁻¹ uygulaması, kontrolle karşılaştırıldığında NDVI, GNDVI ve LCI indekslerinde anlamlı düşüşler meydana getirmiştir. NOA hibritinde ise enfeksiyon düzeylerinin ayrılmasında özellikle GNDVI ve ENDVI etkili olmuştur. GNDVI'nın her iki tatlı mısır hibrit çeşidinde de enfeksiyonun izlenmesinde güçlü performans göstermesi, çok bantlı görüntülemenin *U. maydis* kaynaklı fizyolojik değişimlerin tarla ölçeğinde izlenmesinde kullanılabileceğini göstermektedir (Radócz vd., 2023).

Bu bulguların bitki koruma açısından önemi, hastalığın doğrudan kontrolünden çok, erken dönemde ve geniş alanlarda izlenmesine olanak sağlamasıyla ilişkilidir. Radócz vd. (2023), enfeksiyondan 7, 14 ve 21 gün sonra yapılan görüntülemelerde enfeksiyon yoğunluğu arttıkça bazı

vegetasyon indekslerinin azaldığını belirlemiştir. Bununla birlikte araştırmacılar, çok bantlı görüntüleme indekslerinin doğrudan evrensel hastalık şiddeti eşikleri olarak kullanılabilmesi için tarla doğrulamalarına ve bitki, gelişme dönemi ve çevreye özgü ölçeklerin oluşturulmasına ihtiyaç bulunduğunu vurgulamıştır. Dolayısıyla bu çalışmada *U. maydis*'e karşı herhangi bir fungusit veya doğrudan mücadele uygulaması değerlendirilmemiş, temel olarak hastalığın erken ve hassas biçimde izlenmesine yönelik bir yöntem incelenmiştir (Radócz vd., 2023).

Fungal hastalıkların etkileri yalnızca yetiştiricilik döneminde değil, hasat sonrasında da önem taşımaktadır. Xue vd. (2025), tatlı mısır koçanlarını *F. graminearum* ve *F. verticillioides* ile yapay olarak inokule etmiş ve 25 °C'de depolama sırasında enfeksiyon gelişimini incelemiştir. *F. graminearum* ile inokule edilen koçanlarda görünür beyaz misel gelişimi 24 saat sonra, *F. verticillioides* uygulamasında ise 36 saat sonra belirginleşmiştir. Enfeksiyon ilerledikçe tane yüzeyinde fungal spor miktarı artmış ve tane rengi koyulaşmıştır. *F. verticillioides* enfeksiyonu ayrıca malondialdehit (MDA) miktarında anlamlı artış meydana getirerek tane dokularında oksidatif bozulmanın arttığını göstermiştir. Altmış saat sonunda çözünür şeker miktarı *F. graminearum* ve *F. verticillioides* gruplarında sırasıyla 28.81 ve 27.70 mg g⁻¹'e düşerken kontrol grubunda 31.16 mg g⁻¹ olarak belirlenmiş, enfekte grupların her ikisinde de son çözünür şeker değeri kontrolden %7.5 daha düşük bulunmuştur. Benzer biçimde çözünür protein içeriği de enfekte örneklerde kontrol grubuna göre yaklaşık %9.2–9.4 daha düşük elde edilmiştir (Xue vd., 2025).

Tatlı mısır zararlıları bakımından yapılan çalışmalar içerisinde doğrudan incelenen tür Asya mısır kurdu (*Ostrinia furnacalis*)'dur. Feng vd. (2023), özellikle koçan ve sap dokularında zarar oluşturabilen bu zararlıya karşı entomopatojen fungus *Beauveria bassiana* GZ01 suşunun granül ve sulu süspansiyon uygulamalarını yarı kurak koşulların oluşturulduğu sera denemelerinde değerlendirmiştir. Granül uygulamalarında *B. bassiana* yalnızca yaprak zararını değil, sap üzerindeki giriş deliği sayısını, galeri uzunluğunu ve canlı larva sayısını da azaltmıştır. Kontrol bitkilerinde yaprak zarar puanı 5.10, larva giriş deliği sayısı 4.65 ve galeri uzunluğu 10.70 cm iken; helezon döneminde granül uygulanan T1 grubunda bu değerler sırasıyla 1.72, 2.55 ve 5.17 cm olarak gerçekleşmiştir. Helezon ve koçan dönemlerinde uygulama yapılan T2 grubunda larva giriş deliği sayısı 2.15 ve galeri uzunluğu 5.91 cm olarak

belirlenmiştir. Granül uygulamalarında zararın özellikle koçan çevresindeki boğumlarda azalması dikkati çekmiştir (Feng vd., 2023).

B. bassiana'nın sulu süspansiyon halinde sulama sistemi üzerinden uygulanması da bazı zarar parametrelerinde azalma sağlamış, ancak granül uygulamaları daha tutarlı sonuçlar vermiştir. Feng vd. (2023), özellikle birden fazla *O. furnacalis* enfestasyonu söz konusu olduğunda sulu uygulamanın bütün sezon boyunca yeterli kontrol sağladığının kesin olarak gösterilemediğini belirtmiştir. Buna karşılık granül formdaki uygulamanın helezon döneminde tek başına veya helezon ile koçan dönemlerinde birlikte kullanılması yaprak zararı, larva giriş deliği sayısı ve galeri uzunluğunda belirgin azalma sağlamıştır. Bu nedenle çalışma, *B. bassiana*'nın tatlı mısırdaki *O. furnacalis* zararını azaltabilecek bir biyolojik mücadele aracı olduğunu göstermekle birlikte, uygulama şekli, tekrar sayısı ve ekonomik uygulanabilirliğin tarla koşullarında ayrıca değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Feng vd., 2023).

Sonuç olarak mevcut çalışmalar tatlı mısırdaki biyotik stres yönetiminin tek bir mücadele yöntemine dayandırılmaması gerektiğini göstermektedir. Örtü bitkileri ve canlı malçlar yabancı ot baskısını kimyasal herbisitlere benzer düzeyde azaltabilmekte, ancak ana ürünle su ve besin rekabetinin önlenmesi gerekmektedir. Mesotrione ve nicosulfuron çalışmalarında genotipler arasında çok belirgin fitotoksisite farklılıklarının bulunması, herbisit seçiminde çeşide özgü toleransın dikkate alınmasının önemini ortaya koymaktadır. *U. maydis* enfeksiyonunun çok bantlı görüntüleme ile izlenebilmesi hassas tarım uygulamaları açısından ümit verici görünürken, *Fusarium* enfeksiyonlarının hasat sonrasında şeker, protein, renk ve oksidatif kararlılığı hızla bozabildiği görülmektedir. Zararlı yönetiminde ise *B. bassiana*'nın *O. furnacalis* zararını azaltma potansiyeli, kimyasal mücadeleye alternatif veya tamamlayıcı biyolojik yöntemlerin geliştirilmesine olanak sağlayabilir. Bu nedenle tatlı mısırdaki yabancı ot, hastalık ve zararlı yönetimi; genotip, çevre, yetiştirme sistemi ve mücadele yönteminin birlikte değerlendirildiği entegre bir bitki koruma yaklaşımı çerçevesinde ele alınmalıdır (Yurchak vd., 2023; Feng vd., 2023; Radócz vd., 2023; Lv vd., 2024; Wang vd., 2024; Wang vd., 2025; Xue vd., 2025).

Abiyotik stresler ve tolerans mekanizmaları

Tatlı mısır yetiştiriciliğinde çevresel stresler, bitkinin çimlenme ve fide döneminden generatif gelişme ve verim oluşumuna kadar farklı büyüme evrelerini etkileyebilmektedir. Yapılan çalışmalarda doğrudan tatlı mısır

materyali kullanılarak tuzluluk, düşük sıcaklık, yüksek sıcaklık ve su noksanlığı stresleri araştırılmış, bu streslere verilen yanıtların büyüme, çimlenme, fotosentetik performans, mineral beslenme, ozmotik düzenleme ve antioksidan savunma sistemiyle ilişkili olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte stres toleransının genotipler arasında önemli ölçüde değişmesi, tatlı mısırdaki abiyotik stres yönetiminin yalnızca yetiştirme uygulamalarıyla değil, uygun genotiplerin seçimi ve stres toleransı ile ilişkili genetik özelliklerin belirlenmesiyle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir (Gou vd., 2023; Wu vd., 2024; Yang vd., 2024; Behboud vd., 2024; Zargar vd., 2025c).

Tatlı mısırın stres koşullarındaki başarısı değerlendirilirken tohumun başlangıç kalitesi ve genetik yapısı da dikkate alınmalıdır. Harakotr vd. (2022), doğrudan bir abiyotik stres uygulaması gerçekleştirmemekle birlikte, farklı resesif gen kombinasyonlarına sahip beş tatlı mısır genotipinde çimlenme ve fide gücünün genotipik arka plana önemli ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Araştırmada tekli, ikili ve üçlü resesif gen kombinasyonlarına sahip materyaller arasında çimlenme performansları farklılaşmış, üçlü ve bazı tekli resesif genotiplerde en uygun tohum hasat zamanı 38 gün, ikili resesif genotipte ise 42 gün sonra olarak belirlenmiştir. Ayrıca sinerjistik tatlı mısır hatlarında toplam nişasta miktarının tohum çimlenme oranının tahmin edilmesinde kullanılabileceği bildirilmiştir. Bu çalışma doğrudan stres toleransını ölçmemekle birlikte, düşük sıcaklık veya su noksanlığı gibi stres koşullarında gözlenen fide tepkilerinin yorumlanmasında başlangıçtaki tohum gücünün ve genotipik yapının göz ardı edilmemesi gerektiğine işaret etmektedir (Harakotr vd., 2022).

Tuzluluk stresi

Tuzluluk, bitkilerde ozmotik ve iyonik stresin birlikte ortaya çıkmasına neden olan önemli bir çevresel stres faktörüdür. Gou vd. (2023), iki yetiştirme döneminde elektriksel iletkenlik değerleri sırasıyla 7.11 ve 7.17 dS m⁻¹ olan tuzlu toprak koşullarında tatlı mısır yetiştirerek, 6 mM silisyum (Si) ve prolinin (Pro) tohuma ve/veya yaprağa uygulanmasının etkilerini incelemiştir. Araştırmada Si ve Pro uygulamalarının bitki gelişimi ve verimi artırmasının yanı sıra klorofil a ve b, karotenoid miktarı, net fotosentez hızı, stomatal iletkenlik, nispi su içeriği (RWC) ve membran zararlanma indeksini (MSI) artırdığı, çözünür şeker birikimi ile bitkinin mineral element dengesini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Özellikle tohum ve yaprak uygulamalarının birlikte yapılması, bu

uygulamaların tek başına kullanılmasına göre daha belirgin olumlu etkiler oluşturmuştur (Gou vd., 2023).

Tuzluluk koşullarında verim tepkisi uygulamalara bağlı olarak belirgin biçimde değişmiştir. Gou vd. (2023)'nin çalışmasında yalnızca su uygulanan kontrol grubunda tane verimi ana ürün ve ikinci ürün yetiştirme dönemlerinde sırasıyla 4008 ve 4042 kg ha⁻¹ olarak belirlenirken, Si'nin hem tohumu hem de yapraktan uygulandığı kombinasyonda bu değerler sırasıyla 6014 ve 6081 kg ha⁻¹'e ulaşmıştır. Aynı uygulamada bitki boyu, koçandaki tane sayısı, koçandaki sıra sayısı, biyolojik verim ve 1000 tane ağırlığı bakımından da en yüksek veya en yüksek değerlere yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte, bu bulguların elektriksel iletkenliği yaklaşık 7.1 dS m⁻¹ olan tuzlu koşullarda ve kullanılan genotipte elde edildiği dikkate alınmalıdır. Bu nedenle 6 mM Si veya Pro uygulaması, farklı tatlı mısır genotipleri ve yetiştirme koşulları için genel bir stres yönetimi dozu olarak değerlendirilmemelidir (Gou vd., 2023).

Tuz stresine toleransın önemli bir bileşeni iyon dengesinin ve hücrel oksidatif durumun korunmasıdır. Si ve Pro uygulamaları tatlı mısır yapraklarında N, P, K ve Ca miktarını ve K⁺/Na⁺ oranını artırırken Na⁺ birikimini azaltmıştır. Aynı zamanda RWC, MSI, serbest prolin ve çözünür şeker miktarları artmış, malondialdehit (MDA) ve elektrolit sızıntısı azalmıştır. Antioksidan sistem bakımından GR, SOD, APX, POD ve CAT enzimlerinin yanı sıra askorbat, glutatyon ve α -tokoferol miktarlarında artış, H₂O₂ ve süperoksit düzeylerinde ise azalma meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, araştırılan koşullarda Si ve Pro'nun tuzluluk toleransını yalnızca büyümeyi destekleyerek değil, iyon dengesini, ozmotik düzenlemeyi ve antioksidan savunmayı birlikte güçlendirerek geliştirdiğini göstermektedir (Gou vd., 2023).

Düşük sıcaklık stresi

Düşük sıcaklık özellikle tatlı mısırın çimlenme ve çıkış döneminde önemli bir stres kaynağıdır. Wu vd. (2024), farklı genetik kökenlerden 100 tatlı mısır kendilenmiş hattını 25 °C kontrol ve 10 °C düşük sıcaklık koşullarında değerlendirmiştir. Yirmi beş derecede genotiplerin ortalama çimlenme oranı yaklaşık %70 iken, 10 °C'de ortalama düşük sıcaklık çimlenme oranı %18 düzeyine gerilemiştir. Düşük sıcaklık koşullarında genotipler arasında son derece geniş bir varyasyon görülmüş, 19hi135 hattının çimlenme oranı %94.44'e ulaşırken 37 hat 21 günlük gözlem süresince hiç çimlenmemiştir. Ortalama çimlenme süresi de 25 °C'deki

6.18 günden düşük sıcaklık koşullarında önemli ölçüde artış göstermiştir. Bu sonuçlar düşük sıcaklık toleransının tatlı mısır genetik materyalinde son derece geniş bir genetik varyasyona sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Wu vd., 2024).

Düşük sıcaklık toleransındaki bu genotipik varyasyon moleküler düzeyde de incelenmiştir. Wu vd. (2024), 56K SNP çipi kullanılarak elde edilen verilerden kalite filtrelemesi sonrasında 35.430 SNP'yi GWAS analizine dahil etmiş ve düşük sıcaklıkta çimlenmeyle anlamlı ilişkili 16 SNP belirlemiştir. İlişkili SNP'lerin ± 50 kb çevresinde 46 gen tanımlanmış ve bunlardan altısı aday gen olarak seçilmiştir. Özellikle Zm11 β HSDL5 ve Zm2OGO genlerinin düşük sıcaklıkta çimlenmeyle ilişkisi gen ifadesi analizleriyle desteklenmiştir. Soğuğa duyarlı 20hi111 hattında Zm11 β HSDL5 ifade düzeyinin daha yüksek olması bu genin negatif düzenleyici; toleranslı 19hi135 hattında Zm2OGO ifade düzeyinin daha yüksek olması ise pozitif düzenleyici bir role sahip olabileceğini göstermiştir. Dolayısıyla düşük sıcaklık koşullarında yüksek çimlenme yalnızca agronomik bir özellik olmayıp, moleküler seleksiyonda kullanılabilecek genetik bileşenlere sahip karmaşık bir özellik olarak görülmektedir (Wu vd., 2024).

Yüksek sıcaklık stresi

Yüksek sıcaklık stresi, tatlı mısırdaki özellikle generatif gelişme döneminde önemli verim kayıplarına neden olabilmektedir. Yang vd. (2024), 376 tatlı mısır kendilenmiş hattını ilkbahar ve yaz yetiştirme dönemlerinde karşılaştırmıştır. İlkbaharda ortalama sıcaklık yaklaşık 24 °C iken, yaz döneminde 30 °C olarak gerçekleşmiş, çiçeklenme dönemindeki ortalama günlük en yüksek sıcaklık ilkbaharda 31.6 °C, yaz döneminde ise 35.84 °C olarak belirlenmiştir. Yaz döneminde sıcaklığın 40 °C'ye kadar yükselmesi, yüksek sıcaklık stresinin olduğu koşullar olarak değerlendirilmiştir. Bu koşullarda bitki boyu %24.0, koçan yüksekliği %36.3 ve tepe püskülündeki birinci dereceden yan dal sayısı %19.8 oranında azalırken, polen yayılımına kadar geçen süre ilkbahar dönemine göre ortalama %21.6 kısalmıştır. Yaz döneminde 376 hattın ortalama yaşama oranının %50'nin altında, ortalama tane bağlama oranının ise yalnızca %12.7 düzeyinde kalması, özellikle generatif gelişmenin yüksek sıcaklığa karşı oldukça duyarlı olduğunu göstermiştir (Yang vd., 2024).

Yüksek sıcaklığa tolerans bakımından hatlar arasında geniş varyasyon bulunması, genetik ıslah açısından önemli bir potansiyel oluşturmaktadır.

Yang vd. (2024), 36.331 yüksek kaliteli SNP ile gerçekleştirilen GWAS sonucunda 10 kromozom üzerinde 85 anlamlı SNP belirlemiştir. Bunlardan 21'i ilkbahar, 15'i yaz koşullarındaki fenotiplerle, 49'u ise iki çevre arasındaki sıcaklık kaynaklı fenotipik farklılıklarla ilişkilendirilmiştir. Tane bağlama oranına ilişkin en güçlü lokusların çevreler arasındaki farklar üzerinden belirlenmesi, bu özelliğin yüksek sıcaklıktan özellikle etkilendiğini desteklemiştir. GWAS bölgelerindeki genlerin işlevsel anotasyonu sonucunda sıcaklık şoku transkripsiyon faktörleri (Hsf's) veya sıcaklık şoku proteinleri (Hsps) ile ilişkili altı aday gen belirlenmiştir. Bu sonuçlar, sıcaklık toleransının yalnızca yetiştirme zamanı veya kültürel önlemlerle değil, toleranslı genotiplerin seçilmesine dayalı moleküler ıslah yoluyla da geliştirilebileceğini göstermektedir (Yang vd., 2024).

Kontrollü ve genetik çalışmalarla belirlenen yüksek sıcaklık duyarlılığı, ticari üretim alanlarından elde edilen uzun dönemli verilerle de desteklenmektedir. Dhaliwal ve Williams (2022), 27 yıllık dönemde 16.040 tatlı mısır tarlasını inceleyerek 30 °C'nin üzerindeki sıcaklıkların verimde doğrusal olmayan bir azalmaya yol açtığını göstermiştir. Çiçeklenme sırasında 30 °C üzerinde geçirilen 30 °C eşiğinin üzerindeki her ilave derece-günlük sıcaklık birikimi yağışa bağımlı üretimde yaklaşık %2, sulanan üretimde %0.5 verim kaybıyla ilişkili bulunmuştur. Bu geniş ölçekli sonuçlar, Yang vd. (2024) tarafından genotipler arasında gösterilen yüksek sıcaklık toleransı varyasyonunun tarımsal önemini desteklemekte ve özellikle üreme dönemindeki ısı toleransının gelecekteki adaptasyon ve ıslah çalışmalarında öncelikli bir hedef olması gerektiğini göstermektedir (Dhaliwal ve Williams, 2022).

Su noksanlığı ve kuraklık stresi

Su noksanlığı tatlı mısırın özellikle çimlenme, fide çıkışı ve erken gelişme dönemlerinde belirgin morfolojik ve fizyolojik değişikliklere neden olabilmektedir. Behboud vd. (2024), Challenger tatlı mısır hibritinde PEG kullanarak 0, -0,3, -0,6 ve -0,9 MPa düzeylerinde osmotik stres oluşturmuş ve kaplanmamış tohumlarla kitosan veya sodyum aljinat esaslı mineral kaplama uygulamalarını karşılaştırmıştır. Stres şiddeti arttıkça fide çıkış oranı ve çıkış hızı, toplam klorofil, çözünür protein, N ve P içeriği azalırken, prolin, çözünür şeker, K, MDA ve H₂O₂ miktarları artmıştır. Kaplanmamış tohumlarda -0,9 MPa düzeyinde fide çıkış oranı %41.15'e kadar düşmüş ve fide çıkış hızı 0.78 fide gün⁻¹ düzeyine gerilemiştir. Buna

karşılık kitosan içeren mineral kaplamalar bütün su stresi düzeylerinde çıkış ve fide gelişimini kaplanmamış tohumlara göre iyileştirmiştir (Behboud vd., 2024).

Kuraklık kaynaklı fizyolojik bozulmanın temel göstergelerinden birisi de hücresel oksidatif hasardır. Behboud vd. (2024)'nin çalışmasında stres şiddetinin artması MDA ve H_2O_2 birikimini artırmış, en yüksek H_2O_2 miktarı kaplanmamış tohumlardan gelişen ve $-0,9$ MPa stres uygulanan fidelerde 5.04 mM g^{-1} yaş ağırlık olarak belirlenmiştir. Buna karşılık kitosan + vermikülit + kaolin + perlit + Arap zıncı kaplaması fide gelişimini ve bazı fizyolojik özellikleri geliştirmiştir. Aynı uygulamada şiddetli osmotik stres altında prolin $4.22 \text{ } \mu\text{mol g}^{-1}$ yaş ağırlığa, çözünür şeker ise 34.31 mg g^{-1} yaş ağırlığa ulaşmıştır. Araştırmada fide çıkışı ile MDA ve H_2O_2 arasında negatif, N, P, çözünür protein ve toplam klorofil ile pozitif ilişkiler belirlenmiştir. Bu bulgular, su noksanlığında başarılı çıkışın yalnızca su durumuyla değil, membran bütünlüğü, mineral beslenme ve osmotik düzenleme mekanizmalarıyla da bağlantılı olduğunu göstermektedir (Behboud vd., 2024).

Tatlı mısırdaki su noksanlığına tepkinin genotipik yapıya bağlı olduğu Zargar vd. (2025c) tarafından da bildirilmiştir. Araştırmacılar Messenger, Dessert, Royalty ve Tyson genotiplerini kontrollü hidroponik koşullarda %8 ve %12 PEG ile oluşturulan iki su noksanlığı düzeyinde incelemiş ve bitkilere yapraktan $100 \text{ } \mu\text{M}$ melatonin uygulamıştır. Su noksanlığı kök ve sürgün gelişimini, yaprak alanını, fotosentetik pigmentleri, stomatal iletkenliği ve fotosistem II etkinliğini azaltırken MDA birikimini artırmıştır. Bununla birlikte stresin şiddeti ve melatonine verilen yanıt genotipler arasında farklı olmuştur. Örneğin Tyson'da kök hacmi %8 PEG koşulunda %70.1, %12 PEG koşulunda %88.7 azalırken, Dessert genotipinde şiddetli su noksanlığı altında melatonin uygulaması kök uzunluğunu %75.3 oranında artırmıştır (Zargar vd., 2025c).

Melatonin uygulamasının etkileri yalnızca morfolojik özelliklerle sınırlı kalmamıştır. Şiddetli su noksanlığında Dessert genotipinde melatonin peroksidaz aktivitesini %31 artırırken MDA miktarını %34 azaltmış, Tyson'da MDA düzeyindeki azalma %42 olmuştur. Royalty'de stomatal iletkenlik yaklaşık %68 artarken, klorofil-a miktarında belirgin bir iyileşme meydana gelmiştir. Fotosistem II'nin maksimum fotokimyasal etkinliği (F_v/F_m) bütün genotiplerde su noksanlığı altında düşmüş, melatonin uygulaması ise bu azalmayı büyük ölçüde geri çevirmiştir.

Örneğin Royalty'de %12 PEG koşulunda Fv/Fm 0.64 iken melatoninle birlikte 0.82'ye yükselmiştir. Araştırmanın çok değişkenli değerlendirmesi de genotiplerin stres toleransı ve melatonine yanıt bakımından birbirinden ayrıldığını göstermiştir. Dolayısıyla tatlı mısırdaki su noksanlığına karşı kullanılan dışsal düzenleyicilerin etkisinin genotipten bağımsız ve sabit olmadığı dikkate alınmalıdır (Zargar vd., 2025c).

Su noksanlığına karşı fizyolojik dayanıklılığın artırılmasında poliaminlerin kullanımı da araştırılmaktadır. Zargar vd. (2025b), Dessert, Messenger, Tyson ve Royalty tatlı mısır genotiplerini hidroponik koşullarda %8 ve %12 PEG-6000 ile oluşturulan ozmotik strese maruz bırakmış ve 0.2 mM spermine uygulamasının etkilerini incelemiştir. Şiddetli stres koşullarında spermine uygulaması yalnız PEG uygulamasına göre toplam biyokütleyi Dessert ve Tyson'da yaklaşık %145, Messenger'da %118 ve Royalty'de %110 artırmış, kök ve sürgün gelişimindeki kayıpları da farklı düzeylerde sınırlandırmıştır. Spermine bazı genotiplerde klorofil içeriği ve fotosistem II etkinliğini artırmış, oksidatif hasarın göstergesi olan MDA birikimini azaltmış ve peroksidaz aktivitesini değiştirerek antioksidan savunmayı etkilemiştir. Örneğin Tyson'da şiddetli stres altında MDA düzeyi spermine uygulamasıyla %48.7 azalmıştır. Bununla birlikte yanıtların genotipler arasında belirgin biçimde farklılaşması ve denemenin PEG kullanılan hidroponik koşullarda yürütülmesi, spermine uygulamasının tarla koşullarında doğrulanmadan genel bir kuraklık yönetimi önerisine dönüştürülmemesi gerektiğini göstermektedir (Zargar vd., 2025b).

Dışsal stres düzenleyicilerin etkisi uygulama dozu, genotip ve çevresel koşullara bağlı olarak olumlu veya olumsuz yönde değişebilmektedir. Zargar vd. (2025a), Messenger, Tyson ve GSS 8529 tatlı mısır genotiplerinde %5 PEG ile oluşturulan su noksanlığı altında 10 ve 20 mM yapraktan asetik asit uygulamasını değerlendirmiştir. PEG uygulaması kök ve sürgün gelişimini genel olarak sınırlandırırken, asetik asit bazı genotip ve konsantrasyonlarda bu kayıpları kısmen azaltmıştır. On mM asetik asit + PEG uygulaması, yalnız PEG'e göre MDA birikimini Messenger, Tyson ve GSS 8529'da sırasıyla yaklaşık %10.7, %32.4 ve %10.4 azaltmıştır. Buna karşılık asetik asidin stres bulunmayan koşullarda bazı genotiplerde toplam biyokütleyi azaltması ve MDA birikimini artırması, uygulamanın etkisinin genotip ve koşula güçlü biçimde bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle asetik asidin tatlı mısırdaki genel bir kuraklık stresi giderici olarak değil, uygun doz ve genotipin belirlenmesi ile tarla koşullarında

doğrulanması gereken deneysel bir stres düzenleyici uygulama olarak değerlendirilmesi daha uygundur (Zargar vd., 2025a).

Yürütülen çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, tatlı mısırın abiyotik streslere verdiği yanıtların farklı streslerde ortak bazı fizyolojik bileşenlere dayandığı görülmektedir. Tuzluluk ve su noksanlığında su ilişkilerinin ve hücresel iyon dengesinin bozulması, MDA, H₂O₂ ve diğer reaktif oksijen türlerinin artması, fotosentetik pigmentler ve fotosistem etkinliğinde gerileme ile sonuçlanırken, toleransın artırılmasında ozmotik düzenleyiciler, antioksidan savunma sistemi ve membran kararlılığının önemli olduğu görülmektedir. Düşük ve yüksek sıcaklık çalışmalarında ise geniş genotipik varyasyonların ve belirli genom bölgelerinin saptanmış olması, abiyotik stres toleransının önemli bir genetik bileşene sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle tatlı mısırdaki abiyotik stres yönetimi; uygun ekim ve yetiştirme koşullarının sağlanmasının yanında toleranslı genotiplerin seçilmesi, fide gücünün korunması ve stres koşullarında fotosentetik ve antioksidan sistemlerin sürekliliğinin desteklenmesi temelinde ele alınmalıdır. Bununla birlikte, Si, prolin, kitosan esaslı tohum kaplama ve melatonin gibi uygulamalardan elde edilen olumlu sonuçlar belirli deneme koşullarına özgüdür. Bu nedenle söz konusu uygulamalar, farklı genotip, toprak ve çevre koşullarında doğrulanmadan genel yetiştiricilik önerileri olarak değerlendirilmemelidir (Harakotr vd., 2022; Gou vd., 2023; Wu vd., 2024; Yang vd., 2024; Behboud vd., 2024; Zargar vd., 2025c).

Hasat olgunluğu ve hasat zamanının belirlenmesi

Tatlı mısırdaki hasat zamanı, ürünün pazarlanabilir verimini ve tüketim kalitesini birlikte belirleyen en önemli yetiştiricilik unsurlarından biridir. Diğer mısır tiplerinden farklı olarak tatlı mısırın taze tüketim amacıyla hasadı, tanenin fizyolojik olgunluğa ulaşmasından önce, endospermin yüksek su ve şeker içeriğine sahip olduğu süt olum döneminde gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle tatlı mısırdaki “hasat olgunluğu” ile “fizyolojik olgunluk” aynı kavramı ifade etmemektedir. Taze tüketim amacıyla en uygun dönem, tanenin yumuşak ve sulu yapısını koruduğu, şeker miktarının yüksek ve nişasta birikiminin henüz tüketim kalitesini olumsuz etkileyecek düzeye ulaşmadığı dönemdir. Buna karşılık tohumluk üretiminde hasat, daha ileri gelişme döneminde, en yüksek kuru madde birikimi ve yüksek çimlenme ve tohum gücü özelliklerinin sağlandığı fizyolojik olgunluk esas alınarak yapılmaktadır. Taze ürün hasadının yaklaşık 20–25 gün döllenme veya tepe/koçan püskülü çıkışından sonraki

süt olum döneminde yoğunlaştığını, ancak kesin hasat zamanının genotip, çevre ve üretim amacına göre değişebildiğini göstermektedir (Ye vd., 2023; Zhai vd., 2024; Mousavi vd., 2025; Tupajić vd., 2026).

Taze tatlı mısırdaki hasat olgunluğunun belirlenmesinde, tanenin gelişme dönemi temel ölçütlerden biridir. Ye vd. (2023), tatlı mısırın taze tüketim dönemini mısırın R3, yani süt olum dönemiyle eşleştirmiş ve taze koçanları püskül çıkışından yaklaşık 22 gün sonra hasat etmiştir. Aynı çalışmada dört tatlı mısır çeşidinde 22. gündeki ortalama tane nem miktarları çeşide bağlı olarak %75.5–80.1 arasında değişim göstermiştir. Benzer şekilde Zhai vd. (2024), altı ticari *sh2* çeşidini döllenmeden 22 gün sonra hasat etmiş, Yang vd. (2021) ise üç farklı tatlı mısır çeşidinin taze tanelerini aynı dönemde şeker içeriği ve tane kabuğu özellikleri bakımından değerlendirmiştir. Farklı çalışmalarda benzer gelişme dönemlerinin esas alınması, döllenmeden yaklaşık 20–22 gün sonraya karşılık gelen süt olum döneminin taze tatlı mısırdaki yaygın olarak hasat olgunluğu dönemi olarak değerlendirildiğini göstermektedir. Bununla birlikte bu süre sabit bir ölçüt değildir; genotip ve yetiştirme koşulları tane gelişme hızını etkileyebildiğinden, hasat zamanının yalnızca döllenmeden sonra geçen gün sayısına göre değil, tanenin gelişme özellikleri de dikkate alınarak belirlenmelidir (Yang vd., 2021; Ye vd., 2023; Zhai vd., 2024).

Bu durum Tupajić vd. (2026) tarafından iki ekim zamanı, üç hibrit ve farklı sulama düzeylerinde yürütülen araştırmada daha açık biçimde ortaya konmuştur. Çalışmada koçanlar döllenmeden 22-25 gün sonra, tanelerin süt olum dönemine ulaştığı ve tane neminin yaklaşık %70-75 olduğu aşamada hasat edilmiştir. Ancak hasat kararında yalnızca gün sayısı kullanılmamış, bitkilerin %50–70'inin süt olum dönemine ulaşması görsel olarak değerlendirilmiş ve tane kuru maddesi de izlenmiştir. Aynı denemede Enterprise, Union ve Sweet Nugget hibritlerinin vejetasyon süreleri sırasıyla yaklaşık 85, 90 ve 65-68 gün olarak bildirilmiş, ayrıca hasat tarihleri ekim zamanı, yıl, hibrit ve sulama uygulamasına bağlı olarak değişmiştir. Ana ürün ekimlerinde hasat temmuz sonlarında, ikinci ürün ekimlerinde ise eylül ayında gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar hasat olgunluğunun takvim tarihine bağlanamayacağını ve özellikle farklı erkencilik sınıflarına sahip hibritlerde aynı ekim tarihinin farklı hasat zamanları oluşturabileceğini göstermektedir (Tupajić vd., 2026).

Tane nemi, hasat zamanının belirlenmesinde önemli ölçütlerden biridir; ancak uygun nem düzeyi genotipe ve yetiştirme koşullarına bağlı olarak

değişebilmektedir. Ye vd. (2023)'nin taze tüketim döneminde dört çeşitte belirlediği %75.5–80.1'lik tane nemi aralığı ile Tupajić vd. (2026)'nin süt olum hasadı için kullandığı yaklaşık %70-75'lik nem düzeyi arasında farklılık bulunmaktadır. Bu farklılık, çeşitlerin genetik yapısı, çevre koşulları, hasat tanımı ve kullanılan ölçüm yöntemlerinin hasat dönemindeki tane nemini etkileyebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla tatlı mısırdaki tek bir tane nemi değeri esas alınmamalı, süt olum dönemi, tane nemi, kuru madde birikimi ve döllemeden sonra geçen süre birlikte değerlendirilmelidir (Ye vd., 2023; Tupajić vd., 2026). Hasat zamanının doğru belirlenmesinin temel nedeni, tane gelişimi boyunca karbonhidrat bileşiminin sürekli değişmesidir. Tatlı mısır taneleri olgunlaşma ilerledikçe kuru madde biriktirmekte ve şeker-nişasta dengesi değişmektedir. Ye vd. (2023), püskül oluşumundan sonraki 7, 12, 17 ve 22. günlerde tane gelişimini izlemiş ve dört çeşidin tamamında 1000 tane yaş ve kuru ağırlığının gelişme süresince arttığını, incelenen dönem içerisinde en yüksek değerlere 22. günde ulaşıldığını belirlemiştir. Bitki sıklığı tane dolum hızını ve tane ağırlığını etkilerken, çözünür şeker, sakkaroz, fruktoz ve nişasta düzeyleri tane gelişimi boyunca çeşide bağlı olarak değişmiştir. Bulgular, hasat olgunluğunun yalnızca koçan büyüklüğüne göre değil, tane dolumu ile karbonhidrat birikiminin birlikte değerlendirilmi gerektiğini göstermektedir (Ye vd., 2023).

Hasat zamanının kimyasal bileşim üzerindeki etkisi Mousavi vd. (2025) tarafından, beş süper tatlı hibritte süt olum, erken hamur olum, tam hamur olum ve dişlenme başlangıcı olmak üzere dört gelişme döneminin karşılaştırıldığı iki yıllık bir araştırmada ortaya konmuştur. Araştırmada kuru madde, fruktoz, glikoz, sakkaroz, mineral elementler ve karotenoidlerin tamamına yakını hem hibrit çeşitten hem de hasat zamanından önemli ölçüde etkilenmiştir. Süt olum dönemindeki ilk hasatta β -karoten, 9Z- β -karoten, α -karoten, fosfor, çinko, magnezyum, potasyum, kalsiyum, glikoz ve fruktozun en yüksek düzeyleri belirlenirken, ilerleyen olgunluk dönemlerinde farklı bileşenler farklı birikim örüntüleri göstermiştir. Tam hamur olum döneminde lutein, erken diş olum döneminde ise zeaksantin, β -kriptoksantin, sakkaroz ve kuru madde daha yüksek düzeylere ulaşmıştır. Bu sonuçlar hasadın geciktirilmesiyle bütün kalite bileşenlerinin aynı yönde değişmediğini, dolayısıyla “daha erken” veya “daha geç” hasadın bütün kalite ölçütleri bakımından mutlak olarak üstün kabul edilemeyeceğini göstermektedir (Mousavi vd., 2025).

Mousavi vd. (2025)'nin sonuçları hasat olgunluğunun ürünün kullanım amacıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini de göstermektedir. İlk hasat tarihinde β -karoten $5.89 \mu\text{g g}^{-1}$, potasyum 4.17 mg g^{-1} ve glikoz 84.2 mg g^{-1} ile en yüksek düzeylere ulaşmış, buna karşılık hibrit çeşitlere ait maksimum sakkaroz, karotenoid ve kuru madde değerleri farklı gelişme dönemlerinde ortaya çıkmıştır. Ayrıca hibrit çeşitler arasında önemli farklılıklar bulunmuş, D hibriti sakkaroz, N hibriti kuru madde ve fruktoz, M hibriti β -karoten, S hibriti ise lutein, zeaksantin ve β -kriptoksantin bakımından öne çıkmıştır. Bir başka ifadeyle aynı hasat zamanı bütün hibritlerde aynı biyokimyasal kalite profilini oluşturmamaktadır. Bu durum, hasat zamanının çeşit seçimiyle birlikte planlanması gerektiğini ve en uygun hasat döneminin yalnızca tatlılığı değil, hedeflenen besin değeri ve işlevsel özellikleri de dikkate alabileceğini göstermektedir (Mousavi vd., 2025).

Bununla birlikte tatlı mısırın temel taze tüketim özelliği dikkate alındığında süt olum dönemi, yüksek şeker içeriği ile yumuşak tane yapısının birlikte bulunduğu temel hasat dönemidir. Yang vd. (2021), 22 gün döllenme sonrası hasat edilen CPL, JBT ve JZY çeşitlerinde sakkaroz, glikoz ve fruktoz ile perikarp kalınlığında belirgin genotipik farklılıklar belirlemiştir. CPL çeşidinin suda çözünür şeker miktarı diğer çeşitlerden yüksek, tane kabuğu ise yalnızca $32.13 \mu\text{m}$ ile en ince bulunmuş, JBT'de perikarp kalınlığı $83.74 \mu\text{m}$ 'ye ulaşmıştır. Bu bulgular aynı kronolojik gelişme döneminde hasat edilen çeşitlerin dahi tatlılık ve tane yapısı bakımından önemli ölçüde farklı olabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla hasat zamanının standartlaştırılması kalite farklılıklarını tamamen ortadan kaldırmamakta, en uygun hasat olgunluğu aynı zamanda çeşidin genetik kalite potansiyelinin tüketiciye en uygun biçimde yansıdığı dönem olarak değerlendirilmelidir (Yang vd., 2021).

Tatlı mısırdaki taze tüketim amacıyla yapılan hasat ile tohumluk üretimindeki hasat olgunluğunun birbirinden ayrılması önem taşımaktadır. Haraoktr vd. (2022), farklı şeker metabolizması gen kombinasyonlarına sahip beş tatlı mısır genotipinde tohum gelişimini döllenmeden sonraki 18–46 gün arasında incelemiştir. Tohum nemi gelişme ilerledikçe azalırken 1000 tane kuru ağırlığı artmış ve dört kendilenmiş hatta en yüksek kuru ağırlık 34 gün, Dr. Pek's 1351 hibritinde ise 30 gün döllenmeden sonra belirlenmiştir. Araştırmada bu dönem fizyolojik olgunlukla ilişkilendirilmiş olmasına rağmen tohum neminin hâlâ %28.67–64.84 arasında olduğu ve mekanik işlemler açısından yüksek kalabildiği

belirtmiştir. Bu nedenle maksimum kuru madde birikiminin gerçekleştiği dönem ile tohumluk hasadı için en uygun zaman her zaman aynı olmayabilmektedir (Harakotr vd., 2022).

Tohumluk üretiminde en uygun hasat zamanının belirlenmesinde çimlenme ve tohum gücü özellikleri de kritik öneme sahiptir. Harakotr vd. (2022), çimlenme yüzdesi ve çimlenme indeksinin gelişme ilerledikçe yükseldiğini, ortalama çimlenme süresi ile elektriksel iletkenliğin ise yaklaşık 38. güne kadar azalma eğilimi gösterdiğini bildirmiştir. Üçlü resesif 101LTSC-10 ile tekli resesif TSC/H3-7 ve P4546/Delec-1 genotipleri için 38 gün dölleme sonrası, C4 ve Dr. Pek's 1351 için ise 42 gün uygun tohum hasat dönemi olarak değerlendirilmiştir. Bu bulgular, taze tüketim için yaklaşık 20–25 günlük süt olum hasadı ile tohumluk üretim için yaklaşık 38–42 günlük olgunluk dönemlerinin birbirine karıştırılmaması gerektiğini açıkça göstermektedir (Harakotr vd., 2022).

Taze tüketim amacıyla hasadın gecikmesi yalnızca şeker-nişasta dengesini değil, ürünün hasat sonrasında korunabilecek kalite potansiyelini de etkilemektedir. Zhai vd. (2024), üç ılıman ve üç tropikal sh2 çeşidinin tümünü 22 gün dölleme sonrası hasat etmiş ve hasat edilen koçanları farklı sıcaklıklarda depolamıştır. Çeşitler aynı sh2 genini taşımalarına rağmen başlangıçtaki toplam çözünür şeker, indirgen şeker ve nem miktarlarında önemli farklılıklar göstermiştir. Bu durum hasat olgunluğunun aynı döneme göre belirlenmesinin yanında genetik yapının da ürünün hasat anındaki kalite düzeyini belirlediğini göstermektedir. Aynı araştırmada depolama süresince şeker ve nem miktarlarının azaldığı belirlenmiş; bu bulgu, hasat anında yüksek başlangıç kalitesinin sağlanmasının ürünün hasat sonrası kalite özelliklerinin korunması açısından önem taşıdığını göstermiştir (Zhai vd., 2024).

Hasat zamanı, çevre koşulları ve uygulanan yetiştirme tekniklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Tupajić vd. (2026)'nin farklı ekim zamanı, sulama ve hibrit kombinasyonlarında hasat tarihlerini ayrı ayrı belirlemesi, Ye vd. (2023)'nin ise aynı taze tüketim aşamasında bitki sıklığının tane ağırlığı ve tane dolum hızını değiştirdiğini göstermesi, tarla koşullarının tane gelişim hızına ve olgunluk özelliklerine müdahale edebileceğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle yetiştirme döneminin başında yalnızca çeşidin katalogta belirtilen vejetasyon süresine dayanarak sabit bir hasat tarihi belirlenmesi yeterli değildir. Hasat dönemi yaklaşırken döllemeden veya koçan püskülü çıkışından sonra geçen süre, süt olum dönemi, tane

nemi, kuru madde birikimi ve hibritin gelişme özellikleri birlikte değerlendirilmelidir (Ye vd., 2023; Tupajić vd., 2026).

Sonuç olarak tatlı mısırdaki hasat olgunluğu, ürünün kullanım amacına göre değişen dinamik bir özelliktir. Taze tüketim ve işleme amacıyla üretimde hasat genellikle fizyolojik olgunluktan önce, süt olum döneminde gerçekleştirilmekte ve bu dönem çoğunlukla döllemeden veya koçan püskülü çıkışından yaklaşık 20–25 gün sonraya karşılık gelmektedir. Bu dönemde tane nemi yüksek, tane yapısı yumuşak ve karbonhidrat bileşimi taze tüketim için uygundur. Bununla birlikte tane nemi, şekerler, karotenoidler, kuru madde ve yapısal özellikler tane gelişimi süresince farklı hızlarda değişmekte ve bu değişim hibritlere göre farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle en uygun hasat zamanının tek bir gün veya tek bir tane nemi değeriyle tanımlanması uygun değildir. Hasat kararı; gelişme dönemi, döllemeden sonra geçen süre, tane nemi, kuru madde birikimi ve genotipin kalite özellikleri birlikte değerlendirilerek verilmelidir. Tohumluk üretiminde ise fizyolojik olgunluğa ulaşılması ve yüksek tohum gücünün oluşması esas alınmalı; taze tüketim amacıyla kullanılan 20–25 günlük süt olum dönemi tohumluk hasadı için ölçüt olarak değerlendirilmemelidir (Harakotr vd., 2022; Yang vd., 2021; Ye vd., 2023; Zhai vd., 2024; Mousavi vd., 2025; Tupajić vd., 2026).

Fiziksel, kimyasal ve duyuşsal kalite özellikleri

Tatlı mısırdaki kalite, tek bir özelliğe indirgenemeyen ve fiziksel, kimyasal, yapısal ve duyuşsal bileşenlerin birlikte oluşturduğu çok boyutlu bir kavramdır. Taze tüketimde tüketici kabulünü belirleyen başlıca özellikler arasında tatlılık, tane yumuşaklığı ve gevrekliği, perikarp kalınlığı, tane su içeriği, koçan ve tane görünümü, renk ve aroma yer alırken, işleme sanayisi açısından bunlara koçan dolgunluğu, tane bütünlüğü ve işleme sırasında yapısal dayanıklılık gibi özellikler de eklenmektedir. Güncel çalışmalar özellikle çözünür şeker bileşimi ile perikarp kalınlığının tatlı mısır tane kalitesinin temel bileşenleri olduğunu, ancak bu özelliklerin genotip, tane gelişme dönemi, yetiştirme koşulları ve hasat sonrası süreçlerden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Dolayısıyla kaliteli tatlı mısır yalnızca “yüksek şekerli” ürün olarak değil; yeterli tatlılık ile uygun yapı, aroma, renk ve pazarlanabilir fiziksel özelliklerin dengeli biçimde bir araya geldiği ürün olarak değerlendirilmelidir (Yang vd., 2021; Ye vd., 2023; Li vd., 2024; Zhai vd., 2024; Ashraf vd., 2026; Feng vd., 2026).

Tatlılık, tatlı mısırın tüketim kalitesini tanımlayan en karakteristik özelliktir ve tane içerisindeki çözünür şekerlerin miktarı ve bileşimine bağlıdır. Feng vd. (2026), döllemeden sonraki 14, 21 ve 28. günlerde 27 farklı şeker metabolitini belirlemiştir. Çözünür şekerler içerisinde sakkarozun yaklaşık 260 mg g⁻¹ ortalama konsantrasyonla baskın bileşen olduğu ve süt olum döneminde en yüksek düzeye ulaştığı saptanmıştır. Buna karşılık glikoz ve fruktoz erken gelişme döneminde daha yüksek düzeylerde bulunmuş, glikoz 14. günde 119.088 mg g⁻¹ iken süt olum döneminde 41.968 mg g⁻¹'e, fruktoz ise 65.497 mg g⁻¹'den 19.354 mg g⁻¹'e düşmüştür. Maltoz miktarı oldukça düşük kalırken D-sorbitol süt olum döneminde en yüksek birikimine ulaşmıştır. Araştırmacılar D-sorbitolün yumuşaklık ve gevreklik gibi yapısal özelliklerle de ilişkili olabileceğini belirtmiş ve süt olum dönemini tatlı mısırın tüketim kalitesi bakımından kritik aşama olarak değerlendirmiştir (Feng vd., 2026).

Şeker bileşimi, tatlı mısırın genetik tipine bağlı olarak önemli ölçüde farklılaşmaktadır. Li vd. (2024), sekiz su1, sekiz su1-sel ve sekiz sh2 olmak üzere 24 tatlı mısır materyalini karşılaştırmış ve süper tatlı sh2 tiplerinin toplam çözünür şeker bakımından normal tatlı su1 ve şeker içeriği artırılmış tatlı su1-sel tiplerinden sırasıyla 1.29 ve 1.20 kat daha yüksek olduğunu belirlemiştir. Sakkaroz bakımından da sh2 taneleri su1 ve su1-sel tiplerinin sırasıyla 1.54 ve 1.33 katı düzeyinde değer göstermiştir. Buna karşılık su1-sel grubunda maltöz miktarı sh2 grubunun 7.89 katı ve su1 grubunun 1.60 katı olmuş, su1 tipleri ise en yüksek nişasta miktarına sahip bulunmuştur. Böylece farklı tatlı mısır genetik gruplarının yalnızca toplam tatlılık düzeyi açısından değil, sakkaroz–maltoz–nişasta dengesi bakımından da farklı kalite profilleri oluşturduğu ortaya konulmuştur (Li vd., 2024).

Tatlılığın yalnızca endosperm mutasyonu ile açıklanamayacağı, geniş genetik varyasyon ve çevre etkilerinin de önemli olduğu Ashraf vd. (2026) tarafından 240 tatlı mısır kendilenmiş hattında yapılan iki yıllık çalışma ile ortaya konulmuştur. Araştırmada glikoz, fruktoz, sakkaroz ve toplam çözünür şeker bakımından geniş ve sürekli bir fenotipik varyasyon belirlenmiştir. Sakkaroz ile toplam şeker arasındaki korelasyon 0.90'ın üzerinde gerçekleşirken, glikoz ile sakkaroz arasında yaklaşık -0.60 düzeyinde negatif ilişki saptanmıştır. Bunun yanında yıllar arasında sakkaroz ortalaması 25.6'dan 16.6'ya, toplam şeker ise 28.1'den 19.5'e gerilemiş, buna karşılık glikoz 0.83'ten 1.23'e yükselmiş ve fruktoz yaklaşık 1.64–1.65 düzeyinde değişmeden kalmıştır. Yetiştirme dönemi ve

genotip $\times$ yetiştirme dönemi interaksyonlarının tüm şeker özellikleri bakımından önemli bulunması, genotiplerin tatlılık düzeyinin çevre koşullarına bağlı olarak değişebildiğini göstermektedir (Ashraf vd., 2026).

Tatlılık kadar önemli olan bir diğer temel tüketim kalite özelliği ise tane yapısıdır. Tane yapısının belirlenmesinde perikarp kalınlığı özel bir önem taşımaktadır. Yang vd. (2021), aynı gelişme döneminde, 22 gün dölleme sonrası hasat edilen CPL, JZY ve JBT çeşitlerini karşılaştırmış ve hem çözünür şeker miktarında hem de perikarp kalınlığında önemli farklılıklar belirlemiştir. En yüksek suda çözünür şeker miktarı CPL çeşidinde belirlenirken ortalama perikarp kalınlığı CPL'de yalnızca 32.13 μm , JZY'de 56.74 μm ve JBT'de 83.74 μm olarak ölçülmüştür. Araştırmacılar yüksek şeker ve ince perikarp özelliklerini birlikte taşıyan CPL'yi yüksek tüketim kalitesine sahip genotip olarak değerlendirmiştir. JZY ve JBT'nin suda çözünebilir şeker içerikleri birbirine yakın olmasına rağmen JZY'nin daha ince tane kabuğuna sahip olması, benzer tatlılık düzeyindeki materyallerin çiğneme özelliği ve tane yapısı bakımından farklılık gösterebileceğini ortaya koymaktadır (Yang vd., 2021).

Bununla birlikte ince perikarp kavramı “perikarp ne kadar ince ise kalite o kadar yüksektir” biçiminde mutlak olarak yorumlanmamalıdır. Perikarp aynı zamanda tanenin mekanik bütünlüğünü sağlayan koruyucu doku olup aşırı incilmesi işleme ve taşıma sırasında tane bütünlüğü bakımından dezavantaj oluşturabilir. Ashraf vd. (2026), 240 kendilenmiş hatta perikarp kalınlığının çevreler arasında geniş bir varyasyon gösterdiğini, 2023 yılında yaklaşık 45–178 μm , 2024 yılında 46–149 μm arasında değiştiğini ve BLUP değerlerinin yaklaşık 52–157 μm aralığında bulunduğunu bildirmiştir. Embriyo tarafındaki ve tanenin sırt yüzeyindeki tane kabuğu kalınlıkları arasında güçlü pozitif ilişki belirlenirken ($r>0.85$), genotip, yetiştirme dönemi ve genotip $\times$ yetiştirme dönemi interaksyonunun etkileri de önemli bulunmuştur. Bu sonuçlar, tane kabuğu kalınlığının genotip ve çevre koşullarına bağlı olarak değişen karmaşık bir kalite özelliği olduğunu ve tüketici tarafından tercih edilen yumuşaklık ile işleme sırasında gerekli tane bütünlüğü arasında uygun bir dengenin sağlanması gerektiğini göstermektedir (Ashraf vd., 2026).

Perikarp kalınlığındaki farklılıkların anatomik temeli de genotipler arasında değişmektedir. X. Wu vd. (2025), ince perikarplı M03 ve kalın perikarplı M08 kendilenmiş hatlarını karşılaştırmış ve elektron mikroskobu görüntülerinde perikarp kalınlığı farkının büyük ölçüde hücre

tabakası sayısından kaynaklandığını göstermiştir. Döllenen 19 gün sonra M03'te ortalama 10.6, M08'de ise 18.2 perikarp hücre tabakası belirlenmiştir. İki hat arasında 6.054 farklı ifade edilen gen, 73 farklı ifade edilen miRNA ve 113 farklı birikim gösteren metabolit saptanmıştır. Özellikle bitki hormon sinyal iletimi ve fenilpropanoid biyosenteziyle ilişkili gen ve metabolitlerin perikarp gelişiminde rol oynadığı, kalın perikarplı M08'de çeşitli fenilpropanoid bileşiklerinin daha fazla biriktiği belirlenmiştir. Böylece tane yapısının yalnızca fiziksel bir sonuç olmadığı, hücre tabakalarının oluşumu, hücre duvarı metabolizması ve hormon düzenlemesinin birlikte şekillendirdiği karmaşık bir özellik olduğu anlaşılmaktadır (X. Wu vd., 2025).

Şeker içeriği ile perikarp kalınlığının genetik kontrolünün çok genli olması kalite ıslahı açısından ayrıca önem taşımaktadır. Ashraf vd. (2026), iki çevrede yürüttükleri GWAS analizinde perikarp ve çözünür şeker özellikleriyle ilişkili toplam 174 anlamlı lokus belirlemiş ve bunların 84'ünü iki sezonda da saptamıştır. Bunlardan 26'sı embriyo yüzeyindeki, 27'si dorsal yüzeydeki perikarp kalınlığıyla ve 121'i glikoz, fruktoz, sakkaroz veya toplam şeker özellikleriyle ilişkili bulunmuştur. Hücre duvarı oluşumunda görev yapan selüloz sentaz, pektin metilesteraz ve peroksidazların yanı sıra sakkaroz sentaz, sakkaroz fosfat sentaz ve SWEET taşıyıcılarını kodlayan genler önemli adaylar arasında yer almıştır. Bulgular, tatlılık ile tane yapısının birkaç büyük genin basit etkisinden ziyade yapısal, metabolik ve taşıma süreçlerini kapsayan çok sayıda genetik bileşenin ortak kontrolü altında olduğunu göstermektedir (Ashraf vd., 2026).

Tatlı mısırdaki pazarlanabilir kalite, koçan ve tane özelliklerini de kapsamaktadır. Ye vd. (2023), dört tatlı mısır çeşidinde 4.5, 6.0 ve 7.5 bitki m⁻² sıklıklarını karşılaştırmış ve bitki sıklığındaki artışın bütün çeşitlerde dolu koçan uzunluğunu azalttığını belirlemiştir. Buna karşılık tane tanelerde çözünür kuru madde miktarı ile tane kalıntı oranı bitki sıklığından önemli ölçüde etkilenmemiştir. Benzer şekilde, tane dolumu süresince çözünür şeker, sakkaroz, fruktoz ve nişasta düzeyleri çoğu örnekleme zamanında bitki sıklığına bağlı olarak önemli bir değişim göstermemiştir. Bu bulgular, bitki sıklığının kalite özelliklerinin tamamını aynı yönde etkilemediğini, koçanın fiziksel özellikleri ve tane ağırlığında değişiklik oluştururken, tanenin şeker ve nişasta bileşiminin büyük ölçüde korunabildiğini göstermektedir (Ye vd., 2023).

Bitki besleme koşulları, tatlı mısır tanelerinin şeker bileşimini de etkileyebilmektedir. Ye vd. (2025), Mg bakımından yetersiz asit reaksiyonlu bir toprakta yapraktan %4 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ uygulamasının, koçan püskülü çıkışından 27 gün sonra tane sakkaroz, fruktoz ve glukoz düzeylerini kontrole göre sırasıyla ortalama %14.4, %2.7 ve %9.3 artırdığını belirlemiştir. Aynı çalışmada taze koçan verimi ile tane kuru ağırlığı, tane dolum hızı, SPAD değeri, Mg birikimi ve sakkaroz düzeyi arasında pozitif ilişkiler belirlenmesi, tane kalitesinin genetik yapının yanı sıra bitki besleme koşullarından da etkilenebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu sonuçlar Mg bakımından yetersiz bir toprakta, belirli bir genotip ve yüksek bitki sıklığı koşullarında elde edildiğinden, yapraktan Mg uygulamasının bütün tatlı mısır çeşitleri ve yetiştirme koşulları için genel bir kalite artırma uygulaması olarak değerlendirilmesi uygun değildir (Ye vd., 2025).

Tatlı mısır kalitesinin yalnızca birkaç temel şeker ve fiziksel özellik üzerinden değerlendirilmesi ürünler arasındaki duyuşal farklılıkların açıklanmasında yetersiz kalabilmektedir. Yang vd. (2021), CPL, JBT ve JZY çeşitlerinin HPLC-MS/MS analizinde toplam 568 metabolit belirlemiş ve bunların 262'sinin çeşitler arasında farklı birikim gösterdiğini saptamıştır. Karbonhidratlar, organik asitler ve amino asitler başlıca primer metabolit gruplarını oluştururken fenilpropanoidler ve alkaloidler sekonder metabolitler içerisinde öne çıkmıştır. Çeşitlerin metabolom profilleri PCA ve HCA analizlerinde birbirinden açık biçimde ayrılmıştır. Özellikle skimmin, N',N''-diferuloylspermidine ve 3-hydroxyanthranilic acid yüksek kalite olarak sınıflandırılan CPL'de yüksek, düşük kalite olarak değerlendirilen JBT'de düşük birikim göstermiş ve kaliteyle ilişkili aday metabolitler olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla tatlı mısırdaki tüketim kalitesinin yalnızca toplam şeker değerine değil, çok sayıda primer ve sekonder metabolitin birlikte oluşturduğu metabolik profile bağlı olduğu anlaşılmaktadır (Yang vd., 2021).

Aroma ve lezzet profili de tatlı mısırın tüketici tarafından algılanan kalitesinin önemli bir bileşenidir. Zhai vd. (2024), üç ılıman ve üç tropikal ticari sh2 tatlı mısır çeşidinde hem şeker ve nem özelliklerini hem de uçucu bileşiklerini incelemiştir. Aynı süper tatlı genini taşımalarına rağmen tropikal çeşitlerin toplam çözünür şeker, indirgen şeker ve nem miktarları genel olarak daha yüksek bulunmuş, ılıman ve tropikal materyaller ise uçucu bileşik profillerine göre birbirlerinden açık biçimde ayrılmıştır. GC-MS ile 119, GC-IMS ile 50 olmak üzere toplam 169 uçucu bileşik

tanımlanmış; alkanların aroma profilinin önemli bileşenlerinden olduğu gösterilmiştir. Her iki analitik yöntemle bütün örneklerde ortak olarak saptanan nonanal, decanal ve 2-heptanone ise tatlı mısır aroma profili bakımından dikkat çeken kararlı uçucu bileşikler olmuştur. Bu sonuçlar, aynı şeker genotipine sahip tatlı mısırların dahi aroma bakımından önemli farklılıklar taşıyabileceğini ortaya koymaktadır (Zhai vd., 2024).

Tane rengi, özellikle pigmentli tatlı mısırlarda hem görsel kaliteyi hem de ürün farklılaştırmasını belirleyen diğer bir özelliktir. Anirban vd. (2023), mor perikarplı sh2 tatlı mısır hatlarını normal tüketim dönemi olan 25 gün dölleme sonrası aşamada incelemiş ve siyanidin, peonidin ve pelargonidin temelli dokuz antosiyanin türevi belirlemiştir. Tim1 hattında toplam antosiyanin konsantrasyonu $253.0 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ yaş ağırlık olarak bulunmuş ve mor mısır ebeveyni Costa Rica'daki $255.8 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ değeriyle istatistiksel olarak benzer olmuştur. Tim2, Tim4 ve Tim5 hatlarında ise sırasıyla 238.1, 198.7 ve $221.4 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ toplam antosiyanin belirlenmiştir. Araştırmada tane renginin yalnızca toplam antosiyanin miktarına değil, siyanidin ve pelargonidin temelli antosiyaninlerin göreceli oranlarına da bağlı olduğu gösterilmiş, tüketim döneminde pigmentasyonun tane yüzeyinin hemen hemen tamamını kaplayabildiği belirlenmiştir. Böylece renk kalitesi, pigment konsantrasyonu ile pigment bileşiminin birlikte değerlendirilmesini gerektiren genotipe özgü bir özellik olarak ortaya çıkmaktadır (Anirban vd., 2023).

Kalite özelliklerinin tane gelişme dönemine bağlı olarak değişmesi, genotip kadar hasat zamanının da kalite oluşumundaki rolünü göstermektedir. Mousavi vd. (2025), beş süper tatlı hibritte dört farklı hasat dönemini karşılaştırmış ve kuru madde, fruktoz, glikoz, sakkaroz, mineral maddeler ile karotenoidlerin hem hibritten hem de hasat zamanından önemli ölçüde etkilendiğini belirlemiştir. D hibriti en yüksek sakkaroz miktarına ulaşırken, N hibriti kuru madde ve fruktoz, M hibriti β -karoten, S hibriti ise lutein ve zeaksantin bakımından üstünlük göstermiştir. İlk süt olum hasadında glikoz $84.2 \text{ mg } \text{g}^{-1}$ ve β -karoten $5.89 \text{ } \mu\text{g } \text{g}^{-1}$ ile yüksek değerlere ulaşırken farklı bileşenlerin maksimum birikimi daha ileri olgunluk dönemlerinde meydana gelebilmiştir. Dolayısıyla en uygun kalite, hangi kalite unsurunun hedeflendiğine ve kullanılan hibrite bağlı olarak farklılaşabilmektedir (Mousavi vd., 2025).

Tatlı mısırın biyokimyasal kalite kapsamı karotenoidler ve fenolik bileşikler gibi sekonder metabolitleri de içermektedir. Cruz vd. (2022), sh2 genini taşıyan UENF SD 08 süper tatlı hibritinde toplam karotenoid miktarını $936.76 \pm 16.34 \mu\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$ yaş materyal, toplam fenolik miktarını $345.81 \pm 3.80 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ve DPPH yöntemiyle belirlenen antioksidan aktiviteyi yaklaşık %45.53 olarak saptamıştır. Aynı genetik kökenden gelen UENF50611 mısırdaki bu değerler daha yüksek gerçekleşmiş ve araştırmacılar farklılığın genetik yapı ve sh2 mutasyonunun bulunduğu arka planla ilişkili olabileceğini değerlendirmiştir. Bu bulgu, yüksek tatlılığın bütün biyokimyasal kalite bileşenlerinin zorunlu olarak daha yüksek olması anlamına gelmediğini göstermektedir (Cruz vd., 2022).

Tatlı mısırdaki kalite özelliklerinin oluşumunda genotip $\times$ çevre etkileşimi önemli rol oynamaktadır. Ashraf vd. (2026)'nın tane kabuğu kalınlığı ve şeker özellikleri üzerinde yetiştirme dönemi ile genotip $\times$ yetiştirme dönemi etkileşimlerinin önemli olduğunu belirlemesi, Ye vd. (2023)'nin bitki sıklığının koçan özelliklerini değiştirmesine karşın çözünür kuru madde ve şeker bileşimini büyük ölçüde etkilemediğini göstermesi ve Mousavi vd. (2025)'nin hasat zamanına bağlı biyokimyasal değişimlerin hibritlere göre farklılık gösterdiğini ortaya koyması, tatlı mısırdaki kalite özelliklerinin yalnızca genotip tarafından belirlenmediğini göstermektedir. Genotipin sahip olduğu kalite potansiyelinin ortaya çıkmasında çevre koşulları, yetiştirme uygulamaları ve hasat olgunluğu da belirleyici olmaktadır. Bu nedenle çeşitlerin yalnızca verim veya °Brix değeri gibi tek bir ölçüye göre değerlendirilmesi, tüketim ve pazar kalitesinin bütünüyle ortaya konması açısından yeterli değildir (Ye vd., 2023; Mousavi vd., 2025; Ashraf vd., 2026).

Sonuç olarak tatlı mısırdaki kalite; tatlılık, tane yapısı, fiziksel görünüm, aroma, renk ve biyokimyasal bileşimin birlikte oluşturduğu bütüncül bir özellik olarak değerlendirilmelidir. Şekerler içerisinde özellikle sakkaroz tatlılığın temel bileşenidir; ancak su1, su1-se1 ve sh2 genetik gruplarında sakkaroz, maltoz ve nişasta dağılımlarının farklı olması her grubun kendine özgü bir tat ve tane yapısı profiline sahip olmasına yol açmaktadır. Perikarp kalınlığı tüketici tarafından algılanan yumuşaklık üzerinde güçlü bir etkiye sahip olmakla birlikte yeterli mekanik bütünlüğün korunması da önemlidir. Aroma kalitesinin çok sayıda uçucu bileşiğe, renk özelliklerinin pigment konsantrasyonu ve bileşimine, genel kalite profilinin ise yüzlerce primer ve sekonder metabolitin etkileşimine bağlı olması kaliteyi karmaşık bir ıslah ve yetiştiricilik hedefi haline getirmektedir. Buna göre yüksek

kaliteli tatlı mısır üretiminde tek bir kalite parametresinin en yüksek düzeye çıkarılmasından çok, genotip ve kullanım amacına uygun biçimde şeker içeriği, tane yapısı, koçan özellikleri, aroma ve görsel kalitenin dengelenmesi temel hedef olmalıdır (Yang vd., 2021; Anirban vd., 2023; Li vd., 2024; Zhai vd., 2024; X. Wu vd., 2025; Ashraf vd., 2026; Feng vd., 2026).

Besin bileşimi ve işlevsel özellikler

Tatlı mısırın besin değeri, tüketim dönemindeki yüksek şeker içeriğinin ötesinde, protein, mineral elementler, vitaminler ve karotenoidler, fenolik bileşikler, flavonoidler ve antosiyaninler gibi biyoaktif bileşenlerin birlikte oluşturduğu geniş bir bileşimle ilişkilidir. Bununla birlikte tatlı mısırın besin değeri ve işlevsel özellikleri sabit değildir. Çalışmalar, bu özelliklerin genotip, tane rengi, hasat olgunluğu ve yetiştirme uygulamalarına bağlı olarak önemli ölçüde değişebildiğini göstermektedir. Özellikle β -karoten, lutein, zeaksantin, β -kriptoksantin, α -tokoferol ve folat gibi mikrobelerin yanı sıra fenolik ve flavonoid bileşikler tatlı mısırın besin değerinin geliştirilmesinde önemli hedefler olarak ortaya çıkmaktadır. Buna ilave olarak son yıllarda genetik ve yetiştirme uygulamalarına dayalı besin öğelerince zenginleştirme yoluyla tatlı mısırın β -karoten, vitamin E, folat ve selenyum gibi bileşenlerce zenginleştirilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır (Lv vd., 2022; Saha vd., 2022; Cruz vd., 2022; Anirban vd., 2023; Mousavi vd., 2025; Asamoah vd., 2025; Niyorukundo vd., 2026).

Tatlı mısırın besin bileşiminin önemli bileşenlerinden biri mineral maddelerdir. Mousavi vd. (2025), beş süper tatlı hibritte Ca, Fe, K, Mg, Zn ve P ile çeşitli karotenoidleri birlikte incelemiş ve bütün bu bileşenlerin hem hibritten hem de hasat döneminden önemli ölçüde etkilendiğini belirlemiştir. M hibriti β -karoten bakımından $5.61 \mu\text{g g}^{-1}$ ile öne çıkarken aynı hibritte P ve Mg miktarları sırasıyla 3.45 ve 1.96 mg g^{-1} olarak belirlenmiştir. S hibriti ise $2.84 \mu\text{g g}^{-1}$ lutein, $2.71 \mu\text{g g}^{-1}$ zeaksantin ve $1.79 \mu\text{g g}^{-1}$ β -kriptoksantin ile bu karotenoidler bakımından en yüksek değerlere sahip olmuştur. Buna karşılık en yüksek sakkaroz miktarı D hibritinde 78.5 mg g^{-1} , en yüksek kuru madde ve fruktoz ise N hibritinde sırasıyla $\%32.7$ ve 61.4 mg g^{-1} olarak saptanmıştır. Bu geniş genotipik farklılık, yüksek besin değerin tek bir hibrit veya tek bir kimyasal özellik üzerinden tanımlanamayacağını göstermektedir (Mousavi vd., 2025).

Besin bileşenlerinin miktarı hasat olgunluğuyla da önemli ölçüde değişmektedir. Mousavi vd. (2025)'nin süt olumdan erken diş olum dönemine uzanan dört hasat zamanını karşılaştırdığı çalışmada, ilk hasat olan süt olum döneminde β -karoten $5.89 \mu\text{g g}^{-1}$, K 4.17 mg g^{-1} ve glikoz 84.2 mg g^{-1} ile en yüksek düzeylere ulaşmıştır. Aynı dönemde α -karoten, 9Z- β -karoten, P, Zn, Mg, Ca ve fruktoz da daha yüksek değerler göstermiştir. Buna karşılık lutein tam hamur olum döneminde, β -kriptoksantin, zeaksantin, sakkaroz ve kuru madde ise erken diş olum döneminde maksimum değerlere ulaşmıştır. Bu sonuçlar, tatlı mısırdaki besin kalitesinin olgunlaşma boyunca tek yönlü değişmediğini göstermektedir. Daha geç hasadın bazı karotenoidleri veya kuru maddeyi artırması mümkün olmakla birlikte, başka bileşenler süt olum döneminde daha yüksek düzeyde bulunabilmektedir. Bu nedenle besin kalitesi amacıyla hasat zamanının belirlenmesinde hedeflenen bileşenin dikkate alınması gerekmektedir (Mousavi vd., 2025).

Karotenoidler, özellikle sarı ve turuncu taneli tatlı mısırların önemli pigment ve besin bileşenleri arasında yer almaktadır. Bu grubun içerisinde β -karoten provitamin A bakımından özel öneme sahip olduğundan, tatlı mısırın genetik yollarla besin öğelerince zenginleştirme çalışmalarında doğrudan hedef alınmıştır. Saha vd. (2022), *sh2* temelli SC11-2 tatlı mısır kendilenmiş hattına crtRB1 geninin uygun allelini markör destekli geriye melezleme yoluyla aktarmıştır. Tekrarlanan ebeveyn SC11-2'de β -karoten yalnızca $0.989 \mu\text{g g}^{-1}$ iken geliştirilen dört BC₂F₃ hattında β -karoten miktarı $9.878\text{--}10.645 \mu\text{g g}^{-1}$ aralığına yükselmiştir. Böylece yaklaşık on katlık bir zenginleşme sağlanırken, hatlardaki toplam şeker miktarı %18.00–19.65 arasında kalmış ve tekrarlanan ebeveyndeki %20.40 değerine büyük ölçüde yaklaşmıştır. Aynı hatlarda toplam çözünür kuru madde %16.0–18.5 aralığında bulunmuştur. Dolayısıyla β -karotenin önemli ölçüde artırılmasının tatlı mısırın temel tatlılık özelliğinin tamamen kaybedilmesi anlamına gelmediği gösterilmiştir (Saha vd., 2022).

Bu sonuç aynı zamanda tatlı mısırın besin değerinin iyileştirilmesinde hedef bileşik ile temel tüketim kalitesinin birlikte korunmasının önemini göstermektedir. Saha vd. (2022)'nin araştırmasında geliştirilen hatlarda tekrarlanan ebeveyn genomunun %94–96 düzeyine kadar geri kazanılması ve β -karoten artışının yüksek şeker miktarı korunarak sağlanması, moleküler ıslahın tatlı mısırın besin öğelerince zenginleştirilmesindeki potansiyelini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, çalışmada geliştirilen materyaller doğrudan insan beslenmesi veya vitamin A durumuna ilişkin

klirik bir arařtırmada deęerlendirilmemiřtir. Bu nedenle elde edilen sonular, β -karotence zengin tatlı mısır materyalinin geliřtirilmesi aısından deęerlendirilmelidir; bu materyallerin tketiminin vitamin A yetersizlięini hangi dzeyde azaltabileceęine iliřkin doęrudan bir saęlık etkisi olarak genellenme yapılmamalıdır (Saha vd., 2022).

Vitamin E ve folat ierięinin artırılması da tatlı mısırdaki genetik yollarla besin elerince zenginleřtirmenin dięer bir ynn oluřturmaktadır. Lv vd. (2022), 52 tatlı mısır kendilenmiř hattını vitamin E ile iliřkili ZmVTE4 ve folat metabolizmasıyla iliřkili ZmCTM allelleri bakımından taramıř, altı hattın vitamin E, dokuz hattın folat ve  hattın her iki zellik iin uygun allelleri tařıdığını belirlemiřtir. Bařka bir ifadeyle incelenen elit materyalin yalnızca %11.54'nde vitamin E ile iliřkili, %17.31'inde folat ile iliřkili ve %5.77'sinde her iki zellik iin uygun allel birlikte bulunmuřtur. Bu sonu, tatlı mısır genetik materyalinde besin zelliklerini geliřtirmek iin kullanılabilecek allelik varyasyon bulunduęunu, ancak bu allellerin elit materyallerde yaygın olmadığını gstermektedir (Lv vd., 2022). Lv vd. (2022)'nin sonuları aynı zamanda molekler markrlerin besin kalitesini tahmin etmesinde kimyasal doęrulamanın gereklilięini de gstermektedir. alıřmada bazı ZmVTE4 uygun allellerini tařıyan hibritlerin serbest α -tokoferol miktarı, ilgili uygun alleli tařımayan bir hibritten daha dřk bulunmuřtur. Folat bakımından ise homozigot ZmCTM G/G genotiplerini tařıyan bazı hibritlerde daha yksek serbest folat miktarı belirlenmiř, ancak aynı alleli tařıyan hibritler arasında da farklılık grlmřtir. Dolayısıyla mikro besin elerince zenginleřtirmede yalnızca uygun allelin varlıęının belirlenmesi yeterli olmayıp, genetik yapı ve hibrit kombinasyonunun etkisi nedeniyle hedef besin maddesinin doęrudan kimyasal olarak llmesi de gerekmektedir (Lv vd., 2022).

Tatlı mısırın iřlevsel zelliklerinin dięer nemli bileřenlerini fenolik maddeler ve bunlarla iliřkili antioksidan kapasite oluřturmaktadır. Cruz vd. (2022), *sh2* genini tařıyan UENF SD 08 sper tatlı mısır hibritinde toplam karotenoid miktarını $936.76 \pm 16.34 \mu\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$ yař aęırlık, toplam fenolik miktarını yaklaşık $346.0 \pm 3.80 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ve DPPH radikal sprme yntemiyle antioksidan aktiviteyi $\%45.53 \pm 0.01$ olarak belirlemiřtir. Aynı genetik kkenden gelen ancak *sh2* mutasyonunu tařımayan UENF50611 normal mısırında deęerler sırasıyla $1173.38 \pm 21.66 \mu\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$, $563.33 \pm 7.97 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ve $\%59.82 \pm 0.11$ ile daha yksek bulunmuřtur. Ayrıca toplam fenolik miktarı ile antioksidan aktivite arasında gl bir korelasyon ($r > 0.70$) belirlenirken, karotenoidlerle

antioksidan aktivite arasındaki ilişki daha düşük düzeyde gerçekleşmiştir. Dolayısıyla yüksek şekerli süper tatlı fenotipin bütün biyoaktif bileşenler bakımından zorunlu olarak daha yüksek bir değer oluşturmadığı görülmektedir (Cruz vd., 2022).

Bu noktada “antioksidan aktivite” kavramının dikkatli yorumlanması önemlidir. Cruz vd. (2022)'nin DPPH yöntemi ve Alan vd. (2024)'ün FRAP temelli değerlendirmeleri, örneklerin in vitro kimyasal antioksidan kapasitesini göstermekte, doğrudan insan organizmasındaki antioksidan etkiyi veya herhangi bir hastalığı önleyici klinik sonucu ölçmemektedir. Alan vd. (2024), Sentinel ve Khan süper tatlı çeşitlerinde toplam fenolik içeriğin iki yıllık ortalamalarda yaklaşık 75.6–81.3 mg GAE 100 g⁻¹, antioksidan aktivitenin ise yaklaşık 3.37–3.75 µmol TE g⁻¹ aralığında değiştiğini göstermiştir. Khan çeşidinde OMF I uygulaması 81.3 mg GAE 100 g⁻¹ toplam fenolik ve 3.69 µmol TE g⁻¹ antioksidan kapasite ile yüksek değerlere ulaşmış olmakla birlikte, iki yıllık analizde gübreleme ana etkisi bu iki özellik için istatistiksel olarak anlamlı bulunmamış, buna karşılık yıl etkisi belirgin olmuştur. Böylece fenolik ve antioksidan özelliklerin yalnızca gübre uygulamasına bağlanamayacağı, genotip ve çevresel koşulların da dikkate alınması gerektiği anlaşılmaktadır (Alan vd., 2024).

Pigmentli tatlı mısırlar, işlevsel bileşenlerin çeşitlendirilmesi açısından ayrı bir potansiyel taşımaktadır. Anirban vd. (2023), mor perikarplı *sh2* tatlı mısır materyallerinde normal tüketim dönemi olan 25 gün döllenme sonrası aşamada siyanidin, peonidin ve pelargonidin temelli dokuz farklı antosiyanin türevi belirlemiştir. Tim1 hattında toplam antosiyanin miktarı 253.0 mg 100 g⁻¹ yaş ağırlık olarak belirlenmiş ve bu değer, mor mısır ebeveyni Costa Rica'da saptanan 255.8 mg 100 g⁻¹ değerinden önemli düzeyde farklılık göstermemiştir. Tim2, Tim4 ve Tim5 materyallerinde ise toplam antosiyanin miktarları sırasıyla 238.1, 198.7 ve 221.4 mg 100 g⁻¹ yaş ağırlık olarak belirlenmiştir. Ayrıca antosiyaninlerin, tatlı mısırın taze tüketim amacıyla hasat edildiği fizyolojik olgunluk öncesi dönemde dahi tane yüzeyinde birikebildiği gösterilmiştir (Anirban vd., 2023).

Renkli tatlı mısırın besin değeri açısından geliştirilmesi, 2026 yılında yayımlanan daha geniş kapsamlı bir ıslah çalışmasında da ortaya konulmuştur. Niyorukundo vd. (2026), farklı renkli normal mısır materyallerini *su1* ve *sh2* tatlı mısırlarla melezlemiş, beş generasyonluk seleksiyon sonucunda dokuz renkli tatlı mısır kendilenmiş hattı ve bunlardan 20 hibrit çeşit geliştirmiştir. Sarı-turuncu, mor, mavi ve kırmızı

renklerin tüketim döneminde belirginleşebildiği bu materyallerde tatlılık ve tane yumuşaklığının ebeveyn tatlı mısırlara benzer düzeyde tutulabildiği bildirilmiştir. Karotenoid ve flavonoid profilleri genotipler arasında belirgin farklılık göstermiştir. Örneğin CS6 materyalinde apigenin, genistein ve kaempferol birikimi yüksek bulunurken, aynı renkteki diğer bazı materyallerde bu bileşiklerin çok düşük veya tespit edilemez olması dikkat çekmiştir. Bu durum tane renginin tek başına toplam işlevsel bileşik miktarının güvenilir göstergesi olmadığını göstermektedir (Niyorukundo vd., 2026).

Niyorukundo vd. (2026)'nin sonuçlarında renk pigmentlerinin aktarılması bazı genotiplerde flavonoid miktarını artırırken, fenolik asitlerde aynı yönde bir değişim gözlenmemiştir. Genel olarak ebeveyn tatlı mısırların fenolik asit konsantrasyonları renkli hatlardan daha yüksek bulunmuş, mavi renkli CS3 bu eğilimin istisnasını oluşturmuştur. Böylece pigmentli tatlı mısır geliştirme çalışmalarının “renk artışı = bütün biyoaktif bileşiklerin artışı” şeklinde yorumlanmaması gerektiği anlaşılmaktadır. Tane rengi; karotenoid, flavonoid ve antosiyanin bileşimiyle ilişkili yararlı bir fenotipik gösterge olmakla birlikte, işlevsel bileşenlerin gerçek miktarının doğrudan analitik yöntemlerle belirlenmesi gerekmektedir (Niyorukundo vd., 2026).

Tatlı mısırın besin değeri, yetiştirme uygulamaları yoluyla besin öğelerince zenginleştirilebilmektedir. Bu konuda elde edilen bulgulardan biri selenyum uygulamalarına ilişkindir. Asamoah vd. (2025), yapraktan 0, 20, 40 ve 60 g ha⁻¹ Se uygulamalarını karşılaştırmış ve 20–40 g ha⁻¹ düzeylerindeki uygulamaların çözünür şeker, amiloz, protein, C vitamini ve bazı mineral elementlerin miktarını artırabildiğini belirlemiştir. Özellikle 20 g ha⁻¹ Se uygulamasında Fe ve Cu düzeyleri kontrole göre sırasıyla %5.1 ve %10.7 artarken, 40 g ha⁻¹ uygulamasında bu artışlar sırasıyla %3.8 ve %6.3 olarak gerçekleşmiştir. Buna karşılık 60 g ha⁻¹ Se uygulamasında söz konusu elementler bakımından belirgin bir artış görülmemiş ve yüksek dozun oksidatif denge üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğu bildirilmiştir. Bu sonuçlar, selenyum uygulamasının etkisinin doza bağlı olduğunu ve uygulama miktarındaki artışın her zaman besin kalitesinde daha yüksek bir iyileşme sağlamadığını göstermektedir (Asamoah vd., 2025).

Selenyumla besin öğelerince zenginleştirmede yalnızca toplam Se miktarı değil, Se'nin kimyasal formu ve sindirim sırasında serbestleşebilen

bölümü de önem taşımaktadır. Asamoah vd. (2025)'nin çalışmasında tanelerdeki Se konsantrasyonu kontrolde 0.06 mg kg⁻¹ iken, en yüksek uygulama dozunda 2.05 mg kg⁻¹'ye ulaşmıştır. Organik Se bileşikleri içerisinde selenometiyonin (SeMet) bütün uygulamalarda baskın form olmuş; 20 g ha⁻¹ Se uygulamasında toplam Se'nin %82.3'ünü SeMet, %12.6'sını selenosistein ve %5.1'ini metilselenosistein oluşturmuştur. İn vitro sindirim analizlerinde Se'nin mide fazındaki biyoerişilebilirliği kontrolde %14.67 iken, artan Se uygulamalarında sırasıyla %23.67, %30.33 ve %35.60'a yükselmiştir. Gastrointestinal fazdaki biyoerişilebilirlik ise kontroldeki %37.67 düzeyinden sırasıyla %51.33, %61.00 ve %76.00'a çıkmıştır. Bu bulgular, tatlı mısırın Se bakımından zenginleştirilebilecek bir gıda ürünü olma potansiyelini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, in vitro koşullarda belirlenen biyoerişilebilirlik gerçek biyoyararlanımla eş anlamlı değildir; çalışma Se'nin insanlarda emilimini veya fizyolojik etkilerini doğrudan değerlendirmemiştir (Asamoah vd., 2025).

Tatlı mısırın besin bileşimi ve işlevsel özelliklerinin yetiştirme öncesi uygulamalarla değiştirilebileceğini gösteren başka bir çalışma hidrojenle zenginleştirilmiş su üzerinedir. Wang vd. (2026), Shenxuetian 1 çeşidinde aynı su koşulları altında hidrojenle zenginleştirilmiş su uygulamasının kontrol grubuna göre toplam çözünür şekeri yaklaşık %31.10, çözünür proteini %61.53, vitamin C'yi %28.31, toplam fenolikleri %21.06 ve toplam flavonoidleri %40.56 artırdığını bildirmiştir. Aynı uygulamada Zn, Fe ve Mn miktarları sırasıyla yaklaşık %96.82, %51.70 ve %40.37 artmış, Cu miktarındaki değişim ise anlamlı bulunmamıştır. Sakkaroz, glikoz ve fruktoz miktarlarındaki artışlar sırasıyla yaklaşık %11.79, %6.21 ve %26.50 olmuştur (Wang vd., 2026). Aynı çalışmada hidrojenle zenginleştirilmiş su uygulaması SOD, POD ve CAT gibi antioksidan enzimlerin aktivitelerini artırmış ve ABTS, DPPH ve FRAP gibi antioksidan kapasite göstergelerinde iyileşmeler oluşturmuştur. Bununla birlikte bu çalışma bir çeşitle, kontrollü sera üretim koşullarında gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle elde edilen artış oranlarının farklı genotip ve yetiştirme ortamlarında aynı biçimde gerçekleşeceği varsayılmaz. Hidrojen bakımından zenginleştirilmiş suyla sulama, mevcut bulgular doğrultusunda tatlı mısırın besin bileşimini ve bazı kalite özelliklerini etkileyebilecek bir uygulama olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte, farklı genotip ve yetiştirme koşullarında yeterince doğrulanmadığından

standart bir yetiştiricilik ya da besin öğelerince zenginleştirme uygulaması olarak önerilmesi uygun değildir (Wang vd., 2026).

Tatlı mısırın işlevsel potansiyeli yalnızca tüketilen tanelerle sınırlı olmayıp üretim ve işleme sonrasında oluşan yan ürünleri de kapsamaktadır. Lau vd. (2022), tatlı mısır koçanından elde edilen unun yüksek lif ve ferulik asit içeriğine sahip bir işlevsel bileşen olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir. Çalışmada kullanılan liyofilize tatlı mısır koçanı ununun ferulik asit miktarı 6.02 mg g^{-1} olarak belirlenmiş ve pirinç ununun %10, %20 ve %30'u yerine kullanılmasıyla glutensiz keklerin diyet lifi ve serbest ferulik asit miktarı artırılmıştır. Pişirme sonrasında serbest ferulik asit miktarı %10, %20 ve %30 koçan unu içeren ürünlerde sırasıyla %29, %32 ve %40 artmıştır. Toplam ferulik asitte bazı kayıplar görülmesine rağmen %20 ve %30 koçan unu içeren ürünlerde muffin başına sırasıyla 20.15 ve 23.58 mg ferulik asit bulunurken kontrol ürünü yalnızca 1.76 mg içermiştir (Lau vd., 2022).

Bu bulgu tatlı mısır üretiminin işlevsel değerinin yalnızca taze koçanla sınırlı olmadığını ve koçan gibi yan ürünlerin yüksek katma değerli gıda bileşenlerine dönüştürülebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte lif miktarındaki artış ürün teknolojisini ve duyuşal özellikleri de değiştirebilmektedir. Lau vd. (2022)'nin 121 tüketiciyle yaptığı değerlendirmede tatlı mısır koçanı unu içeren keklerin genel beğeni puanları kontrol pirinç unu keklerinden yüksek olmuş ve %10 daha fazla beğeni değerlerini vermiş, diğer yandan koçan unu oranı yükseldikçe özellikle tane yapısı beğenisi azalmıştır. Dolayısıyla işlevsel bileşen zenginleştirmesinde yalnızca besin içeriğinin artırılması değil, tüketici kabulü ve ürün teknolojisinin korunması da önemlidir (Lau vd., 2022).

Tatlı mısırın besin değeri ve işlevsel özelliklerinin üç temel mekanizma üzerinden geliştirilebildiği görülmektedir. Birincisi, doğal genotipik varyasyon ve tane pigmentasyonundan yararlanılarak β -karoten, lutein, zeaksantin, antosiyanin ve diğer flavonoidlerce zengin materyaller seçilebilmektedir. İkincisi, crtRB1, ZmVTE4 ve ZmCTM gibi besin değeriyle ilişkili gen ve allellerin kullanıldığı moleküler ıslah yöntemleriyle provitamin A, vitamin E ve folat içeriğinin artırılması hedeflenebilmektedir. Üçüncüsü ise selenyum uygulaması veya hidrojenle zenginleştirilmiş sulama gibi agronomik müdahaleler aracılığıyla mineral ve biyoaktif bileşenlerin miktar ve dağılımının değiştirilmesidir. Ancak bütün bu yaklaşımlarda genotip $\times$ çevre $\times$ uygulama interaksyonunun

önemli olduğu, tek bir bileşendeki artışın genel besin değeri açısından üstünlük anlamına gelmediği ve analitik olarak belirlenen biyoaktif madde veya in vitro antioksidan kapasitenin doğrudan klinik sağlık etkisine eşitlenmemesi gerektiği unutulmamalıdır. Bu nedenle tatlı mısırdaki işlevsel kalite geliştirme çalışmalarında hedef; yüksek tüketim kalitesini korurken vitamin, mineral ve biyoaktif bileşenlerin miktarını ve kullanılabilirliğini bilimsel olarak doğrulanmış biçimde artırmak olmalıdır (Lv vd., 2022; Saha vd., 2022; Cruz vd., 2022; Anirban vd., 2023; Mousavi vd., 2025; Asamoah vd., 2025; Wang vd., 2026; Niyorukundo vd., 2026).

Hasat sonrası fizyoloji, kalite değişimleri ve muhafaza

Tatlı mısır, tanelerin fizyolojik olgunluğa ulaşmasından önce, yüksek su ve çözünür şeker içeriğine sahip olduğu süt olum döneminde hasat edildiğinden, hasat sonrasında metabolik faaliyetlerini yoğun biçimde sürdüren ve kalite kaybına son derece açık bir üründür. Hasat, koçanın bitkiden ayrılmasıyla büyüme sürecini sonlandırmakla birlikte solunum, su kaybı, şeker metabolizması, oksidatif reaksiyonlar ve hücresel yaşlanma gibi fizyolojik süreçleri durdurmamaktadır. Tatlılık, sululuk, gevreklik, yumuşaklık, renk ve aroma gibi tüketici tarafından aranan özelliklerin önemli bölümü yüksek su ve şeker düzeyiyle ilişkili olduğundan, aynı özellikler ürünü hasat sonrasında hızlı bozulmaya da yatkın hâle getirmektedir. Bu nedenle tatlı mısırın hasat sonrası yönetiminde temel amaç yalnızca mikrobiyal bozulmayı geciktirmek değil, solunum hızını düşürmek, su kaybını sınırlandırmak, şekerlerin tüketimini yavaşlatmak, doku bütünlüğünü ve karakteristik aroma profilini korumak ve böylece hasat anındaki kaliteyi mümkün olduğunca uzun süre muhafaza etmektir (Becerra-Sanchez ve Taylor, 2021; Wang vd., 2023).

Tatlı mısırın kısa muhafaza ömrünün temel fizyolojik nedenlerinden biri yüksek solunum aktivitesidir. Solunum sırasında tanelerdeki organik substratlar, özellikle şekerler enerji üretiminde kullanılmakta ve bunun sonucunda tatlılık ile kuru madde rezervleri zaman içerisinde azalmaktadır. Becerra-Sanchez ve Taylor (2021), tatlı mısırın yüksek şeker ve nem içeriği nedeniyle taze ve taze kesilmiş sebzeler içerisinde yüksek solunum hızına sahip ürünlerden biri olduğunu belirtmiştir. Yürütülen çalışmalarda koçanların solunum hızının sıcaklığa bağlı olarak yaklaşık $-1\text{ }^{\circ}\text{C'de } 15\text{ mL CO}_2\text{ kg}^{-1}\text{ h}^{-1}$ düzeyinden $30\text{ }^{\circ}\text{C'de } 480.3\text{ mL CO}_2\text{ kg}^{-1}\text{ h}^{-1}$ düzeyine kadar değişebildiği bildirilmektedir. Aynı değerlendirmede sıcaklıktaki her $10\text{ }^{\circ}\text{C'lik}$ yükselişin solunum hızını yaklaşık iki katına çıkarabildiği

belirtilmiştir. Bu değerler tek bir genotip için evrensel sabitler olmamakla birlikte, sıcaklığın tatlı mısırın hasat sonrası metabolizmasını yöneten başlıca çevresel faktörlerden biri olduğunu açık biçimde göstermektedir. Solunumun hızlanması yalnızca şeker tüketimini değil, metabolik ısı oluşumunu, yaşlanmayı ve mikrobiyal bozulmaya elverişli koşulların oluşmasını da hızlandırmaktadır (Becerra-Sanchez ve Taylor, 2021).

Tatlılık kaybı hasat sonrası kalite bozulmasının en belirgin göstergelerinden biridir. Bununla birlikte şekerlerin başlangıç düzeyi ve muhafaza süresince değişim hızı genetik yapıya bağlıdır. Becerra-Sanchez ve Taylor (2021)'in değerlendirdiği verilerde 6 °C'de beş günlük depolama sonunda toplam çözünür şeker miktarı *sh2* genotipinde yaş ağırlık esasına göre %11.01'den %10.18'e, *su* genotipinde %3.58'den %3.39'a ve *se* genotipinde %8.13'ten %6.05'e düşmüştür. Bu sonuç, aynı muhafaza koşullarında dahi genotiplerin şeker kaybının aynı düzeyde olmayabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla hasat sonrası dayanıklılığın yalnızca başlangıçtaki yüksek şeker konsantrasyonu ile açıklanması yeterli olmayıp, şeker metabolizmasının genetik yapısı ve depolama koşullarına verdiği tepki de dikkate alınmalıdır (Becerra-Sanchez ve Taylor, 2021).

Bu genotip × muhafaza koşulu etkileşimi, Zhai vd. (2024)'nin üç ılıman ve üç tropikal ticari *sh2* tatlı mısır çeşidini karşılaştırdığı çalışmada daha ayrıntılı biçimde ortaya konmuştur. Koçanlar 22. döllenme gününde hasat edilmiş ve kavuzları üzerinde bırakılarak normal sıcaklıkta 23–26 °C veya düşük sıcaklıkta 4 °C koşullarında muhafaza edilmiştir. Başlangıçtaki toplam çözünür şeker miktarları çeşitlere bağlı olarak yaklaşık 63.41–69.43 g kg⁻¹ arasında değişmiş, depolama süresi ilerledikçe bütün çeşitlerde toplam ve indirgen şeker miktarları azalmıştır. Ancak düşük sıcaklık bu azalmayı belirgin biçimde yavaşlatmıştır. Örneğin 4 °C'de toplam şeker kaybı bazı genotiplerde 10 günlük depolama sonunda yalnızca 1.39–3.60 g kg⁻¹ düzeyinde kalmıştır. Daha dikkat çekici olarak, 4 °C'de 10 gün tutulan tanelerin indirgen şeker miktarı, aynı çeşitlerin normal sıcaklıkta yalnızca beş gün muhafaza edilen örneklerinden daha yüksek bulunmuştur. Bu durum soğuk muhafazanın tatlılık kaybını tamamen önlememekle birlikte şeker metabolizmasının hızını önemli ölçüde sınırlandırabildiğini göstermektedir (Zhai vd., 2024).

Tatlı mısırdaki hasat sonrası bozulmanın diğer temel bileşeni su kaybıdır. Yüksek tane nemi, taze ürüne karakteristik sululuk ve gevrekliği kazandırırken depolama sırasında transpirasyon ve solunum yoluyla su

kaybı meydana gelmesi tane yüzeyinde buruşma, doku sertleşmesi, kavuzlarda solma ve genel tazelik görünümünün azalmasıyla sonuçlanabilmektedir. Zhai vd. (2024)'nde bütün genotiplerin tane nemi muhafaza boyunca azalmış, kayıp hızı genetik materyal ve sıcaklığa göre farklılık göstermiştir. Düşük sıcaklıkta 10 günlük depolama sonunda incelenen çeşitlerin nem içerikleri yaklaşık %72–73 düzeyinde birbirine yaklaşmıştır. Wang vd. (2023) ise dondurulmuş tatlı mısırdaki depolama süresinin uzamasıyla su kaybının ve tane sertliğinin genel olarak arttığını belirlemiştir. Bu nedenle muhafaza başarısının değerlendirilmesinde yalnızca şeker miktarının değil, ağırlık kaybı, nem durumu ve yapısal özellikleri birlikte ele alınmalıdır (Zhai vd., 2024; Wang vd., 2023).

Aroma bileşenleri de hasat sonrası fizyolojik değişimlerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Tatlı mısırın tüketici tarafından algılanan kalitesi yalnızca tatlılıkla belirlenmemekte, karakteristik koku ve uçucu bileşiklerin oluşturduğu aroma profili de toplam yeme kalitesine katkıda bulunmaktadır. Zhai vd. (2024), altı ticari çeşitte GC–MS analiziyle 119, GC–IMS analiziyle ise 50 uçucu metabolit belirlemiş ve depolama koşullarıyla genetik yapının uçucu madde bileşimini güçlü biçimde değiştirdiğini göstermiştir. Taze örneklerde etil asetat ve etanol belirgin uçucu bileşenler arasında yer alırken, çeşitler farklı aroma profilleri göstermiştir. Beş günlük normal sıcaklık muhafazasından sonra uçucu bileşik miktarlarının önemli ölçüde azalması, buna karşılık düşük sıcaklığın aroma bileşenlerinin korunmasını desteklemesi dikkat çekicidir. Ayrıca kümeleme ve temel bileşen analizlerinde ılıman ve tropikal kökenli çeşitlerin depolama sonrasında da ayrı gruplar oluşturabilmesi, hasat sonrası aroma kararlılığının önemli bir genetik bileşene sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Zhai vd., 2024).

Sıcaklığın solunum, şeker kaybı, aroma değişimi ve mikrobiyal gelişme üzerindeki merkezi etkisi nedeniyle hasattan sonra ürün sıcaklığının mümkün olduğunca kısa sürede uzaklaştırılması, tatlı mısır muhafazasının temel aşamalarından biridir. Becerra-Sanchez ve Taylor (2021), tatlı mısırın düşük sıcaklığa hassas bir ürün olmadığını ve taze ürün kalitesinin korunmasında sıcaklığın donma meydana getirmeyecek biçimde 0 °C'ye mümkün olduğunca yakın tutulmasını temel strateji olarak değerlendirmiştir. Aynı derlemede zorlanmış hava ile soğutmanın bazı koşullarda 28.2 °C'den 3 °C'ye düşüş için 180 dakikaya kadar sürebildiği, buna karşılık hidrosoğutmanın hasat sonrası ürün sıcaklığının daha hızlı uzaklaştırılmasında etkili olduğu bildirilmiştir. Hidrosoğutma sisteminde

soğuk suyun ürün üzerinden geçirilmesi hızlı ısı transferi sağlamakta, vakumla soğutma ise daha kısa soğutma süreleri sunabilmekle birlikte daha yüksek altyapı maliyeti gerektirmektedir. Dolayısıyla muhafaza zincirinde yalnızca son depolama sıcaklığı değil, ürünün hasattan sonra hedef sıcaklığa ne kadar hızlı ulaştırıldığı da kalite kaybının sınırlandırılmasında önem taşımaktadır (Becerra-Sanchez ve Taylor, 2021).

Bununla birlikte sıcaklığın tek başına düşürülmesi yeterli olmayıp, soğuk zincirin hasat sonrası taşıma, depolama, dağıtım ve perakende aşamalarında kesintisiz korunması gerekmektedir. Hasattan hemen sonra etkili biçimde soğutulan fakat daha sonraki aşamalarda yüksek sıcaklığa maruz kalan ürünlerde solunum hızının tekrar yükselmesi, şeker tüketiminin hızlanması ve aromatik bileşenlerin kaybı söz konusu olmaktadır. Zhai vd. (2024)'nin doğrudan karşılaştırmasında, 4 °C'de muhafaza edilen koçanlarda şeker içeriği ve aroma ile ilişkili özelliklerin 23–26 °C'de muhafaza edilen koçanlara göre daha iyi korunduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, çalışmada elde edilen 10 günlük muhafaza süresi bütün tatlı mısır çeşitleri için genel bir raf ömrü ölçütü olarak değerlendirilmemelidir. Muhafaza süresi; genotip, hasat olgunluğu, koçanın kavuzlu veya kavuzsuz olması, başlangıçtaki mikrobiyal yük ve paketleme koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir (Zhai vd., 2024).

Düşük sıcaklıkla birlikte atmosfer bileşiminin düzenlenmesi, solunum hızını ve buna bağlı kalite kayıplarını daha fazla sınırlandırmak amacıyla kullanılabilir. Modifiye atmosfer (MA) ve kontrollü atmosfer (CA) sistemlerinin temel ilkesi, paket veya depolama ortamındaki O₂ ve CO₂ konsantrasyonlarını normal havadan farklı hâle getirerek dokunun solunum aktivitesini azaltmaktır. Becerra-Sanchez ve Taylor (2021)'in derlediği araştırmalarda düşük sıcaklık koşullarındaki taze veya taze kesilmiş tatlı mısır için yaklaşık %5–10 O₂ ve %10–15 CO₂ aralığındaki atmosferlerin kalite korunmasında yararlı olabildiği, derlemenin sonuç kısmında 0–5 °C'deki taze kesilmiş ürün için %10 O₂ + %15 CO₂ kombinasyonunun uygun bir örnek koşul olarak öne çıktığı bildirilmiştir. Ancak yazarlar film geçirgenliği, perforasyon düzeyi, paketlenen ürün miktarı, sıcaklık ve genotipin sistemin başarısını değiştirdiğini açıkça vurgulamaktadır. Bu nedenle söz konusu gaz oranları tatlı mısır için değişmez veya evrensel bir muhafaza reçetesi olarak değerlendirilmemelidir (Becerra-Sanchez ve Taylor, 2021).

Atmosfer bileşiminin kontrolünde özellikle aşırı düşük O₂ koşullarından kaçınılması önemlidir. Oksijenin azaltılması aerobik solunumu yavaşlatıp şeker kaybını sınırlandırabilmekle birlikte, ürünün gereksiniminin altına inilmesi anaerobik metabolizmayı teşvik ederek etanol ve diğer fermentasyon ürünlerinin oluşmasına ve istenmeyen koku ile tatların gelişmesine neden olabilir. Bu risk sıcaklık yükseldikçe daha da artmaktadır. Çünkü yüksek sıcaklıkta dokunun O₂ tüketimi hızlanmakta ve paket içerisinde anoksik koşullar daha kolay oluşabilmektedir. Bu nedenle modifiye atmosfer teknolojisi soğutmanın alternatifi değil, etkili bir soğuk zinciri tamamlayan bir muhafaza yöntemi olarak değerlendirilmelidir. Ürün sıcaklığı, solunum hızı ve ambalaj filminin gaz geçirgenliği birlikte dikkate alınmadığında, kaliteyi korumak amacıyla oluşturulan düşük O₂ ortamı tersine fermentatif bozulmaya yol açabilmektedir (Becerra-Sanchez ve Taylor, 2021).

Taze soğuk muhafazaya kıyasla daha uzun süreli koruma gerektiğinde dondurma tatlı mısır için önemli bir yöntemdir. Düşük sıcaklıklarda mikrobiyal gelişmenin ve kimyasal reaksiyonların büyük ölçüde yavaşlatılması, hasat sonrası metabolizmanın sınırlandırılmasını sağlar. Bununla birlikte dondurmanın başarısı yalnızca nihai sıcaklığa değil, buz kristallerinin oluşum hızı ve dağılımına bağlı olarak hücre ve doku yapısında meydana gelen değişikliklere de bağlıdır. Wang vd. (2023), ultrason destekli dondurma, salamurada dondurma, kuvvetli hava akımıyla dondurma ve geleneksel soğutucu dondurmasını karşılaştırmış, salamura ve kuvvetli hava akımıyla dondurmanın renk, duysal kalite, çözünür şekerler, çözünür kuru madde ve antioksidan enzim aktivitelerinin korunması bakımından genel olarak daha başarılı olduğunu bildirmiştir. Araştırmada dondurma yönteminin kendisinin dahi muhafaza sonundaki kaliteyi belirleyen önemli bir teknolojik değişken olduğu ortaya konulmuştur (Wang vd., 2023).

Wang vd. (2023)'nin çalışmasında başlangıçta 28.13 mg g⁻¹ olan çözünür şeker miktarı, 42 günlük depolama sonunda ultrason destekli dondurmada 13.00, salamurada dondurmada 12.44, kuvvetli hava akımıyla dondurmada 16.31 ve geleneksel dondurma uygulamasında 7.75 mg g⁻¹ olarak belirlenmiştir. Aynı dönemde çözünür kuru madde miktarı kuvvetli hava akımıyla dondurulan örneklerde %7.2, salamurada dondurulanlarda %6.8 ve geleneksel yöntemle dondurulanlarda %6.10 düzeyinde bulunmuştur. Depolama süresince bütün uygulamalarda ağırlık kaybı artmış; 42. günde kuvvetli hava akımıyla dondurulan örneklerde %34.10

olan ağırlık kaybı, ultrason destekli dondurulan örneklerde %39.87'ye ulaşmıştır. Bu bulgular, dondurma yöntemlerinin tatlı mısırın şeker içeriği, su durumu ve tane yapısındaki değişimleri tamamen engellemediğini ve düşük sıcaklıklarda dahi kalite kayıplarının devam edebildiğini göstermektedir (Wang vd., 2023). Dondurulmuş muhafazada meydana gelen kalite farklılıklarının önemli bir kısmı hücresel yapı ve oksidatif metabolizmayla ilişkilidir. Wang vd. (2023)'nin çalışmasında depolama sürecinde epidermal ve hücresel yapının dondurma yöntemine bağlı olarak farklı düzeylerde bozulduğunu belirlenmiş, salamurada dondurulan örneklerin hücresel bütünlüğü görece daha iyi koruduğu, kuvvetli hava akımı uygulamasının da olumlu sonuç verdiği bildirilmiştir. Aynı çalışmada askorbat peroksidaz (APX) ve katalaz (CAT) aktiviteleri ilk dönemde artarak yaklaşık 28. günde, peroksidaz (POD) aktivitesi ise yaklaşık 21. günde en yüksek düzeylerine ulaşmış ve daha sonra azalmıştır. Yirmi sekizinci günde kuvvetli hava akımıyla dondurulan örneklerde CAT aktivitesinin 650 U mg^{-1} protein düzeyine kadar çıkması ve 42. günde geleneksel dondurulan örneklerde CAT ile APX aktivitelerinin sırasıyla 132 ve $0,24 \text{ U mg}^{-1}$ protein düzeylerine gerilemesi, muhafaza sırasında antioksidan savunma sistemlerinin de dinamik biçimde değiştiğini göstermektedir (Wang vd., 2023).

Hasat sonrası kayıpların fizyolojik boyutuna mikrobiyolojik bozulma da eşlik etmektedir. Yüksek nem ve şeker miktarı, uygun sıcaklık koşullarında fungal gelişim için elverişli bir ortam oluşturabilmektedir. Xue vd. (2025), tatlı mısır tanelerini *Fusarium graminearum* veya *F. verticillioides* ile inokule ederek 25°C ve %75–85 bağıl nem koşullarında 60 saat boyunca izlemiş ve patojen gelişiminin kalite üzerindeki doğrudan etkisini belirlemiştir. Görsel bozulmanın kritik başlangıç zamanı *F. graminearum* için inokulasyondan 24 saat, *F. verticillioides* için ise 36 saat sonra ortaya çıkmıştır. Her iki patojen de kontrol grubuna göre tane yüzeyinde fungal spor sayısında belirgin artış ve renk koyulaşmasına neden olurken, *F. verticillioides* inokulasyonunda 36. saatte malondialdehit (MDA) içeriğinin anlamlı biçimde yükselmesi membran lipidlerinde oksidatif hasarın arttığına işaret etmiştir (Xue vd., 2025).

Xue vd. (2025)'nin sonuçları, hasat sonrası hastalıkların yalnızca yüzeysel küflenme biçiminde değerlendirilmemesi gerektiğini göstermektedir. Patojen gelişimi; renk, sertlik, çözünür şeker ve protein metabolizması, membran bütünlüğü ve genel tüketim kalitesiyle ilişkili fizyolojik değişimleri de beraberinde getirmektedir. Bununla birlikte bu

çalışmanın deneysel inokulasyon ve 25 °C koşullarında yürütüldüğü göz önünde bulundurulmalıdır. Buradaki 24 ve 36 saatlik kritik bozulma noktaları bütün tatlı mısırların normal ticari depolamadaki sabit bozulma süreleri olarak düşünülmemelidir. Kullanılan patojen türleri, inokulum yoğunluğu, sıcaklık, bağıl nem ve genotipe özgü araştırma sonuçlarıdır. Çalışma ayrıca *Fusarium* türleriyle ilişkili mikotoksin risklerinden literatüre dayanarak söz etmekle birlikte, araştırmada deoksinivalenol, zearalenon veya fumonisin konsantrasyonlarını doğrudan ölçmemiştir. Bu nedenle söz konusu araştırmadan belirli bir mikotoksin düzeyi çıkarımı yapılmamalıdır (Xue vd., 2025).

Hasat sonrası muhafazanın bütüncül biçimde değerlendirilmesi, kalite kaybının birbirinden bağımsız tekil süreçlerden değil, birbiriyle ilişkili fizyolojik, biyokimyasal ve mikrobiyolojik değişimlerden kaynaklandığını göstermektedir. Yüksek sıcaklık solunumu artırarak şeker tüketimini hızlandırırken aynı zamanda su kaybını ve mikrobiyal gelişmeyi desteklemekte; su kaybı tane yapısını ve görünümünü bozmakta; şeker metabolizması tatlılığı azaltmakta; uçucu metabolitlerin değişmesi aroma profilini zayıflatmakta; oksidatif süreçler membran ve hücre bütünlüğünü olumsuz etkileyebilmekte ve patojen gelişimi bu bozulmaları daha ileri düzeye taşıyabilmektedir. Bu nedenle tatlı mısırdaki etkili muhafaza; uygun olgunlukta hasat edilmiş kaliteli başlangıç materyali, hasattan hemen sonra hasat sonrası ürün sıcaklığının hızlı biçimde uzaklaştırılması, kesintisiz düşük sıcaklık zinciri, su kaybının sınırlandırılması, ürüne ve sıcaklığa uygun gaz geçirgenliğine sahip ambalajlama ile mikrobiyal bulaşmanın azaltılmasının birlikte yönetilmesini gerektirmektedir (Becerra-Sanchez ve Taylor, 2021; Zhai vd., 2024; Xue vd., 2025).

Sonuç olarak tatlı mısırın hasat sonrası ömrünün korunmasında sıcaklık yönetimi temel belirleyici, diğer muhafaza uygulamaları ise bu yönetimi tamamlayan unsurlar olarak ortaya çıkmaktadır. Taze pazarlanacak koçanlarda hızlı ön soğutma ve düşük sıcaklığın sürdürülmesi; uygun koşullarda modifiye veya kontrollü atmosferden yararlanılması; daha uzun süreli muhafazada ise hücresel zararı ve şeker kaybını en aza indirecek dondurma teknolojilerinin seçilmesi kalite korunmasını desteklemektedir. Bununla birlikte genotip, başlangıç olgunluğu, ürün formu, ambalaj, sıcaklık ve mikrobiyal yük arasındaki etkileşimler nedeniyle tek bir raf ömrü, tek bir atmosfer bileşimi veya tek bir muhafaza protokolünün bütün tatlı mısırlar için geçerli olduğu kabul edilemez. Muhafaza teknolojilerinin

etkinliđi, hedeflenen pazar süresi ve ürün tipine göre birlikte değerlendirilmelidir.

İşleme teknolojileri ve kullanım alanları

Tatlı mısırın yüksek su içeriđi, yüksek çözünür şeker düzeyi ve karakteristik aroma bileşimi, onu taze tüketim açısından değerli kılar. Aynı zamanda işleme teknolojilerinin seçiminde dikkatli olunmasını gerektirmektedir. İşleme sırasında temel amaç yalnızca ürünün dayanıklılıđını artırmak değil, tatlılık, aroma, renk ve tane yapısı gibi tüketici tarafından doğrudan algılanan kalite özelliklerini mümkün olduğunca korumak veya hedeflenen ürün tipine uygun biçimde dönüştürmektir. Tatlı mısırın doğrudan taze veya pişirilmiş ürün olarak değerlendirilmesinin yanı sıra buharlama, haşlama, kavurma ve dondurma gibi işlemlerden geçirilebildiđini; ayrıca içecek ve içecek tozu gibi katma değerli ürünlere dönüştürülebildiđini ve işleme sonrası ortaya çıkan koçanların işlevsel gıda bileşeni olarak değerlendirilebildiđini göstermektedir (Lau vd., 2022; Zhang vd., 2023; Wang vd., 2023; S. Wu vd., 2025).

Tatlı mısırın işlenmesinde ısı uygulamaları en temel teknolojik yaklaşımlardan biridir. Bununla birlikte ısı işlemin etkisi yalnızca pişirme veya mikrobiyal güvenliđin artırılmasıyla sınırlı olmayıp, ürünün uçucu bileşik profili ve dolayısıyla aromasını da önemli ölçüde değiştirmektedir. Zhang vd. (2023), YT28 tatlı mısır çeşidinde buharlama, haşlama ve kavurma işlemlerini doğrudan karşılaştırmıştır. Çalışmada buharlama 100 °C'de 5, 10 ve 15 dakika; haşlama 100 °C'de 1, 3 ve 5 dakika; kavurma ise 180 °C'de 5, 8 ve 10 dakika uygulanmıştır. Taze örneklerde 27 uçucu bileşik belirlenirken buharlama sonrasında 33, haşlama sonrasında 21 ve kavurma sonrasında 19 uçucu bileşik belirlenmiştir. Bu bulgu, ısı işlemin uçucu bileşiklerin yalnızca miktarını azaltmadıđını, aynı zamanda bazı bileşiklerin kaybolmasına karşılık yeni aroma bileşiklerinin oluşabildiđi karmaşık bir dönüşüm oluşturduđunu göstermektedir (Zhang vd., 2023).

Buharlama uygulaması özellikle taze tatlı mısır aromasının korunması bakımından dikkat çekmektedir. Zhang vd. (2023)'nin ROAV ve çok değişkenli analizlerinde 100 °C'de 5 dakika buharlanan örneđin başlıca aroma profilinin taze örneđe en yakın olduđu belirlenmiştir. Taze örnekte 1-octen-3-ol için ROAV $17,22 \pm 0,87$ iken beş dakikalık buharlamada $22,42 \pm 0,23$ olarak bulunmuş, (E)-2-nonenal her iki grupta da yüksek aroma katkısı göstermiştir. Buna karşılık buharlama süresinin uzamasıyla

aldehitler başta olmak üzere bazı uçucu bileşiklerde önemli azalmalar meydana gelmiştir. Dolayısıyla ısıtma işlem süresi tatlı mısır aromasının yönünü belirleyen önemli bir teknolojik değişken olup, daha uzun işlem süresi her zaman daha yüksek duyu kalite anlamına gelmemektedir (Zhang vd., 2023).

Haşlama ve kavurma da tatlı mısırın aroma yapısını farklı biçimde değiştirmektedir. Haşlama sırasında aldehitlerin, özellikle yeşil ve otsu aromayla ilişkili hexanalın azaldığı, işlem süresi uzadıkça bazı yeni fenolik ve kükürtlü uçucuların oluşabildiği bildirilmiştir. Kavurmada ise yüksek sıcaklığın etkisiyle terpenoidler ve Maillard reaksiyonu ile ilişkili aroma bileşikleri öne çıkmıştır. Isıtma işlemleri sonrasında karakteristik aroma-aktif bileşikler arasında (E)-2-nonenal, 1-okten-3-ol, β -myrcene, dimethyl trisulfide, 1-(4,5-dihidro-2-thiazolyl)-ethanone ve D-limonene belirlenmiştir. Bunların yeşil, mantarimsı, çamsı, soğanimsı, kavrulmuş ve narenciyemsi aroma notaları taşıması, işleme yönteminin nihai ürünün duyu kimliğini belirleyebileceğini göstermektedir (Zhang vd., 2023).

Isıtma işlemlerinin lipid fraksiyonu üzerindeki etkileri de dikkate değerdir. Zhang vd. (2023), buharlama, haşlama ve kavurma sonrasında özellikle oleik ve linolenik asit miktarlarının taze örneğe göre %110–183 oranında daha yüksek ölçüldüğünü bildirmiştir. Araştırmacılar aynı zamanda birçok karakteristik uçucu bileşiğin yağ asitlerinin oksidatif parçalanmasıyla ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, tatlı mısırın işlenmesi sırasında aroma değişimlerinin karbonhidrat ve Maillard reaksiyonlarının yanı sıra lipid metabolizması ve oksidatif reaksiyonlarla da bağlantılı olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte söz konusu artış oranları belirli bir çeşitte ve tanımlanmış laboratuvar işlem koşullarında elde edildiğinden, bütün ticari işleme sistemleri için değişmez bir sonuç olarak değerlendirilmemelidir (Zhang vd., 2023).

Dondurma, tatlı mısırın mevsim dışı tüketimine ve daha uzun süreli kullanımına olanak veren diğer önemli işleme yöntemlerinden biridir. Wang vd. (2023), ultrason destekli dondurma, salamurada dondurma, kuvvetli hava akımıyla dondurma ve geleneksel dondurucu uygulamalarını karşılaştırmış, kullanılan yöntemin renk, tane yapısı, hücresel yapı, çözünür şeker, çözünür kuru madde ve antioksidan enzim aktivitesi üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Araştırmada salamurada ve kuvvetli hava akımıyla dondurma, depolama süresince kalite kaybını sınırlandırma bakımından daha başarılı bulunmuştur.

Özellikle kuvvetli hava akımıyla dondurulan örneklerde 42 gün sonunda çözünür şeker miktarı 16.31 mg g^{-1} iken geleneksel dondurulan örneklerde 7.75 mg g^{-1} 'ye düşmüştür. Benzer biçimde çözünür kuru madde 42. günde sırasıyla %7.2 ve %6.1 olarak belirlenmiştir (Wang vd., 2023).

Dondurma teknolojisi bu nedenle yalnızca bir muhafaza yöntemi değil, tatlı mısırı farklı zamanlarda tüketilebilir bir işlenmiş ürüne dönüştüren bir üretim aşaması olarak da değerlendirilebilir. Bununla birlikte dondurulmuş üründe kaliteyi korumak için buz kristali oluşumu ve hücre yapısının bozulması kontrol edilmelidir. Wang vd. (2023)'nin elektron mikroskobu görüntülerinde depolama süresi ilerledikçe hücre duvarlarında deformasyon, katlanma ve boşlukların arttığı görülmüş, salamurada dondurulan örneklerde hücresel bütünlüğün görece daha iyi korunduğu belirlenmiştir. Bu nedenle endüstriyel dondurulmuş tatlı mısır üretiminde yalnızca düşük sıcaklığın sağlanması değil, dondurma hızının ve yönteminin ürün tane yapısı üzerindeki etkisinin de dikkate alınması gerekmektedir (Wang vd., 2023).

Tatlı mısırın katma değerli kullanım alanlarından biri de bitkisel içecek üretimidir. Süt olum döneminde hasat edilen tanelerin yüksek su, çözünür şeker ve aroma içeriği, tatlı mısırı içecek üretimine uygun bir hammadde hâline getirmektedir. S. Wu vd. (2025), Xu et al. 7401 çeşidini kullanarak çiğ ve buharlanmış tatlı mısır içeceği ile bunlardan elde edilen püskürtmeli kurutulmuş toz ürünleri karşılaştırmıştır. Çalışmadaki üretim akışında taneler suyla 1:2 oranında öğütülmüş ve süzölmüş, buharlanmış gruptaki taneler öğütme öncesinde 15 dakika buharla işlenmiştir. Daha sonra maltodekstrin, silika ve ksantan gam eklenerek homojenizasyon gerçekleştirilmiş ve içecekler püskürtmeli kurutma ile toz forma dönüştürölmüştür. Bu işlem şeması, tatlı mısırın taze taneden içilmeye hazır veya yeniden sulandırılabilir toz ürüne kadar uzanan farklı ürün biçimlerine dönüştürölebileceğini göstermektedir. Ancak çalışmada kullanılan oran ve işlem parametreleri deneysel formölasyona özgüdür ve genel sanayi standardı olarak değeriendirilmemelidir (S. Wu vd., 2025).

Tatlı mısır içeceklerinde işleme yöntemi ürünün aroma karakterini önemli ölçüde değıştirmektedir. S. Wu vd. (2025), farklı işleme gruplarında HS-SPME-GC-MS ile toplam 205 uçucu bileşik belirlemiştir. Çiğ içekte 105 bileşik bulunurken püskürtmeli kurutma 24 başlangıç bileşğinin kaybolmasına ve 36 yeni bileşğın oluşmasına; buharlama ise 49 bileşğın kaybolmasına karşılık 42 yeni bileşğın oluşmasına neden

olmuştur. Buharlama sonucunda alkoller ve bazı ketonlar artarken meyvemsi aromaya katkıda bulunan esterler azalmış, püskürtmeli kurutma da aroma profilini belirgin biçimde yeniden şekillendirmiştir. Bu değişimler, bir içecek üretim prosesinin yalnızca raf ömrü ve fiziksel form bakımından değil, tüketicinin algılayacağı aroma açısından da optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir (S. Wu vd., 2025).

S. Wu vd. (2025)'nin ROAV analizinde GC-MS ile 13, GC-IMS ile sekiz anahtar uçucu bileşik tanımlanmıştır. (E,E)-2,4-decadienal ile 2,3-butanedione bütün örneklerde başlıca aroma katkı sağlayıcıları arasında yer almıştır. Buharlama, 2-octanol, nonanal ve (E)-2-nonenal gibi bileşiklerin göreceli miktarlarını artırarak aroma profilini daha yağlı ve kremsi bir karaktere yöneltirken, meyvemsi aromayı oluşturan esterleri azaltmıştır. Püskürtmeli kurutma ise 2-methylbutanal ve hexanal gibi aldehytlerin ve 2,3-butanedione gibi ketonların etkisini artırarak maltımsı ve tereyağımsı aroma karakterini güçlendirmiştir. Dolayısıyla tatlı mısır içeceklerinde “aromanın korunması” her zaman başlangıç aromasının değişmeden tutulması anlamına gelmemekte, işlem koşullarına bağlı olarak hedeflenen yeni bir aroma profilinin oluşturulması da ürün geliştirme stratejisinin parçası olabilmektedir (S. Wu vd., 2025).

Püskürtmeli kurutma, içeceğin sıvı formdan toz ürüne dönüştürülmesi bakımından ayrıca önem taşımaktadır. Suyun uzaklaştırılması ürünün hacmini ve taşınması gereken su miktarını azaltmakta ve yeniden hazırlanabilir ürün formatının geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak S. Wu vd. (2025)'nin sonuçları, kurutmanın aroma bakımından nötr bir işlem olmadığını açıkça göstermektedir. Özellikle yüksek sıcaklıkta çok kısa süreli kurutma sırasında yeni uçucu bileşiklerin oluşması ve bazı başlangıç bileşiklerinin kaybolması, proses koşullarının aroma kalitesi temelinde ayrıca optimize edilmesini gerektirmektedir. Çalışmanın sonuç bölümünde de püskürtmeli kurutma parametrelerinin gelecekte ayrı ayrı incelenmesinin ürün kalitesini geliştirmek bakımından gerekli olduğu belirtilmiştir (S. Wu vd., 2025).

Tatlı mısırın işleme potansiyeli yalnızca yenilebilir tanelerin değerlendirilmesiyle sınırlı değildir. Gıda sanayisinde tanelerin koçandan ayrılmasından sonra ortaya çıkan koçan materyali, yüksek miktarda lif içeren bir yan ürün oluşturmaktadır. Lau vd. (2022), tatlı mısır koçanını liyofilize edip öğütürerek un hâline getirmiş ve bu unu glutensiz pirinç unlu muffinlerde katma değerli bileşen olarak değerlendirmiştir. Koçan ununun

ferulik asit miktarı 6.02 mg g⁻¹ olarak belirlenmiş, pirinç ununun %10, %20 ve %30'u koçan unu ile ikame edilmiştir. Tatlı mısır koçanı unu, pirinç unundan belirgin biçimde daha yüksek su ve yağ tutma kapasitesi göstermiş, bu özelliklerin ürün formülasyonu ve tane yapısı üzerinde etkili olabileceği ortaya konulmuştur (Lau vd., 2022).

Koçan unu ilavesinin unlu mamullerin yapısı üzerindeki etkisi kullanılan düzeye bağlı olmuştur. Kontrol keklerinde lif miktarı 0.13 g 100 g⁻¹ iken, %10, %20 ve %30 koçan unu içeren ürünlerde sırasıyla 1.83, 3.52 ve 5.22 g 100 g⁻¹'ye yükselmiştir. %10 ve %20 ikame düzeylerinde kek sertliği kontrol örneğinden daha düşük bulunurken, %30 koçan unu kullanımı daha yoğun yapı ve daha yüksek sertlikle sonuçlanmıştır. Özellikle %20 düzeyinde ürün yüksekliği ve kırıntıdaki hava hücresi sayısı artmış ve daha yumuşak bir yapı elde edilmiştir. Buna göre bir işleme yan ürününün işlevsel bileşene dönüştürülmesi mümkün olmakla birlikte, ilave miktarı arttıkça teknolojik ve duyuşal özelliklerin doğrusal olarak iyileşmediği görülmektedir (Lau vd., 2022).

Piştirme işlemi koçan unundan gelen fenolik bileşiklerin miktarını da değiştirmiştir. Özellikle %20 ve %30 koçan unu içeren keklerde piştirme sonrasında toplam ferulik asitte belirli kayıplar meydana gelmesine rağmen ürün başına sırasıyla 20.15 ve 23.58 mg ferulik asit bulunmuş, kontrol kekinde bu değer yalnızca 1.76 mg olmuştur. Bunun yanında tüketici kabulü bakımından da olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Toplam 121 tüketicinin katıldığı duyuşal değerlendirmede koçan unu içeren kekler kontrol ürününden daha yüksek genel beğeni puanı almış, %10 koçan unu içeren formülasyon aroma, tat, tane yapısı, ağızda kalan tat ve genel kabul bakımından en yüksek puanları vermiştir. Ancak koçan unu oranı yükseldikçe özellikle tane yapısı beğenisi azalmıştır. Bu bulgu, gıda yan ürünlerinin yeniden değerlendirilmesinde besin öğelerince zenginleştirme ile teknolojik performans ve tüketici kabulünün birlikte optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir (Lau vd., 2022).

Koçanın bu şekilde değerlendirilmesi, tatlı mısır işleme zincirinde yan ürünlerin katma değerli gıda bileşenlerine dönüştürülmesi bakımından önemli bir örnek oluşturmaktadır. Lau vd. (2022), elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda tatlı mısır koçanının alternatif glutensiz un, işlevsel gıda bileşeni ve potansiyel nutrasötik hammadde olarak değerlendirilebileceğini belirtmiştir. Bununla birlikte koçanın yüksek lif içeriği öğütme işlemini güçleştirmekte ve yüksek ikame düzeylerinde

yapısal sorunlar oluşturabilmektedir. Bu nedenle yan ürün değerlendirmesinde yalnızca kimyasal bileşimin değil, partikül boyutu, su ve yağ tutma kapasitesi, formülasyondaki kullanım oranı ve nihai ürün tane yapısının birlikte ele alınması gerekmektedir (Lau vd., 2022).

Tatlı mısırın kullanım alanları başlıca üç ürün grubu altında toplanmaktadır. Birincisi, taze tane veya koçanın buharlama, haşlama ve kavurma gibi ısıt işlemlerle doğrudan tüketime hazırlanmasıdır. İkincisi, ürünün dondurma veya kurutma gibi teknolojilerle daha uzun süreli ve farklı ürün formatlarında değerlendirilmesidir. Üçüncüsü ise tanenin içecek ve içecek tozu gibi katma değerli ürünlere dönüştürülmesi ile koçan gibi işleme yan ürünlerinin işlevsel gıda bileşeni olarak yeniden kullanılmasıdır. Bu ürün zincirlerinin ortak özelliği, işleme koşullarının aroma, tane yapısı, şeker içeriği, renk ve işlevsel bileşenler üzerinde belirgin etkiler oluşturmalarıdır. Bu nedenle tatlı mısır teknolojisinde tek bir “en iyi işleme yöntemi”nden söz etmek yerine, hedeflenen ürün tipi ve korunması istenen kalite özelliğine göre proses optimizasyonunun yapılması daha bilimsel bir yaklaşımdır (Lau vd., 2022; Zhang vd., 2023; Wang vd., 2023; S. Wu vd., 2025).

Sonuç olarak tatlı mısır, yalnızca taze tüketilen bir sebze olarak değil, farklı ısıt işlemlere uygulanabilen, dondurulmuş ürünlere, sıvı ve toz içeceklere dönüştürülebilen ve işleme yan ürünleri yeniden değerlendirilebilen çok yönlü bir gıda hammaddesidir. İşleme teknolojilerinin ürüne kazandırdığı raf ömrü ve kullanım kolaylığı, aroma ve tane yapısı gibi duyuşal özelliklerde meydana gelebilecek değişimlerle birlikte değerlendirilmelidir. Özellikle buharlama süresinin taze aromaya yakınlığın korunmasında, dondurma yönteminin hücresel yapı ve şeker kaybının sınırlandırılmasında, püskürtmeli kurutmanın içecek aromasının şekillendirilmesinde ve koçan ununun kullanım oranının unlu mamullerde tane yapısı ile tüketici kabulünde belirleyici olduğu görülmektedir. Gelecekte tatlı mısır işleme teknolojilerinin geliştirilmesinde enerji ve proses verimliliğinin yanı sıra aroma koruma, besin bileşenlerinin sürdürülebilirliği, yan ürünlerin değerlendirilmesi ve tüketici kabulünün aynı optimizasyon sistemi içerisinde ele alınması önemli olacaktır.

Islah yaklaşımları ve gelecek beklentileri

Tatlı mısır ıslahı, başlangıçta büyük ölçüde endospermde karbonhidrat metabolizmasını değiştiren genlerin kullanılması ve buna bağlı olarak yüksek tatlılık, uygun tane yapısı ve tüketim kalitesinin geliştirilmesi

üzerinde yoğunlaşmış olmakla birlikte, günümüzde çok daha kapsamlı bir hedef yapısına ulaşmıştır. Günümüz tatlı mısır çeşitlerinde yalnızca yüksek şeker içeriğinin bulunması yeterli görülmemekte; yüksek ve sürdürülebilir koçan verimi, homojenlik, ince perikarp, uygun aroma ve tane yapısı, güçlü çimlenme ve tarla çıkışı, sıcaklık ve su streslerine dayanıklılık, besin öğelerince zenginlik, uygun hasat periyodu ve farklı pazar taleplerine cevap verebilen ürün özelliklerinin aynı genetik materyalde bir araya getirilmesi amaçlanmaktadır. Bu durum tatlı mısır ıslahını tek veya birkaç majör endosperm geninin yönetiminden, çok sayıda kantitatif ve kalite özelliğinin eş zamanlı olarak değerlendirildiği çok özellikli bir ıslah problemine dönüştürmüştür. Güncel çalışmalar; klasik melezleme ve heterosis kullanımını çift haploid teknolojisi, markör destekli seleksiyon, genom çapında ilişkilendirme analizleri, transkriptomik ve metabolomik yaklaşımlar ve hedefli genom düzenleme teknolojileriyle bütünleştirmeye yönelmektedir (Lucena vd., 2025; Ashraf vd., 2026; Zhang vd., 2026).

Bu süreçte genetik çeşitliliğin korunması ve genişletilmesi temel önem taşımaktadır. Islah programlarında uzun süre benzer üstün materyallerin ebeveyn olarak kullanılması, belirli kalite özelliklerinin sabitletmesini kolaylaştırırken genetik tabanın daralması riskini de beraberinde getirebilir. Lv vd. (2022), 52 tatlı mısır kendilenmiş hattını 40 SSR belirteciyle değerlendirmiş, toplam 226 allel belirlemiş ve markör başına ortalama 5.7 allel saptamıştır. Buna karşılık kümeleme analizinde 52 hattın 35'inin, yani %67.31'inin aynı ana grup içerisinde yer alması, incelenen elit materyallerin önemli bir bölümünün benzer genetik yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Bu sonuç bütün tatlı mısır gen havuzunun dar olduğu anlamına gelmemekle birlikte, belirli ıslah programlarında genetik tabanı genişletmenin gerekliliğine işaret etmektedir. Nitekim Du vd. (2026), elit tatlı mısır hatlarının genetik yapısını inceleyen çalışmalarında tropikal ve ılıman kökenli alt popülasyonlar arasındaki melezlemelerin yeni allelik kombinasyonlar oluşturmak ve dar genetik çeşitliliği genişletmek amacıyla değerlendirilebileceğini belirtmiştir (Lv vd., 2022; Du vd., 2026).

Tatlı mısıra özgü yüksek kaliteli referans genomların geliştirilmesi, genetik çeşitliliğin ve seleksiyonun genom ölçeğinde değerlendirilmesine önemli katkı sağlamıştır. Hu vd. (2021), Ia453-sh2 hattı için 2,29 Gb büyüklüğünde bir referans genom oluşturmuş; 10 psödokromozom toplam montajın %92'sini ve tahmini genom büyüklüğünün %99'unu kapsamıştır. Mısır genomlarıyla yapılan karşılaştırmalar tatlı mısırdaki SNP, yapısal varyasyon ve transpozon bileşimi bakımından belirgin farklılıklar

bulunduğunu göstermiş; populasyon genomik analizleri ise erken çiçeklenme, endosperm bileşimi, bitki ve püskül yapısı ile tane sıra sayısı gibi tatlı mısırın temel ıslah hedefleriyle ilişkili seçim bölgeleri ve aday genler ortaya koymuştur. Bu kaynak, klasik fenotipik seleksiyonun tatlı mısıra özgü genomik bilgilerle bütünleştirilmesi ve gelecekte markör destekli ya da genomik seleksiyon yaklaşımlarının geliştirilmesi açısından önemli bir altyapı oluşturmaktadır (Hu vd., 2021).

Klasik melez ıslahı, tatlı mısırdaki gelecekte de önemini koruyacak olmakla birlikte, üstün homozigot ebeveynlerin daha etkin biçimde oluşturulması ve kombinasyon yeteneklerinin belirlenmesi ıslah verimliliğini artırabilecek başlıca alanlardan biridir. Katlanmış haploid (DH) teknolojisi bu bakımdan dikkat çekmektedir. Lucena vd. (2025), dört süper tatlı mısır popülasyonundan geliştirilen DH hatlarıyla oluşturulan 29 melez kombinasyonunu altı kontrol çeşidiyle iki üretim sezonunda karşılaştırmıştır. Araştırmada diallel melezlerin %38'inin ticari kontrollerden üstün performans göstermesi, DH materyalinin doğrudan üstün çeşit anlamına gelmediğini, ancak değerli ebeveynlerin ve heterotik kombinasyonların belirlenmesi için önemli bir kaynak oluşturabileceğini göstermiştir. Araştırmada L1 ve L5 hatlarının verim özellikleri bakımından yüksek genel kombinasyon yeteneğine sahip olduğu ve yeni tester (test edici) hatları olarak değerlendirilebileceği belirlenirken, incelenen birçok karakterde hem eklemeli hem de eklemeli olmayan genetik etkilerin önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Dolayısıyla gelecekte DH teknolojisinin en önemli katkısının yalnızca homozigot hat üretimini hızlandırmak değil, bu hatların genel ve özel kombinasyon yetenekleriyle birlikte değerlendirilerek daha etkin heterotik gruplar ve üstün melez kombinasyonları oluşturulmasına olanak sağlaması beklenmektedir (Lucena vd., 2025).

Aynı çalışma, tatlı mısır ıslahında tek özellik üzerinden seleksiyonun taşıdığı sınırlılıkları da göstermektedir. Lucena vd. (2025)'nde koçan ve tane verimi özellikleri arasında güçlü pozitif ilişkiler bulunurken, BRIX ile verim özellikleri arasındaki korelasyonların ilgili materyal ve çevre koşullarında yaklaşık -0.49 ile -0.50 arasında olması, tatlılık göstergeleri ile yüksek verimin her zaman paralel yönde değişmeyebileceğine işaret etmiştir. Bu ilişkinin bütün tatlı mısır genotiplerine genellenmesi mümkün değildir, ancak sonuç, gelecekteki ıslah programlarının yalnızca “en tatlı” veya “en yüksek verimli” materyali seçmek yerine, verim ve tüketim kalitesinin birlikte değerlendirildiği çok özellikli seleksiyon sistemleri

geliştirmesinin önemini ortaya koymaktadır. Özellikle taze tüketim ile konserve ve dondurulmuş ürün pazarlarının kalite ölçütlerinin farklılaşabilmesi, genotiplerin kullanım amacına göre ayrı seleksiyon indeksleri içerisinde değerlendirilmesini gereklidir (Lucena vd., 2025).

Genomik teknolojilerin gelişmesi, bu karmaşık seleksiyon problemlerinin genetik temelini daha ayrıntılı biçimde çözümleme olanağı sağlamaktadır. Du vd. (2026), 101 elit tatlı mısır hattında 30.597 yüksek kaliteli SNP belirteci kullanarak 11 agronomik ve verim karakterini analiz etmiş ve yedi özellik için toplam 16 önemli markör-özellik ilişkisi belirlemiştir. Tek tek lokusların açıkladığı fenotipik varyasyon yaklaşık %8.0–16.3 arasında değişmiş, bunlardan beşi iki yetiştirme sezonunda da kararlı olarak belirlenmiştir. Ayrıca tatlı mısır genetik materyaline özgü olduğu bildirilen SNP25518 dahil olmak üzere tane sıra sayısı, sıradaki tane sayısı ve koçan üzerindeki yaprak sayısı ile ilişkili kararlı lokuslar tanımlanmıştır. Önemli SNP'lerin çevresindeki genomik bölgelerde hormon sinyalleme, karbon ve azot metabolizması, hücre bölünmesi ve bitki gelişimi ile ilişkili 236 aday gen belirlenmiştir. Bu sonuçlar, agronomik özellikler bakımından erken seleksiyonda kullanılabilecek markörlerin geliştirilmesi için değerli olmakla birlikte, GWAS ile belirlenen ilişkinin tek başına genin nedensel işlevini kanıtlamadığı unutulmamalıdır. Nitekim araştırmacılar da ince haritalama, aday genlerin işlevsel doğrulanması ve kararlı lokusların genomik tahmin modellerine dahil edilmesini sonraki araştırmalar için önermiştir (Du vd., 2026).

Genomik seleksiyon açısından en önemli gelişme alanlarından biri doğrudan yeme kalitesini belirleyen özelliklerin genetik yapısının açıklanmasıdır. Ashraf vd. (2026), 240 tatlı mısır kendilenmiş hattını iki yıl süreyle değerlendirerek 60K SNP dizisiyle perikarp kalınlığı ve çözünür şeker bileşenlerinin genetik yapısını incelemiştir. Çalışmada 174 önemli lokus belirlenmiş ve bunların 84'ü her iki yetiştirme sezonunda da saptanmıştır. Aday bölgelerde selüloz sentaz, pektin metilesteraz, peroksidaz, sakkaroz sentaz, sakkaroz fosfat sentaz ve SWEET taşıyıcıları gibi hücre duvarı oluşumu ve şeker metabolizması ile ilişkili gen ailelerinin bulunması, tüketicinin doğrudan algıladığı gevreklik-sertlik ve tatlılık özelliklerinin genomik seleksiyona aktarılabilceğini göstermektedir. Araştırmada 12 temsilci aday genin zıt fenotipli hatlardaki ifade düzeyi farklılıklarının fenotipik değişimle uyum göstermesi de bu adayların önemini desteklemiştir. Böylece gelecekte yalnızca toplam şeker konsantrasyonunun değil, perikarp yapısı ile şeker bileşiminin birlikte

genomik olarak izlenmesi, yeme kalitesi yüksek genotiplerin daha erken kuşaklarda belirlenmesine katkı sağlayabilir (Ashraf vd., 2026).

Bununla birlikte karmaşık kalite özelliklerinin açıklanmasında DNA düzeyindeki ilişkilendirme çalışmalarının transkriptom, küçük RNA ve metabolit verileriyle desteklenmesi giderek daha önemli hâle gelmektedir. X. Wu vd. (2025), ince ve kalın perikarplı iki tatlı mısır hattını karşılaştırarak perikarp kalınlığı farklılığının büyük ölçüde hücre tabakası sayısındaki değişimden kaynaklandığını göstermiş, 6.054 farklı ifade edilen gen, 73 farklı ifade edilen miRNA ve 113 farklı biriken metabolit belirlemiştir. zma-miR164, zma-miR166, zma-miR827 ve zma-miR171b gibi miRNA'lar ile bitki hormon sinyal iletimi ve fenilpropanoid biyosenteziyle ilişkili ağların perikarp gelişiminde öne çıkması, tek bir aday gen yerine düzenleyici ağların incelenmesi gerektiğini göstermektedir. Ancak çalışma yalnızca iki uç fenotipli hat üzerinde gerçekleştirilmiş ve yazarlar belirlenen ilişkilerin daha geniş genetik materyalde ve işlevsel çalışmalarla doğrulanması gerektiğini açıkça belirtmiştir. Bu nedenle çoklu omik yaklaşımlar gelecekte aday gen havuzunu daraltmak ve biyolojik mekanizmayı anlamak için güçlü araçlar olmakla birlikte, korelasyon temelli sonuçların doğrudan ıslah belirtecine dönüştürülmeden önce doğrulanması gerekmektedir (X. Wu vd., 2025).

Tatlı mısır ıslahında kalite artışının, tohum gücü ile çıkış ve erken fide gelişimindeki azalma pahasına sağlanmaması da temel hedeflerden biridir. Özellikle *sh2* temelli süper tatlı mısırlarda endospermde nişasta birikiminin azalması ve olgun tohumların buruşuk yapısı, tohum gücünü önemli bir seleksiyon karakteri hâline getirmektedir. Cui vd. (2026), 201 süper tatlı mısır kendilenmiş hattını 56K SNP paneliyle incelemiş ve BLINK, FarmCPU ve MLM modellerinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda fide çıkış hızıyla ilişkili sekiz, fide uzunluğuyla ilişkili iki ortak SNP belirlemiştir. İşlevsel değerlendirme sonucunda 49 açıklanmış gen arasından 15 aday gen öne çıkarılmış, bunların protein biyosentezi, enerji dönüşümü ve hücre bölünmesi gibi süreçlerde rol oynadığı bildirilmiştir. Çıkış hızı bakımından avantajlı A/A ve T/T allelik sınıflarının belirlenmesi, elverişli allellerin melezleme ve markör destekli seleksiyon yoluyla piramitlenmesinin süper tatlı mısırdaki hızlı ve homojen tarla çıkışının geliştirilmesinde gelecekte kullanılabilecek bir yaklaşım olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte bu allellerin farklı genetik yapı ve çevrelerdeki etkilerinin de araştırılması gerekmektedir (Cui vd., 2026).

Düşük sıcaklık koşullarında yüksek çimlenme ve güçlü çıkış yeteneği, özellikle erken ekime uygun genotiplerin geliştirilmesi açısından önemli bir ıslah hedefidir. Wu vd. (2024)'nin 100 tatlı mısır kendilenmiş hattını değerlendirdiği çalışmada, 10 °C'de 21. gün sonunda yalnızca 14 hattın %50'nin üzerinde çimlenmeye ulaşması, buna karşılık 37 hattın hiç çimlenmemesi materyaller arasında geniş bir genetik farklılık bulunduğunu göstermiştir. Normal sıcaklıkta yüksek çimlenme gösteren bazı hatların 10 °C'de tamamen başarısız olması, standart sıcaklıktaki tohum gücünün düşük sıcaklık performansını tek başına öngöremediğini de ortaya koymuştur. GWAS sonucunda 16 önemli SNP ve bunların bağlantı dengesizliği bölgelerinde 46 aday gen belirlenmiştir. Bu nedenle soğuğa toleranslı çimlenme, genel tohum kalitesinden ayrı bir seleksiyon hedefi olarak değerlendirilmekte ve düşük sıcaklık fenotiplemesinin genomik markörlerle birlikte kullanılması, erken ekime uygun tatlı mısır genotiplerinin geliştirilmesi açısından önemli bir gelecek alanı oluşturmaktadır (Wu vd., 2024).

İklim değişkenliğinin artmasıyla birlikte tatlı mısır ıslahında hedefler, yüksek kalite ve verimin yanı sıra değişken çevre koşullarına uyum ve stres toleransını da kapsayacak biçimde genişlemektedir. Yang vd. (2024), 376 tatlı mısır kendilenmiş hattını ilkbahar ve yüksek sıcaklığın etkili olduğu yaz yetiştirme dönemlerinde değerlendirmiş; yaz döneminde bitki boyu, koçan yüksekliği ve tepe püskülündeki birinci dereceden yan dal sayısının sırasıyla %24.0, %36.3 ve %19.8 azaldığını, çiçektozu yaymaya kadar geçen sürenin ise ortalama %21.6 kısaldığını belirlemiştir. GWAS sonucunda 10 kromozoma dağılmış 85 önemli SNP saptanmış ve altı aday genin Hsf/Hsp aracılı yüksek sıcaklık yanıtlarıyla ilişkili olabileceği bildirilmiştir. Özellikle tane bağlama oranının yüksek sıcaklığa karşı duyarlı bulunması, gelecekteki ıslah programlarında yalnızca vejetatif gelişme dönemindeki sıcaklık toleransının değil, generatif gelişme ve tane bağlama başarısının da doğrudan değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Belirlenen SNP'ler ve aday genler, yüksek sıcaklığa tolerans ıslahı açısından önemli genetik kaynaklar oluşturmakla birlikte, farklı genetik materyal ve çevre koşullarında doğrulanmadan genel geçer markörler olarak değerlendirilmemelidir (Yang vd., 2024).

Benzer biçimde su baskını toleransı için genomik ve metabolomik verilerin birlikte kullanılması yeni seleksiyon olanakları sağlamaktadır. Li vd. (2025), 185 süper tatlı mısır kendilenmiş hattını kullanarak su baskını koşullarında transkriptom, metabolom ve GWAS verilerini bütünleştirmiş,

stres altında fide büyümesinin %21–35 azaldığını, 295 farklı ifade edilen gen ve 75 farklı biriken metabolit bulunduğunu belirlemiştir. GWAS sonucunda gliserol metabolizmasıyla ilişkili pleiotropik *Zmhpc1* lokusu belirlenmiş, ayrıca azot asimilasyonu ile ilişkili *Zmgln2* stres yanıtında öne çıkmıştır. Araştırma, stres toleransının tek bir metabolitin miktarının değiştirilmesinden çok genetik düzenleme, membran metabolizması, azot kullanımı ve anaerobik metabolizma arasındaki bütünleşik yanıtlarla ilişkili olduğunu göstermektedir. Araştırmacıların *Zmhpc1* ve *Zmgln2* gibi genleri gelecekte genom düzenleme hedefleri, metabolitleri ise erken seleksiyon göstergeleri olarak önermeleri önemli bir perspektif sunmakla birlikte, bunların henüz farklı tarla koşullarında doğrulanmış standart ıslah uygulamaları olmadığı dikkate alınmalıdır (Li vd., 2025).

Tatlı mısırın gelecekteki ıslahında bir diğer önemli yön besin öğelerince zenginleştirme, diğer bir ifadeyle tüketim kalitesi korunurken besin ögesi yoğunluğunun genetik olarak artırılmasıdır. Saha vd. (2022), provitamin A açısından elverişli *crtRB1* allelini SC11-2 tatlı mısır kendilenmiş hattına markör destekli geri melezleme yoluyla aktarmıştır. BC₂F₃ kuşağında tekrar eden ebeveyn genomunun %94–96'sı geri kazanılmış; geliştirilen hatlarda β -karoten miktarı 9.878–10.645 $\mu\text{g g}^{-1}$ iken tekrar eden SC11-2 ebeveyninde 0,989 $\mu\text{g g}^{-1}$ bulunmuştur. Geliştirilmiş hatların toplam şeker içeriği %18.00–19.65 aralığında kalmış ve tekrar eden ebeveynde bu değer %20.40 olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, belirli bir besin değeriyle ilişkili özelliğin tatlı mısırın temel şeker profilini büyük ölçüde koruyarak mevcut elit genetik yapıya aktarılabilceğini göstermesi bakımından önemlidir. Bununla birlikte bu veriler doğrudan insanlarda vitamin A durumunun iyileştiğini göstermemekte; yalnızca β -karoten yoğunluğu artırılmış ıslah materyalinin geliştirilebildiğini ortaya koymaktadır (Saha vd., 2022).

Benzer bir moleküler ıslah yaklaşımı vitamin E ve folat bakımından da uygulanmıştır. Lv vd. (2022), 52 tatlı mısır hattını *ZmVTE4* ile ilişkili InDel7 ve InDel118 markörleri ile *ZmCTM* lokusundaki SNP682 bakımından taramış, yalnızca altı hatta (%11,54) vitamin E ile ilişkili elverişli allel, dokuz hatta (%17.31) folatla ilişkili G alleli ve üç hatta (%5.77) her iki elverişli allelin birlikte bulunduğunu belirlemiştir. Bu durum, mevcut elit materyalde nadir bulunan besin değeriyle ilişkili allellerin markörler aracılığıyla belirlenerek ebeveyn seçiminde kullanılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte aynı çalışmada α -tokoferol konsantrasyonunun yalnızca ilgili *ZmVTE4* markör durumuna göre tahmin edilemediği ve farklı melez genetik yapıların biyokimyasal

fenotipi etkilediği görülmüştür. Dolayısıyla gelecekte besin kalitesi ıslahında markör genotipi ile doğrudan biyokimyasal fenotiplemenin birlikte kullanılması, yalnızca elverişli allelin varlığına dayalı seçimden daha güvenilir olacaktır (Lv vd., 2022).

Besin öğelerince zenginleştirmenin daha geniş bir boyutu, farklı pigment ve işlevsel bileşiklerin tatlı mısır genetik yapısına kazandırılmasıdır. Niyorukundo vd. (2026), farklı tane renklerine sahip at dişi (dent), sert (flint) ve cin mısırı (popcorn) genetik materyallerini sekiz tatlı mısır kendilenmiş hattıyla melezlemiş ve beş kendileme kuşağı boyunca tane rengi, tatlılık, lezzet ve tane yapısı bakımından seleksiyon yapmıştır. Bu süreç sonucunda sarı-turuncu, mor, mavi ve kırmızı tane renklerine sahip dokuz renkli tatlı mısır kendilenmiş hattı geliştirilmiş ve bu hatlardan 20 melez kombinasyon oluşturulmuştur. Renkli materyallerde tatlılık ve tane hassasiyeti ebeveyn tatlı mısırlarla karşılaştırılabilir düzeyde tutulurken, bazı genotiplerde karotenoid ve flavonoid profilleri artırılabilmiştir. Araştırmada 23 flavonoid ve fenolik asit profilleri ve dokuz flavonoid bileşiğinin renkli hatlarda ebeveyn tatlı mısırlara göre sürekli olarak daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte araştırmacılar çalışmalarını açık biçimde bir ön kanıt (proof-of-concept) olarak tanımlamış ve seçilen üstün genotiplerin çok lokasyonlu tarla denemeleriyle araştırılması gerektiğini belirtmiştir. Bu nedenle renkli ve işlevsel tatlı mısırların farklılaşmış pazarlar için önemli potansiyel taşıdığı söylenebilmekle birlikte, henüz geniş adaptasyonlu ticari çeşit performansının kanıtlandığı sonucuna varılmaz (Niyorukundo vd., 2026).

Tatlı mısır ıslahında en dikkat çekici yeni gelişmelerden biri, mevcut doğal allellerin aktarılmasını beklemek yerine hedeflenen endosperm genlerinin doğrudan düzenlenebilmesidir. Zhang vd. (2026), CRISPR/Cas9 sitozin baz düzenleme sistemiyle *Sh2* ve *Su1* genlerini eş zamanlı hedefleyerek yeni *sh2i-sul* tatlı mısır genetik materyali geliştirmiştir. *T₀* bitkilerinde *Sh2* ve/veya *Su1* mutasyonu taşıyan dokuz birey belirlenmiş ve mutasyon görülme oranı %47.4 olarak bildirilmiştir. Homozigot *sh2i-sul-2* materyalinde tozlanmadan 20 gün sonra *Sh2* transkript düzeyi mutasyon taşımayan kontrol genotipinin yalnızca %11.1'i düzeyinde kalırken, sakkaroz miktarı yaklaşık olarak mutasyon taşımayan kontrol genotipinin beş ve *sul* mutantının iki katına ulaşmış, buna karşılık suda çözünür polisakkaritlerin tamamen kaybolmadığı belirlenmiştir. Ayrıca tozlanmadan 30 gün sonraki *sh2i-sul-2* tanelerinin sakkaroz düzeyinin *sul-1* materyalinin 20. gündeki düzeyine yakın kalması,

incelenen genetik yapıda yüksek şeker düzeyinin korunabildiği uygun hasat süresinin uzatılabilmesi açısından dikkate değer bulunmuştur. Araştırmacılar transgen içermeyen homozigot mutantları da izole etmiş ve test edilen öngörölmüş hedef dışı bölgelerde mutasyon saptamamıştır (Zhang vd., 2026).

Bu çalışma, genom düzenlemenin tatlı mısırdaki yalnızca bir geni tamamen işlevsiz hâle getiren bir yaklaşımın ötesine geçerek daha hassas bir ıslah aracı olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Özellikle tatlı mısırdaki uzun süredir önem taşıyan yüksek şeker içeriği, uygun aroma ve tane yapısı, tohum kalitesi ile uygun hasat döneminin birlikte sağlanmasına yönelik dengenin, farklı endosperm allellerinin kontrollü kombinasyonlarıyla yeniden düzenlenebilmesi mümkündür. Bununla birlikte Zhang vd. (2026)'nin sonuçları belirli bir Jing 724 genetik yapısında gerçekleştirilen hedefli bir düzenleme çalışmasına dayanmaktadır. Dolayısıyla *sh2i-sul* kombinasyonunun bütün genotiplerde aynı kalite, tarla performansı veya hasat avantajını sağlayacağı kabul edilmemelidir. Genom düzenleme ile elde edilen materyallerin farklı genetik yapılarda, çevrelerde ve hedef kalite ölçütlerinde ayrıntılı fenotiplenmesi gerekmektedir. Bu bakımdan genom düzenleme, klasik melezleme ve fenotipik seleksiyonun yerine geçen bir yöntemden çok, doğrulanmış gen ve allellerin daha kontrollü biçimde kullanılmasını sağlayan tamamlayıcı bir teknoloji olarak değerlendirilmelidir (Zhang vd., 2026).

Gelecekte tatlı mısır ıslahının önemli bir bileşeni, stres toleransı ile yüksek kaliteyi aynı genotipte birleştirmek olacaktır. Mevcut çalışmalar düşük sıcaklıkta çimlenme, yüksek sıcaklıkta üreme başarısı ve su baskını toleransının her birinin önemli genetik varyasyon içerdiğini ve farklı aday genlerle ilişkili olduğunu göstermektedir. Wu vd. (2024)'nin düşük sıcaklık çimlenme lokusları, Yang vd. (2024)'nin sıcaklık toleransı ile ilişkili SNP ve Hsf/Hsp adayları ile Li vd. (2025)'nin su baskınına ilişkin *Zmhpc1* ve *Zmgl2* adayları birlikte değerlendirildiğinde, tek bir “stres toleransı geni” yaklaşımından çok, farklı gelişme dönemlerine ve çevresel streslere özgü allellerin bir araya getirildiği çoklu stres ıslahının gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu noktada temel sorun yalnızca elverişli allellerin belirlenmesi değil, bunların yüksek şeker, ince perikarp, uygun aroma, tohum gücüne ve yüksek verime olumsuz pleiotropik etkiler oluşturmada birleştirilmesidir. Bu nedenle gelecek programlarında moleküler

seleksiyonun çok çevreli fenotiplemeyle sürekli doğrulanması kritik olacaktır (Wu vd., 2024; Yang vd., 2024; Li vd., 2025).

Stres toleransının değerlendirilmesinde yalnızca stres koşullarındaki mutlak performans değil, genotiplerin dışarıdan uygulanan fizyolojik düzenleyicilere verdikleri farklı tepkiler de yararlı bilgiler sağlayabilir. Hidroponik PEG koşullarında spermine uygulamasına verilen büyüme, fotosentetik ve antioksidatif yanıtların Dessert, Messenger, Tyson ve Royalty arasında farklılaşması (Zargar vd., 2025b) ile asetik asit etkisinin Messenger, Tyson ve GSS 8529'da doz ve genotipe bağlı olarak hem yararlı hem de olumsuz sonuçlar oluşturabilmesi (Zargar vd., 2025a), stres toleransının genotip $\times$ uygulama $\times$ stres düzeyi interaksiyonları üzerinden değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bununla birlikte bu kontrollü ortam sonuçları doğrudan seleksiyon protokolü olarak kullanılmadan önce tarla koşullarında doğrulanmalıdır.

Genom çapında yüksek yoğunluklu markör verilerinin artması, markör destekli seleksiyonun yanında genomik tahmin yaklaşımlarını da önemli hâle getirmektedir. Tek veya birkaç büyük etkili lokusun bulunduğu özelliklerde markör destekli seleksiyon etkili olabilirken, verim, adaptasyon, perikarp özellikleri ve çevresel stres toleransı gibi çok sayıda küçük ve orta etkili gen tarafından kontrol edilen karakterlerin yalnızca birkaç markörler açıklanması güçtür. Ashraf vd. (2026)'nin iki yetiştirme sezonunda kararlı kalite lokusları, Du vd. (2026)'nin farklı agronomik özellikler için belirlediği kararlı MTAlar ve bunların genomik tahmin modellerine aktarılması yönündeki önerileri, gelecekte tatlı mısır ıslahında genom çapındaki bilgilerin seleksiyon kararlarında daha fazla kullanılabileceğini göstermektedir. Böyle bir sistemde fenotipik verilerden vazgeçilmesi değil, yüksek kaliteli ve çok çevreli fenotipik verilerin genomik bilgiyle bütünleştirilerek henüz tüm hedef özellikleri doğrudan ölçülmemiş bireylerin ıslah değerlerinin daha erken tahmin edilmesi amaçlanmaktadır (Ashraf vd., 2026; Du vd., 2026).

Bu çerçevede geleceğin tatlı mısır ıslah programının birbirinden bağımsız teknolojilerden değil, birbirini tamamlayan aşamalardan oluşması beklenmektedir. Geniş genetik tabana sahip genetik kaynakların karakterizasyonu uygun ebeveynleri sağlayacak; DH teknolojisi homozigot materyal üretimini destekleyecek; kontrollü melezleme ve kombinasyon yeteneği analizleri heterotik grupları ve üstün melezleri belirleyecek; GWAS ve diğer genomik analizler önemli lokusları ortaya

ıkaracak; markr destekli ve genomik seleksiyon elveriřli allellerin aktarımını hızlandıracak; transkriptomik, miRNA ve metabolomik analizler karmařık fenotiplerin biyolojik mekanizmalarını aıklayacak; iřlevsel doėrulamadan geen hedeflerin ise gerektiėinde genom dzenleme yoluyla hassas biimde deėiřtirilmesi mmkn olacaktır. Ancak bu srecin merkezinde yine ok evreli fenotipleme bulunmalıdır. nk bir SNP–zellik iliřkisi, aday gen veya metabolik markr ancak farklı genetik yapılar da ve retim evrelerinde tekrarlanabilir bir fenotipik avantaj oluřturduėu lde uygulamalı ıřlah aısından deėer tařımaktadır (Du vd., 2026; X. Wu vd., 2025; Niyorukundo vd., 2026).

Sonuç olarak tatlı mısıır ıřlahının geleceėi, “daha fazla řeker” hedefinden yksek verim + yksek duyusal kalite + gl tohum ve fide performansı + yksek besin deėeri + evresel dayanıklılık + geniř adaptasyon bileřimini saėlayabilen genotiplerin geliřtirilmesine doėru ilerlemektedir. Mevcut arařtırmalar bu hedeflerin her biri iin kullanılabilir genetik varyasyonun ve molekler araların bulunduėunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte tek bir alıřma veya teknoloji henz bu zelliklerin tamamını aynı genotipte garanti etmemektedir. Bu nedenle en gereki yaklařım, klasik melez ıřlahının saėladıėı geniř genetik rekombinasyon kapasitesini ift haploid teknoloji, hassas fenotipleme, markr destekli seleksiyon, genomik tahmin, oklu omik analizler ve gerektiėinde hedefli genom dzenlemeyle btnleřtirmektir. Tatlı mısıırda genetik ilerlemenin srdrlebilirliėi ise genetik eřitliliėin korunmasına, farklı ekolojilerde tekrarlanan deėerlendirmelere ve tketiciler tarafından algılanan kalite ile reticinin gereksinim duyduėu agronomik performansın aynı seleksiyon srecinde ele alınmasına baėlı olacaktır.

SONU VE NERİLER

Tatlı mısıır, taze tketimin yanı sıra gıda sanayisinde farklı biimlerde iřlenebilmesi, yksek řeker ieriėi, kendine zg tane yapısı ve besin bileřimi nedeniyle ekonomik deėeri yksek zel bir mısıır grubudur. Tatlı mısıır diėer mısıır tiplerinden ayıran temel zellik, endospermde karbonhidrat metabolizmasını etkileyen genetik farklılıkların niřasta sentezini sınırlandırarak řeker birikimini artırmasıdır. Bununla birlikte, gnmzde tatlı mısıırın retim ve pazar deėeri yalnızca tatlılık dzeyine gre deėerlendirilmemektedir. Verim ve pazarlanabilir koan zelliklerinin yanı sıra tane yumuřaklıėı, tane kabuėu kalınlıėı, aroma, renk, besin bileřimi, hasat sonrası dayanıklılık ve iřleme zellikleri de

ürünün genel kalitesini belirlemektedir. Bu nedenle tatlı mısır yetiştiriciliğinde temel hedef, yalnızca yüksek koçan verimine ulaşmak değil, yüksek ve kararlı pazarlanabilir verim ile tüketici tarafından tercih edilen kalite özelliklerini aynı üretim sistemi içerisinde sürdürülebilir biçimde sağlayabilmektir.

Tatlı mısır yetiştiriciliğinde başarı, genotip ile çevre koşulları ve yetiştirme uygulamaları arasındaki interaksiyonların uygun biçimde yönetilmesine bağlıdır. İklim ve toprak koşulları, ekim zamanı, çeşidin erkenciliği ve stres toleransı, bitki sıklığı, sulama ve bitki besleme uygulamaları hem verimi hem de kalite özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Yapılan çalışmalar, farklı genotiplerin aynı yetiştirme uygulamalarına benzer düzeyde tepki vermediğini açık biçimde göstermektedir. Bu nedenle belirli bir araştırmada başarılı bulunan bitki sıklığı, azot dozu, sulama miktarı, toprak nemi eşiği veya diğer yetiştirme uygulamalarının farklı ekolojilere doğrudan aktarılması uygun değildir. Tatlı mısır üretiminde çeşit seçimi ile yetiştirme uygulamalarının; bölgesel iklim ve toprak özellikleri, ekim dönemi, üretim amacı ve hedef pazar dikkate alınarak birlikte planlanması gerekmektedir.

Özellikle süper tatlı genotiplerde yüksek şeker içeriğinin düşük tohum gücü, yavaş ve düzensiz çıkış gibi bazı yetiştiricilik sorunlarıyla birlikte görülebilmesi, tohum kalitesini başarılı üretimin temel unsurlarından biri hâline getirmektedir. Bu nedenle ticari üretimde yalnızca koçan kalitesi yüksek çeşitlerin seçilmesi yeterli olmayıp, yüksek çimlenme oranına, güçlü çıkış yeteneğine ve iyi erken fide gelişimine sahip tohumlukların kullanılması da önem taşımaktadır. Erken ekim koşullarında düşük sıcaklığa tolerans, sıcak bölgelerde yüksek sıcaklığa dayanıklılık ve aşırı yağışın görüldüğü üretim alanlarında su baskınına tolerans gibi özelliklerin çeşit seçimindeki önemi giderek artmaktadır. İklim değişikliğinin yüksek sıcaklık, kuraklık, aşırı yağış ve diğer çevresel streslerin görülme sıklığını ve şiddetini artırma potansiyeli dikkate alındığında, çevre koşullarına uyum ve stres toleransı gelecekte tatlı mısır üretiminde verim kararlılığının ve üretim güvenliğinin temel unsurlarından biri olacaktır.

Bitki sıklığı, sulama ve bitki besleme uygulamalarının yönetiminde temel yaklaşım, girdilerin en yüksek düzeyde kullanılmasından çok, genotip ve çevre koşullarına uygun düzeylerde uygulanması olmalıdır. Yüksek bitki sıklığı, sık ekime toleranslı ve kompakt bitki yapısına sahip bazı genotiplerde birim alandaki koçan sayısını ve verimi artırabilmekle

birlikte; ışığın bitki örtüsü içerisindeki dağılımı, koçan büyüklüğü, tane dolumu, sap dayanıklılığı ve kök gelişimi üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Benzer şekilde tam sulama çoğu durumda yüksek pazarlanabilir verimi desteklerken, kontrollü su kısıtı bazı koşullarda sulama suyu kullanım etkinliğini artırabilmektedir; ancak sağlanan su tasarrufunun olası verim kaybıyla birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Gübrelemede de yüksek mineral gübre dozlarının uygulanmasından ziyade, toprak analizine dayalı bitki besleme, organik ve mineral kaynakların birlikte kullanılması ve gerekli durumlarda yaprakтан besleme veya mikroorganizma temelli uygulamalardan yararlanılması daha sürdürülebilir bir yaklaşım oluşturmaktadır. Böylece ekonomik verimliliğin yanı sıra su ve besin elementlerinin kullanım etkinliğinin artırılması ve çevresel yükün azaltılması mümkün olabilmektedir.

Tatlı mısırdaki biyotik ve abiyotik streslerin yönetiminde bütüncül bir yaklaşım benimsenmelidir. Yabancı otlarla mücadelede kültürel uygulamalar, örtü bitkileri ve uygun herbisitlerin birlikte değerlendirilmesi; hastalık ve zararlıların yönetiminde ise dayanıklı genotiplerin kullanılması, tarla hijyeni, biyolojik mücadele ve gerektiğinde uygun kimyasal uygulamalardan yararlanılması önem taşımaktadır. Tatlı mısır genotiplerinin bazı herbisitlere duyarlılık bakımından önemli farklılıklar gösterebilmesi nedeniyle herbisitlerin ürün güvenliğinin çeşit bazında değerlendirilmesi gerekmektedir. Tuzluluk, düşük ve yüksek sıcaklık, kuraklık ve su baskını gibi abiyotik streslerde ise yetiştirme uygulamaları tek başına yeterli olmayabilmektedir. Bu nedenle stres toleranslı çeşitlerin geliştirilmesi ve üretimde kullanılması, iklim değişikliğine uyumlu tatlı mısır yetiştiriciliğinin uzun vadeli temel yaklaşımlarından biri olarak değerlendirilmelidir.

Tatlı mısırdaki hasat zamanının doğru belirlenmesi, yetiştirme süresince oluşan kalite potansiyelinin korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Taze tüketim amacıyla hasat fizyolojik olgunluktan önce, genellikle süt olum döneminde gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte, en uygun hasat zamanının yalnızca ekinde, koçan püskülü çıkışından veya döllenmeden sonra geçen sabit gün sayısına göre belirlenmesi yeterli değildir. Genotipin erkenciliği, çevre koşulları, tane nemi, kuru madde birikimi, şeker bileşimi ve tane yapısı birlikte değerlendirilmelidir. Hasadın gecikmesiyle kuru madde ve bazı bileşenlerin miktarı artabilmekle birlikte, şeker içeriği, tane yumuşaklığı ve aroma özellikleri arasındaki tüketim açısından uygun denge değişebilmektedir. Bu nedenle

hasat olgunluđu, ürünün taze tüketim veya işleme amacı ile hedeflenen kalite özellikleri dikkate alınarak belirlenmelidir.

Tatlılık, tatlı mısır kalitesinin temel bileşenlerinden biri olmakla birlikte, ürün kalitesinin yalnızca yüksek şeker içeriđiyle tanımlanması yeterli değildir. Sakkaroz, glukoz, fruktoz ve diđer karbonhidratların miktarı ve dağılımı; tane kabuğunun kalınlıđı ve yapısı; tane sertliđi ve sululuđu; koçanın görünümü; uçucu aroma bileşikleri ile karotenoidler, antosiyaninler ve diđer pigmentler tüketim ve pazar kalitesinin oluşumuna birlikte katkı sağlamaktadır. İnce tane kabuđu genellikle tüketim kalitesini artırmakla birlikte, aşırı incelme tane bütünlüğünü ve işleme dayanıklılıđını olumsuz etkileyebileceğinden, ıslah ve çeşit seçiminde yumuşaklık ile yapısal dayanıklılık arasında uygun bir dengenin sağlanması gerekmektedir. Benzer şekilde, en yüksek şeker içeriđi ile besin değeriyle ilişkili biyoaktif bileşiklerin en yüksek düzeyleri her zaman aynı genotipte veya aynı hasat döneminde ortaya çıkmamaktadır. Bu nedenle tatlı mısır kalitesinin değerlendirilmesinde tek bir özellik yerine, fiziksel, kimyasal ve tüketim özelliklerinin birlikte ele alınması daha dođru bir yaklaşım olacaktır.

Tatlı mısırın karotenoidler, fenolik bileşikler, flavonoidler, antosiyaninler, vitaminler ve mineral elementler bakımından önemli genotipik çeşitlilik göstermesi, besin değeriinin geliştirilmesi açısından önemli bir genetik potansiyel oluşturmaktadır. β -karoten, E vitamini, folat ve selenyum gibi bileşenlerin artırılmasına yönelik genetik yaklaşımlar ve yetiştirme uygulamalarına dayalı besin öğelerince zenginleştirme çalışmaları umut verici sonuçlar ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, belirli bir bileşiğin miktarındaki artışın doğrudan daha yüksek genel besin kalitesi veya insan sađlığı açısından kanıtlanmış bir yarar anlamına gelmediđi dikkate alınmalıdır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda kimyasal bileşim analizlerinin biyoerişilebilirlik ve biyoyararlanım araştırmalarıyla desteklenmesi, ayrıca geliştirilen besin özelliklerinin tat, tane yapısı, verim ve diđer ticari özelliklerle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Hasat sonrası dönemde tatlı mısırdaki yüksek solunum hızı ve yüksek su içeriđi nedeniyle kalite kayıpları hızlı biçimde meydana gelebilmektedir. Bu nedenle yüksek kaliteli üretim, hasatla sona ermemekte; ürünün tüketiciye veya işleme tesisine ulaşınca kadar uygun koşullarda korunmasını da kapsamaktadır. Ürünün hasattan sonra hızla soğutulması, düşük sıcaklığın kesintisiz sürdürölmesi, su kaybının sınırlandırılması ve

mikrobiyal bulaşmanın azaltılması hasat sonrası kalite yönetiminin temel unsurlarıdır. Modifiye atmosferde muhafaza, uygun ambalajlama ve dondurma gibi yöntemler soğuk zinciri tamamlayıcı uygulamalar olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, muhafaza süresi ve en uygun depolama koşulları genotip, hasat olgunluğu, ürünün kavuzlu veya kavuzsuz olması, ürün formu ve uygulanacak işleme yöntemine bağlı olarak değişebildiğinden, tek bir raf ömrü veya depolama protokolünün bütün tatlı mısır çeşitleri için geçerli olduğu kabul edilmemelidir.

Gelecekte tatlı mısır üretimindeki önemli ilerlemelerden birinin, yetiştiricilik uygulamaları ile genetik ıslahın daha güçlü biçimde ilişkilendirilmesinden sağlanması beklenmektedir. Katlanmış haploid teknolojisi, markör destekli seleksiyon, genom çapında ilişkilendirme analizleri (GWAS), genomik tahmin, transkriptomik, metabolomik ve diğer omik yaklaşımlar; verim, tohum gücü, tane kabuğu kalınlığı, şeker bileşimi, besin özellikleri ve stres toleransı gibi karmaşık karakterlerin genetik temelini daha ayrıntılı biçimde ortaya konmasına katkı sağlamaktadır. CRISPR/Cas tabanlı genom düzenleme ve özellikle hassas baz düzenleme teknolojilerindeki gelişmeler ise doğal mutasyonlara veya uzun süreli geri melezleme süreçlerine olan bağımlılığı azaltarak belirli endosperm ve kalite özelliklerinin daha kontrollü biçimde değiştirilmesine olanak sağlayabilir. Bununla birlikte, genomik ve biyoteknolojik araçların kullanımı çok yıllı ve çok çevreli fenotipik doğrulamanın yerini almamakta; aksine geliştirilen genetik materyalin farklı yetiştirme koşullarındaki performansının doğrulanmasını daha önemli hâle getirmektedir.

Bu kapsamda gelecekteki araştırmalarda; (i) geniş tatlı mısır genetik kaynaklarının farklı ekolojilerde çok yıllı ve çok lokasyonlu olarak değerlendirilmesi, (ii) genotip $\times$ çevre $\times$ yetiştirme uygulamaları interaksiyonlarının verim ve kalite bakımından birlikte incelenmesi, (iii) kuraklık, yüksek sıcaklık, düşük sıcaklık ve su baskını gibi streslere toleranslı genetik materyalin geliştirilmesi, (iv) güçlü çıkış yeteneği ile yüksek tatlılık özelliğinin aynı genotipte birleştirilmesi, (v) şeker içeriği, tane kabuğu yapısı, aroma ve besin bileşiklerinin birlikte değerlendirildiği standart kalite fenotipleme yöntemlerinin geliştirilmesi, (vi) su ve besin elementi kullanım etkinliğini artıran hassas yetiştiricilik uygulamalarının geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, (vii) hasat sonrası kayıpları azaltmaya yönelik hızlı soğutma, ambalajlama ve muhafaza yöntemlerinin genotipe özgü olarak belirlenmesi ve (viii) moleküler markörler, genomik tahmin ve

genom düzenleme yoluyla geliştirilen materyallerin farklı üretim çevrelerinde doğrulanması öncelikli araştırma alanları arasında yer almalıdır.

Sonuç olarak tatlı mısır; yetiştiricilik, kalite, insan beslenmesi, gıda teknolojisi ve genetik ıslahın kesişiminde yer alan ve geliştirilme potansiyeli yüksek bir üründür. Sürdürülebilir tatlı mısır üretiminin geleceği, herhangi bir özelliğin tek başına en yüksek düzeye çıkarılmasından çok; yüksek ve kararlı pazarlanabilir verim, üstün tüketim kalitesi, yüksek besin değeri, güçlü tarla performansı, çevresel streslere tolerans ve hasat sonrası kalite sürekliliğinin birlikte sağlanmasına bağlı olacaktır. Bu hedefe ulaşmada bölgesel yetiştiricilik bilgisinin modern genomik ve biyoteknolojik araçlarla birlikte kullanılması, tatlı mısırın üretici, tüketici ve gıda sanayisi açısından değerinin daha da artırılmasına önemli katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Alan, O., Budak, B., Sen, F., Gundogdu, M. 2024. Impact of integrated organomineral fertilizer application on growth, yield, quality, and health-related compounds of sweet corn. *Turkish Journal of Field Crops*, 29(2), 206–217. <https://doi.org/10.17557/tjfc.1558495>
- Anirban, A., Hong, H.T., O'Hare, T.J. 2023. Profiling and quantification of anthocyanins in purple-pericarp sweetcorn and purple-pericarp maize. *Molecules*, 28, 2665. <https://doi.org/10.3390/molecules28062665>
- Asamoah, E.O., Ssemalawa, S.M., Danso, O.P., Wang, Y., Farooq, M.R., Rao, P., Sun, H., Guo, Y., Yin, X., Chen, Y. 2025. Foliar application of selenium increased selenium accumulation, speciation, and bioaccessibility, as well as the yield and nutritional quality of sweet maize. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1733890. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1733890>
- Ashraf, H., Wu, Y., Xiao, Y., Liang, X., Li, X., Shokat, S., Li, Y. 2026. Integrating GWAS and gene expression to decipher genetic components of pericarp thickness and soluble sugars in sweet corn. *BMC Plant Biology*, 26, 293. <https://doi.org/10.1186/s12870-026-08165-x>
- Becerra-Sanchez, F., Taylor, G. 2021. Reducing post-harvest losses and improving quality in sweet corn (*Zea mays* L.): challenges and solutions for less food waste and improved food security. *Food and Energy Security*, 10, e277. <https://doi.org/10.1002/fes3.277>
- Behboud, R., Moradi, A., Piri, R., Dedicova, B., Fazeli-Nasab, B., Ghorbanpour, M. 2024. Sweet corn (*Zea mays* L.) seed performance enhanced under drought stress by chitosan and minerals coating. *BMC Plant Biology*, 24, 991. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05704-2>
- Chang, H., Chen, H., Wang, J., Wu, Q., Deng, B., Qin, Y., Chen, S., Liang, Q. 2026. Optimizing planting density and nitrogen application enhances root lodging resistance and yield via improved post-anthesis light distribution in sweet corn. *Plants*, 15, 200. <https://doi.org/10.3390/plants15020200>
- Cruz, L.L. da, Gonçalves, G.M.B., Glória, L. de L., Pereira, S.M. de F., Carlos, L. de A., Vivas, M., Pereira, M.G., Oliveira, D.B. de. 2022. Phenolic compounds, carotenoids, and antioxidant activity in a super-sweet corn hybrid. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 57, e02663. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02663>
- Cui, N., Wang, Y., Yu, Y., Rizwan, A., Yu, H., Wang, Y., Cheng, X. 2026. Genome-wide-association-analysis-based identification of genetic loci and candidate genes associated with seedling emergence rate in super-sweet corn (*Zea mays* L.). *BMC Plant Biology*, 26, 424. <https://doi.org/10.1186/s12870-026-08228-z>
- Das, A., Murmu, K., Mitra, B., Bandopadhyay, P., Kundu, R., Roy, M., Alfarraj, S., Ansari, M.J., Brestic, M., Hossain, A. 2024. Various organic nutrient sources in combinations with inorganic fertilizers influence the yield and quality of sweet corn (*Zea mays* L. *saccharata*) in new alluvial soils of West Bengal, India. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 93(4), 763–776. <https://doi.org/10.32604/phyton.2024.049473>
- Demeter, C., Nagy, J., Huzsvai, L., Zelenák, A., Szabó, A., Széles, A. 2021. Analysis of the content values of sweet maize (*Zea mays* L. Convar *Saccharata* Koern) in precision farming. *Agronomy*, 11, 2596. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122596>
- Dhaliwal, D.S., Williams, M.M. II. 2022. Evidence of sweet corn yield losses from rising temperatures. *Scientific Reports*, 12, 18218. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23237-2>
- Du, Y., Xu, J., Li, H., Zhou, M., Pang, X., Yan, J., He, Y., Lian, G., Feng, F. 2026. Genome-wide association studies of agronomic and yield traits in sweet corn (*Zea mays* L. var. *saccharata*). *Plants*, 15, 2406. <https://doi.org/10.3390/plants15152406>
- Feng, M., Zhang, Y., Coates, B.S., Du, Q., Gao, Y., Li, L., Yuan, H., Sun, W., Chang, X., Zhou, S., Wang, Y. 2023. Assessment of *Beauveria bassiana* for the biological control of corn borer, *Ostrinia furnacalis*, in sweet maize by irrigation application. *BioControl*, 68, 49–60. <https://doi.org/10.1007/s10526-022-10175-1>

- Feng, H., Guo, J., Xu, C., Li, Z., Hu, Z., Zhu, J., Chen, W., Qiu, F., Xu, C. 2026. Elucidation of sugar metabolic profiles and transcriptional regulatory networks during the developmental stages of sweet corn kernels. *iScience*, 29, 116247. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2026.116247>
- Gwartz, J.A., Garcia-Casal, M.N. 2014. Processing maize flour and corn meal food products. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1312, 66–75. <https://doi.org/10.1111/nyas.12299>
- Gou, C., Huang, Q., Rady, M.M., Wang, L., Ihtisham, M., El-awady, H.H., Seif, M., Alazizi, E.M.Y., Eid, R.S.M., Yan, K., Tahri, W., Li, J., Desoky, E.-S.M., El-Sappah, A.H. 2023. Integrative application of silicon and/or proline improves sweet corn (*Zea mays* L. *saccharata*) production and antioxidant defense system under salt stress condition. *Scientific Reports*, 13, 18315. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45003-8>
- Harakotr, B., Sutthiluk, W., Rithichai, P. 2022. Changes on sugar and starch contents during seed development of synergistic sweet corn and implication on seed quality. *International Journal of Agronomy*, 2022, 6550474. <https://doi.org/10.1155/2022/6550474>
- Hu, Y., Colantonio, V., Müller, B.S.F., Leach, K.A., Nanni, A., Finegan, C., Wang, B., Baseggio, M., Newton, C.J., Juhl, E.M., Hislop, L., Gonzalez, J.M., Rios, E.F., Hannah, L.C., Swarts, K., Gore, M.A., Hennen-Bierwagen, T.A., Myers, A.M., Settles, A.M., Tracy, W.F., Resende Jr., M.F.R. 2021. Genome assembly and population genomic analysis provide insights into the evolution of modern sweet corn. *Nature Communications*, 12, 1227. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21380-4>
- Islam, M.S., Kasim, S., Amin, A.M., Alam, M.K., Khatun, M.F., Ahmed, S., Gaber, A., Hossain, A. 2023. Foliar application of enriched banana pseudostem sap influences the nutrient uptake, yield, and quality of sweet corn grown in an acidic soil. *PLOS ONE*, 18(8), e0285954. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285954>
- Katsenios, N., Andreou, V., Sparangis, P., Djordjevic, N., Giannoglou, M., Chanioti, S., Kasimatis, C.-N., Kakabouki, I., Leonidakis, D., Danalatos, N., Katsaros, G., Efthimiadou, A. 2022. Assessment of plant growth promoting bacteria strains on growth, yield and quality of sweet corn. *Scientific Reports*, 12, 11598. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16044-2>
- Lau, T., Clayton, T., Harbourne, N., Rodriguez-Garcia, J., Oruna-Concha, M.J. 2022. Sweet corn cob as a functional ingredient in bakery products. *Food Chemistry: X*, 13, 100180. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2021.100180>
- Li, K., Zeng, J., Zhang, N., Yu, Y., Zhu, W., Li, G., Hu, J. 2024. Multi-layer molecular analysis reveals distinctive metabolomic and transcriptomic profiles of different sweet corn varieties. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1453031. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1453031>
- Li, K., Yu, Y., Liu, H., Yan, S., Zhu, W., Xie, L., Huang, W., Li, W., Wen, T., Hu, J., Li, G., Li, C. 2025. Unraveling the genetic mechanisms of waterlogging stress through the leaf metabolome of a sweet corn panel. *BMC Plant Biology*, 25, 1503. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-07510-w>
- Lucena, V.J., Oliveira, J.M.M., Fregonezi, B.F., Duarte, I.A., Santos, J.O.G., Camilo, L.A., Oliveira, M.E.A., Hoda, O.G.L., Ferreira, J.M. 2025. Performance of double-haploid tropical super sweet corn lines in a partial diallel. *Semina: Ciências Agrárias*, 46(2), 533–548. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2025v46n2p533>
- Lv, G., Chen, X., Ying, D., Li, J., Fan, Y., Wang, B., Fang, R. 2022. Marker-assisted pyramiding of γ -tocopherol methyltransferase and glutamate formiminotransferase genes for development of biofortified sweet corn hybrids. *PeerJ*, 10, e13629. <https://doi.org/10.7717/peerj.13629>
- Lv, G., Li, X., Wang, T., Wu, Z., Fang, R., Chen, J. 2024. Mechanisms underlying the differential sensitivity to mesotrione in sweet corn. *Agronomy*, 14, 555. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030555>

- Mousavi, S.M.N., Illes, A., Bojtor, C., Miar, Y., Shojaie, S.H., Nagy, J., Szeles, A. 2025. Effect of harvest time on sugar content and carotenoid composition in different sweet maize hybrids. *Scientific Reports*, 15, 25758. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11680-w>
- Niyorukundo, J., Wehrbein, C., Fischer, A., Alvarez, S., Holding, D.R. 2026. Breeding colored sweet corn for improved micronutrient content. *Frontiers in Plant Science*, 17, 1813937. <https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1813937>
- Piscitelli, L., Colovic, M., Aly, A., Hamze, M., Todorovic, M., Cantore, V., Albrizio, R. 2021. Adaptive agricultural strategies for facing water deficit in sweet maize production: A case study of a semi-arid Mediterranean region. *Water*, 13, 3285. <https://doi.org/10.3390/w13223285>
- Radócz, L., Szabó, A., Tamás, A., Illés, Á., Bojtor, C., Ragán, P., Vad, A., Széles, A., Harsányi, E., Radócz, L. 2023. Investigation of the detectability of corn smut fungus (*Ustilago maydis* DC. Corda) infection based on UAV multispectral technology. *Agronomy*, 13, 1499. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061499>
- Ranum, P., Peña-Rosas, J.P., Garcia-Casal, M.N. 2014. Global maize production, utilization, and consumption. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1312, 105–112. <https://doi.org/10.1111/nyas.12396>
- Revilla, P., Anibas, C.M., Tracy, W.F. 2021. Sweet corn research around the world 2015–2020. *Agronomy*, 11, 534. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030534>
- Saha, I., Rathinavel, K., Manoharan, B., Adhimoolam, K., Sampathrajan, V., Rajasekaran, R., Muthurajan, R., Natesan, S. 2022. The resurrection of sweet corn inbred SC11-2 using marker aided breeding for β -carotene. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 1004450. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1004450>
- Salama, D.M., Abd El-Aziz, M.E., Osman, S.A., Abd Elwahed, M.S.A., Shaaban, E.A. 2026. Morpho-physiological and biochemical responses and genomic stability of sweet corn (*Zea mays* L. *saccharata*) to potassium ferrite nano-fertilizer. *BMC Plant Biology*, 26, 380. <https://doi.org/10.1186/s12870-026-08131-7>
- Salman, M., Inamullah, Jamal, A., Mihoub, A., Saeed, M.F., Radicetti, E., Ahmad, I., Naeem, A., Ullah, J., Pampana, S. 2023. Composting sugarcane filter mud with different sources differently benefits sweet maize. *Agronomy*, 13, 748. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030748>
- Setyorini, D., Fidiyawati, E., Istiqomah, N., Sugiono, S., Arifin, Z. 2023. Substitute a half dose of macro fertilizers with liquid organic fertilizers on sweet corn plants (*Zea mays saccharata*) on Inceptisol soil in Indonesia. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 22(2), 194–206. <https://doi.org/10.5965/223811712222023194>
- Sidahmed, H., Vad, A., Nagy, J. 2025. Advances in sweet corn (*Zea mays* L. *saccharata*) research from 2010 to 2025: Genetics, agronomy, and sustainable production. *Agronomy*, 15, 1260. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051260>
- Stansluos, A.A.L., Öztürk, A., Türkoğlu, A., Piekutowska, M., Niedbała, G. 2024. Planting geometry may be used to optimize plant density and yields without changing yield potential per plant in sweet corn. *Plants*, 13, 2465. <https://doi.org/10.3390/plants13172465>
- Thapa, B., Awal, R., Fares, A., Veetil, A., Elhassan, A., Rahman, A., Melaku, N., Woldesenbet, S. 2024. Positive sweet corn response with selected climate-smart agricultural practices. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 7, e70011. <https://doi.org/10.1002/agg2.70011>
- Tupajić, I., Moravčević, Đ., Matejić, V., Šević, B., Čosić, M., Ugrinović, M., Stojiljković, J. 2026. Sweet corn yield and sugar content depending on genotype, sowing date and irrigation. *Turkish Journal of Field Crops*, 31(1), e1633490. <https://doi.org/10.17557/tjfc.1633490>
- UPOV (International Union for the Protection of New Varieties of Plants). 2025. List of genera and species for which authorities have practical experience in the examination of

- distinctness, uniformity and stability. *Technical Committee, Sixty-first Session*, Geneva, October 20–21, 2025, Document TC/61/4.
- Ullah, J., Chen, S., Ruan, Y., Ali, A., Khan, N.M., Rehman, M.N.U., Fan, P. 2023. Combined di-ammonium phosphate and straw return increase yield in sweet corn. *Agronomy*, 13, 1885. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071885>
- Wang, M., Jin, S., Ding, Z., Xie, J. 2023. Effects of different freezing methods on physicochemical properties of sweet corn during storage. *International Journal of Molecular Sciences*, 24, 389. <https://doi.org/10.3390/ijms24010389>
- Wang, J., Fan, Y., Liang, L., Dong, Z., Li, M., Wu, Z., Lin, X., Wang, X., Zhen, Z. 2024. GO promotes detoxification of nicosulfuron in sweet corn by enhancing photosynthesis, chlorophyll fluorescence parameters, and antioxidant enzyme activity. *Scientific Reports*, 14, 21213. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72203-7>
- Wang, J., Wang, Y., Wang, Y., Zhong, X., Wang, X., Lin, X. 2025. Metabolomic analyses reveal that graphene oxide alleviates nicosulfuron toxicity in sweet corn. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1529598. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1529598>
- Wang, H., Wang, Y., Yu, R., Cheng, P., Zeng, Y., Cheng, X., Shen, W. 2026. Impact of hydrogen-enriched solution irrigation on grain yield and nutritional quality of sweet corn. *Foods*, 15, 1847. <https://doi.org/10.3390/foods15111847>
- Wu, Z., Wang, T., Chen, J., Zhang, Y., Lv, G. 2024. Sweet corn association panel and genome-wide association analysis reveal loci for chilling-tolerant germination. *Scientific Reports*, 14, 10791. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61797-7>
- Wu, S., Chen, B., Wang, X., Wang, C., Hu, Y., Cai, X., Zhang, Y., Qiao, Y. 2025. Analysis of the effects of steaming and spray-drying on volatile flavor components of sweet corn beverage based on HS-SPME-GC–MS and HS-GC-IMS. *Food Chemistry: X*, 27, 102478. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102478>
- Wu, X., Liu, R., Zhang, M., Yang, M., Zhou, C., Kuang, R., Chen, Y., Wei, Y. 2025. Combined transcriptome, metabolome, and miRNA analysis reveals the genetic regulatory network of sweet corn pericarp thickness. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1698281. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1698281>
- Xiao, Y., Chen, M., Zheng, N., Xu, Z., Zhang, J., Hu, X., Li, L., Gu, R., Du, X., Wang, J. 2023. Transcriptome analysis identifies novel genes associated with low-temperature seed germination in sweet corn. *Plants*, 12, 159. <https://doi.org/10.3390/plants12010159>
- Xue, Y., Liu, S., Nie, Q., Zhang, X., Zhao, Y., Li, Y., Lv, H. 2025. Effects of *Fusarium graminearum* and *Fusarium verticillioides* infection on sweet corn quality during postharvest storage. *Foods*, 14, 4147. <https://doi.org/10.3390/foods14234147>
- Yang, R., Li, Y., Zhang, Y., Huang, J., Liu, J., Lin, Z., Yu, Q., Wu, A., Wang, B. 2021. Widely targeted metabolomics analysis reveals key quality-related metabolites in kernels of sweet corn. *International Journal of Genomics*, 2021, 2654546. <https://doi.org/10.1155/2021/2654546>
- Yang, Q., Guo, Z., Zhang, J., Wang, Y., Xu, Y., Nian, H. 2024. Genome-wide association study reveals marker–trait associations for heat-stress tolerance in sweet corn. *Agronomy*, 14, 2171. <https://doi.org/10.3390/agronomy14092171>
- Ye, D., Chen, J., Yu, Z., Sun, Y., Gao, W., Wang, X., Zhang, R., Zaib-Un-Nisa, Su, D., Muneer, M.A. 2023. Optimal plant density improves sweet maize fresh ear yield without compromising grain carbohydrate concentration. *Agronomy*, 13, 2830. <https://doi.org/10.3390/agronomy13112830>
- Ye, D., Yu, Z., Chen, J., Wei, S., Zhang, Z., Huang, S., Su, D., Liu, T., Muneer, M.A. 2025. Foliar magnesium application improves sweet corn yield: boosting nutrient uptake and grain carbohydrate under dense planting condition. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1499391. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1499391>

- Yu, X., Xiao, S., Yan, T., Chen, Z., Zhou, Q., Pan, Y., Yang, W., Lu, M. 2023. Interspecific competition as affected by nitrogen application in sweet corn–soybean intercropping system. *Agronomy*, 13, 2268. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092268>
- Yurchak, V.L., Leslie, A.W., Hooks, C.R.R. 2023. Assessing the efficacy of living and dead cover crop mixtures for weed suppression in sweet corn. *Agronomy*, 13, 688. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030688>
- Zargar, T.B., Basal, O., Veres, S. 2025a. Dose and genotype dependent effects of foliar acetic acid on sweet corn under water deficit. *Scientific Reports*, 15, 42327. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-26320-6>
- Zargar, T.B., Sobh, M., Basal, O., Janda, T., Pál, M., Veres, S. 2025b. Spermine driven water deficit tolerance in early growth phases of sweet corn genotypes under hydroponic cultivation. *Scientific Reports*, 15, 1796. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86083-y>
- Zargar, T.B., Sobh, M., Basal, O., Veres, S. 2025c. Genotype-dependent resilience mediated by melatonin in sweet corn. *BMC Plant Biology*, 25, 29. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05972-y>
- Zhang, B., Li, K., Cheng, H., Hu, J., Qi, X., Guo, X. 2023. Effect of thermal treatments on volatile profiles and fatty acid composition in sweet corn (*Zea mays* L.). *Food Chemistry: X*, 18, 100743. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100743>
- Zhang, Z., Yang, R., Gao, L., Huang, S., Jiang, F., Chen, Q., Liu, P., Feng, F. 2025. Dynamic transcriptome and metabolome analyses of two sweet corn lines under artificial aging treatment. *BMC Genomics*, 26, 375. <https://doi.org/10.1186/s12864-025-11586-x>
- Zhang, L., Wang, Y., Liu, M., Song, Z., Li, X., Fu, Y., Wang, P., Liu, Y., Wang, R., Zhao, J. 2026. One-step generation of *sh2isu1* sweet maize via CRISPR/Cas9 cytosine base editor (CBE). *Journal of Integrative Agriculture*, 25(3), 1297–1300. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2025.11.031>
- Zhai, L., Tang, Y., Dong, M., Chen, G., Wang, Y., Teng, F., Huang, J. 2024. Characterization of volatile metabolites in temperate and tropical sweet corn cultivars under various post-harvest storage conditions. *Food Chemistry: X*, 24, 102020. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102020>